



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

RAYNNER MENEZES LOPES

**METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA REGRA DE OPERAÇÃO E
AVALIAÇÃO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

PORTO ALEGRE

2020

RAYNNER MENEZES LOPES

**METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA REGRA DE OPERAÇÃO E
AVALIAÇÃO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutor.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

coorientador: Prof. Dr. Mauricio Dai Pra

PORTO ALEGRE

2020

Lopes, Raynner Menezes

Metodologia para otimização da regra de operação e avaliação do custo do ciclo de vida de sistemas de bombeamento de água / Raynner Menezes Lopes. -- 2020. 166 f.

Orientador: Marcelo Giulian Marques.

Coorientador: Maurício Dai Prá.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Custo do ciclo de vida. 2. Confiabilidade de bombas hidráulicas. 3. Eficiência energética. 4. Transientes Hidráulicos. 5. Chaminé de equilíbrio. I. Marques, Marcelo Giulian, orient. II. Prá, Maurício Dai, coorient. III. Título.

RAYNNER MENEZES LOPES

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA REGRA DE OPERAÇÃO E AVALIAÇÃO
DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutor.

Aprovado em: Porto Alegre, 16 de dezembro de 2020.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

Coorientador: Prof. Dr. Maurício Dai Pra

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez – UNIFEI
Examinador externo

Prof. Dr. Joice Cristini Kuritza – UTFPR
Examinadora externa

Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira – UFPA
Examinador externo

Prof. Dr. Juan Martin Bravo – IPH/UFRGS
Examinador interno

Dedico ao Carlos Daniel Lopes. Hoje, com 2 anos. Que você continue a crescer forte e saudável, meu filho. Te amo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques, orientador deste trabalho, e ao Prof. Dr. Maurício Dai Pra, coorientador. Minha gratidão por terem aceitado participar desta difícil caminhada.

Ao futuro Engenheiro Hídrico, Pedro Guido Mottes Bassegio, pela inteligência, simplicidade, humildade e respeito durante toda a ajuda que me prestou na implementação e revisão dos códigos.

Ao Guilherme Santanna Castiglio, pela amizade durante o breve período em que estive no LENHS/UFRGS, e pelas dúvidas esclarecidas na parte de análise financeira.

Ao CNPq e à CAPES, pelas bolsas de estudo concedidas no início desta caminhada.

Ao IPH, pela estrutura, professores, colegas e conhecimento adquirido.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

Os sistemas de bombeamento de água são estruturas importantes para a garantia de fornecimento de água potável às populações. No entanto, o custo do ciclo de vida desses sistemas pode torná-los inviáveis, especialmente devido ao custo de implantação e ao custo de operação, que constituem a maior parcela do custo do ciclo de vida do sistema. A elevação no preço das tarifas de energia elétrica também tem colaborado significativamente para os aumentos nos custos operacionais dos sistemas, fazendo com que diversos estudos de eficiência energética tenham sido e continuem sendo realizados. Nesta pesquisa foi desenvolvido modelo de simulação, para representar o custo do ciclo de vida de um sistema de bombeamento de água com velocidade rotacional constante. Para minimizar o custo do ciclo de vida do sistema, foi definida uma função-objetivo e utilizado o algoritmo mono objetivo, denominado *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) para minimizar esta função. No programa desenvolvido, foram utilizados dois tipos de dados de entrada, o conjunto de combinações de três parâmetros geométricos que caracterizam o sistema, altura geométrica, comprimento e diâmetro interno da tubulação, e curvas adimensionais de consumo de água, obtidas a partir do monitoramento em sistemas de distribuição reais. Com os resultados gerados, foi possível realizar caracterização detalhada da regra de operação do sistema, a partir da qual foi possível determinar os pontos de operação nos quais a bomba trabalha com menor desgaste. Também foi possível avaliar a eficiência energética do sistema por meio de indicadores, determinar a necessidade e o custo de implantação de dispositivo de proteção contra transientes hidráulicos, determinar o custo do ciclo de vida e suas composições, e gerar valores de referência para alguns indicadores que podem ser úteis no dimensionamento e análise de projetos de sistemas de bombeamento de água com velocidade rotacional constante.

Palavras-chave: Custo do ciclo de vida. Confiabilidade de bombas hidráulicas. Eficiência energética. Transientes Hidráulicos. Chaminé de equilíbrio. SCE-UA.

ABSTRACT

Water pumping systems are important for ensuring the supply of drinking water to populations. However, the life cycle cost of these systems can render them unaffordable, especially due to the implementation cost and the operating cost, which make up the largest part of the life cycle cost. The increased price of electricity fares has also contributed substantially to increases in the operating costs, causing an increased interest of researchers in studying energy efficiency. In this study, a simulation model was developed to represent the life cycle cost of a water pumping system with constant rotational speed. A modal optimization model named *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) was used to minimize system life cycle cost function. Two types of input data were used in the software developed: (i) combinations of three geometric parameters that characterize the system, geometric height, length, and internal diameter of the pipeline, and (ii) dimensional water consumption curves, obtained from monitoring real distribution systems. The results obtained provided a detailed characterization of the operating rule of the system, from which it was possible to determine the operation points in which the pump works with less wear. It was also possible to evaluate the energy efficiency of the system by means of indicators, to determine the need and cost of implementing a protection device against water hammer, to determine the life cycle cost and its components, and to generate reference values for indicators that may be useful in the design and analysis of water pumping systems with constant rotational speed.

Keywords: Life cycle cost. Reliability of hydraulic pumps. Energy efficiency. Water hammer. Standpipe. SCE-UA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Exemplo de posicionamento da estação de bombeamento (estação elevatória) no sistema de abastecimento de água.	23
Figura 3.2 - Tipos de rotores utilizados de bombas centrífugas.	24
Figura 3.3 - Cortes esquemáticos de uma bomba centrífuga, onde pode ser verificado o posicionamento do rotor em relação à carcaça da bomba, que apresenta formato espiral.	24
Figura 3.4 - Instalação típica de uma bomba centrífuga.	25
Figura 3.5 – Ponto de operação de um sistema de bombeamento.	26
Figura 3.6 - Diagrama de balanço de energia com as perdas do sistema.	31
Figura 3.7 - Determinação do diâmetro econômico.	31
Figura 3.8 - Rompimento em aqueduto em Porto Rico, ocasionado por transiente hidráulico.	40
Figura 3.9 - Chaminés de equilíbrio.	42
Figura 3.10 - a) chaminé de equilíbrio simples e seção constante, b) chaminé com estrangulamento na base, c) chaminé de equilíbrio diferencial, d) chaminé de equilíbrio com câmaras.	43
Figura 3.11 - Limites inviáveis de posicionamentos da chaminé de equilíbrio por ineficácia ou elevado custo.	44
Figura 3.12 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem chaminé de equilíbrio em uma linha de adução por bombeamento, após o desligamento acidental do conjunto motor e bomba.	44
Figura 3.13 - Parâmetros utilizados do cálculo de uma chaminé de equilíbrio do tipo simples e seção constante.	46
Figura 3.14 – Fluxograma do processo de otimização.	49
Figura 3.15 - Sequência de um AG clássico.	51
Figura 3.16 - Gráfico da função $f(x) = x \operatorname{sen}(10\pi x) + 1$	52
Figura 3.17 - Fluxograma do algoritmo SCE-UA.	55
Figura 3.18 - Algoritmo de evolução competitiva.	56
Figura 4.1 - Custos que compõem o CCV de um sistema de bombeamento.	58
Figura 4.2 - Elementos básicos para a obtenção custo.	59
Figura 4.3 - Fluxograma geral do estudo.	60
Figura 4.4 – Curvas adimensionais originais e deslocadas e seus fatores de demanda de água (FD) para o início do horário de ponta.	62
Figura 4.5 – Crescimentos da população brasileira até 2040 a partir dos dados dos Censos do IBGE, utilizando variados métodos de projeção populacional.	66
Figura 4.6 - Concepção típica do sistema de bombeamento utilizado no estudo.	67
Figura 4.7 - Curva de confiabilidade de Barringer-Nelson.	70
Figura 4.8 - Curva de decaimento do coeficiente C para tubos de $F^{\circ}F^{\circ}$	72
Figura 4.9 – Deslocamento do Ponto de Operação (PO) do sistema de bombeamento para que coincida com o Ponto de Máximo Rendimento (PMR) da bomba.	76
Figura 4.10 – Regra de operação do sistema de bombeamento de água para o primeiro minuto do primeiro dia em um dos anos k para a combinação n de parâmetros geométricos do sistema.	80
Figura 4.11 – Regra de operação do sistema de bombeamento a partir do segundo minuto do primeiro dia para qualquer ano k e combinação n.	81
Figura 4.12 - PIS, COFINS e PIS+COFINS de outubro de 2005 a fevereiro de 2019.	84
Figura 4.13 - Estimativa dos custos operacionais anuais intermediários ao ano 1 e ano 20.	86
Figura 4.14 - Distribuição típica de custos para bombas.	89

Figura 4.15 - Critério de parada do algoritmo SCE-UA quando não há melhora no valor da solução otimizada os últimos 5 loops.....	92
Figura 5.1 - Rotinas de bombeamento durante 5 dias (120 h) de operação geradas pelo SRC para a combinação $H_g = 75 \text{ m} / L = 1000 \text{ m} / D_i = 274 \text{ mm}$, para suprir a curva de consumo do DMAE ($FD = 0,63$), no ano 1 e no ano 20.	100
Figura 5.2 – Linhas de variação do adimensional Q_{b1}/Q_{b20} em relação ao adimensional L/H_g para cada D_i , com a curva da UFPA, tendo consumo de $5401,0 \text{ m}^3/\text{d}$ no ano 1 e $8460,451 \text{ m}^3/\text{d}$ no ano 20.	103
Figura 5.3 - Relação entre a velocidade (v_1) , adimensional (L/H_g) e confiabilidade (Q_{b1}/Q_{b20}).....	105
Figura 5.4 - Energia elétrica consumida mensalmente nas operações das combinações com diâmetros ótimos, no ano 1 e no ano 20.	110
Figura 5.5 - CEE no ano 1 para os diâmetros ótimos de cada combinação de H_g e L	111
Figura 5.6 - CEEN no ano 1 para os diâmetros ótimos de cada combinação de H_g e L	113
Figura 5.7 - Fator de carga no ano 1 (a) e no ano 20 (b) para os diâmetros ótimos de cada combinação de H_g e L	115
Figura 5.8 - Rendimento da bomba no ano 20 para os diâmetros ótimos de cada combinação de H_g e L	116
Figura 5.9 - Rendimento do motor elétrico no ano 20 para os diâmetros ótimos de cada combinação de H_g e L	117
Figura 5.10 - Comparação entre os métodos de verificação de necessidade de chaminé de equilíbrio no sistema de bombeamento.	118
Figura 5.11 – Dispersão dos volumes da chaminé na posição $L_c = 4L/5$ em relação ao adimensional L/H_g	119
Figura 5.12 – Custos da chaminé de equilíbrio na posição $L_c = 4L/5$ para as combinações com a curva de consumo do município de Santana do Livramento – RS.	120
Figura 5.13 – Percentual que o custo da chaminé representa do custo de implantação do sistema	121
Figura 5.14 – Custos que compõem o CCV do sistema de bombeamento e valor final otimizado do CCV para as combinações geométricas com diâmetro ótimo, gerados pelo SRC com a curva do DMAE/RS.	122
Figura 5.15 - CCV em relação aos diâmetros para cada valor de H_g e L com a curva do DMAE/RS.	123
Figura 5.16 – Valores mínimos e máximos para razão CO/CCV em relação ao L/H_g dentro da faixa de valores ótimos cuja diferença do valor do CCV não foi superior a 10%	125
Figura 5.17 - Valores mínimos e máximos da razão CI/CCV	126
Figura 5.18 - Velocidades mínimas, médias e máximas para os anos 1 e 20.....	127
Figura 5.19 - Valores de J_t/H_g , para o ano 1 e 20 em relação ao L/H_g	129
Figura 5.20 - Faixa de valores da razão $V_u/\text{demanda}_{20}$ em relação ao L/H_g	130
Figura 5.21. Relação entre a razão $Q_{b1}/Q_{c20\text{max}}$ e L/H_g	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores de k_s para materiais de condutos.....	28
Tabela 4.1 - Valores de população com representatividade elevada.....	63
Tabela 4.2 - Diâmetros comerciais, espessura das paredes e Pressões Máximas de Serviço dos tubos em Ferro Fundido, Junta Elástica – JGS.....	68
Tabela 4.3 - Valores de H_g e L utilizados no estudo.....	69
Tabela 4.4 - Combinações de H_g , L , com D_i viáveis para a curva de consumo de água.....	69
Tabela 4.5 - Valores de coeficientes C para tubos de ferro fundido.	72
Tabela 4.6 - Potências dos motores elétricos comercializados.....	82
Tabela 4.7 - Tarifas de consumo, demanda e impostos para a modalidade tarifária verde.....	84
Tabela 4.8 - Classificação das estações elevatórias de esgoto baseada na capacidade hidráulica.	89
Tabela 4.9 - Classificação das estações elevatórias utilizadas neste estudo.....	90
Tabela 4.10 - limites de busca para x_1 , x_2 e x_3	93
Tabela 5.1 - Resumo dos principais dados gerados pelo SRC para o sistema da Figura 5.1.	101
Tabela 5.2 - Amplitude dos valores dos parâmetros operacionais e volume útil do reservatório para cada curva de consumo de água.....	102
Tabela 5.3 – Ajuste da equação aos dados 441 dados.	106
Tabela 5.4 – Análise de Variância (ANOVA).....	106
Tabela 5.5 – Coeficientes da equação de regressão múltipla.	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmos Genéticos
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CMB	Conjunto Motor e Bomba
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
DEX	Despesas de Exploração
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
F°F°	Ferro Fundido
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
PVC	Cloreto de Polivinila
PA	Pará
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PIS	Programa de Integração Social
PRFV	Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro
RHO	Reservatório Hidropneumático
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RS	Rio Grande do Sul
SABESP	A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SC	Sistema Cantareira
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution – University of Arizona
SES	Sistema de Esgoto Sanitário
SP	São Paulo
SRC	Sistema com velocidade rotacional constante
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
TAU	Tanque de Alimentação Unidirecional
UHE	Usina Hidrelétrica

LISTA DE SIMBOLOS

Ac	Área interna mínima da seção transversal da chaminé de equilíbrio
At	Área da seção transversal da adutora entre a chaminé/TAU e o reservatório
An	Número de anos de uso da tubulação
b	Energia cinética da água de aspiração
C	Coefficiente de Hazen-Williams
c	Energia de descompressão da água
C _{Adutora}	Custo de implantação da linha de adução
C _{AE}	Coefficiente que representa o acréscimo das energias
C _{chaminé}	Custo de implantação de uma chaminé de equilíbrio
C _{CMB}	Custo de implantação do CMB
CEE	Consumo Específico de Energia Elétrica
C _E	Energia Elétrica Consumida
CEE _N	Consumo Específico de Energia Normalizado
CEE _L	Consumo Específico de Energia Elétrica por Quilômetro de Adutora
C _{energia}	Custo anual com energia elétrica
C _{EFp}	Energia elétrica consumida no horário fora de ponta
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CI	Custo de implantação
CO	Custo de operação
CO _{SI}	Custo de operação sem impostos
Cosφ	Fator de potência
C _{Ep}	Energia elétrica consumida no horário de ponta
C _{reservatório}	Custo de implantação do reservatório
d	Energia que possa influenciar no tempo de parada
D	Diâmetro
D _C	Demanda contratada
Dem	Demanda solicitada à concessionária de energia elétrica pelo consumidor
Di	Diâmetro interno da tubulação
e	Taxa de aumento da energia elétrica
f	Fator de atrito
Fa	Fator de atualização

FC	Fator de carga
g	Aceleração da gravidade
h	Carga hidráulica na saída do reservatório
Hb	Pressão atmosférica
Hc	Altura da chaminé de equilíbrio
Hg	Altura geométrica
Hm	Altura manométrica
Hmb _{1/1}	Altura manométrica da bomba no ponto de máximo rendimento
Hmb ₂₀	Altura manométrica da bomba no ano 20
Hms	Altura manométrica do sistema
hs	Sobrepresão/subpresão pelo método gráfico de Allievi
Hu	Altura útil de elevação
H+	Sobrepresão pelo método de Tassinari (2017)
H-	Subpresão pelo método de Tassinari (2017)
i	Taxa de juro anual
J	Perda de carga
Ja	Perda de carga total na tubulação de aspiração
Jcr	Perda de carga na adutora entre a chaminé e o reservatório.
Jd	Perda de carga distribuída
Jr	Perda de carga total na tubulação de recalque
Js	Perda de carga singular
J _R	Perda de carga relativa
Jt	Perda de carga Total
k	Coefficiente relacionado ao módulo de elasticidade do material do tubo
K	Constante de Bresse
K ₁	Coefficiente do dia de maior consumo de água
K _i	Coefficiente que representa o efeito da inercia das partes girantes do CMB
k _s	Coefficiente de perda de carga singular
L	Comprimento da linha de adução
Lc	Comprimento da linha de adução entre a chaminé e reservatório
n	Período de amortização (em anos)
Ns	Velocidade de rotação específica de bombas centrífugas

P	População de consumidores de água
p	Pressão
P_{com}	Potência (motriz) comercial do motor elétrico
P_{el}	Potência elétrica
P_{hid}	Potência hidráulica
P_{inst}	Potência instalada
P_m	Potência do motor (potência motriz)
Q	Vazão
Q_b	Vazão de bombeamento
$Q_{b1/1}$	Vazão de bombeamento no ponto de máximo rendimento
Q_{max}	Vazão máxima de consumo horário de água em 1 dia
q	Consumo per capita de água
R	Reservatório
Re	Número de Reynolds
S	Seção do conduto
t	Intervalo de tempo
t_b	Tempo de bombeamento
T_D	Tarifa de demanda
T_{Fp}	Tarifa de consumo no horário fora de ponta
t_h	Tempo de desaceleração do escoamento
T_p	Tarifa de consumo no horário de ponta
v	Velocidade
V	Volume de água consumido em um dia
V_{ac}	Volume acumulado no reservatório superior
V_B	Volume de Água Bombeado
V_c	Volume da chaminé de equilíbrio
V_i	Volume inicial do reservatório
V_u	Volume útil do reservatório
Y_d	Depleção do nível de água na chaminé desprezando-se as perdas de carga
y_D	Acréscimo (segurança) na altura de depleção da água na chaminé de equilíbrio
Y_D	Depleção do nível de água na chaminé considerando as perdas de carga
Y_e	Elevação do nível de água na chaminé desprezando-se as perdas de carga

Y_E	Elevação do nível de água na chaminé considerando as perdas de carga
y_E	Acréscimo (segurança) na altura de elevação da água na chaminé de equilíbrio
Y_R	Depleção máxima do nível de água no reservatório de chegada da água
Z_d	Parâmetro obtido por meio de uma equação
Z_e	Parâmetro obtido por meio de uma equação
η	Rendimento
η_b	Rendimento da bomba
η_{me}	Rendimento do motor elétrico
η_G	Rendimento global do conjunto elevatório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS E HIPÓTESE	22
2.1	OBJETIVO GERAL	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2.3	HIPÓTESE	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1	HIDRÁULICA PARA SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA E DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO	23
3.2	ALTERNATIVAS PARA A REDUÇÃO DO CUSTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO	33
3.2.1	Gestão energética em sistemas de bombeamento: indicadores do uso de energia elétrica 37	
3.3	TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM LINHAS DE RECALQUE.....	40
3.3.1	Dispositivos de proteção contra transientes hidráulicos.....	41
3.4	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO.....	48
3.4.1	Algoritmos Genéticos (AGs).....	50
3.4.2	Algoritmo <i>Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA)</i>	53
4	METODOLOGIA	58
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	58
4.2	ESTIMATIVA DE CONSUMO DE ÁGUA	60
4.2.1	Horizonte de projeto e crescimento populacional	64
4.3	CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO	67
4.3.1	Seleção dos valores para as combinações dos parâmetros geométricos.....	68
4.4	ESTIMATIVA DO CUSTO COM ENERGIA ELÉTRICA (CUSTO DE OPERAÇÃO) ...	70
4.5	ESTIMATIVA DO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	87
4.6	ESTIMATIVA DO CUSTO DE MANUTENÇÃO E OUTROS CUSTOS	88
4.7	MODELO PARA REGRA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO	91
4.8	INDICADORES.....	95
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	98
5.1	INFORMAÇÕES GERADAS PELO SRC.....	98
5.2	MANUTENÇÃO E VIDA ÚTIL DA BOMBA HIDRÁULICA.....	102
5.3	INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	109
5.3.1	Energia elétrica consumida no mês	109
5.3.2	Consumo Específico de Energia Elétrica (CEE).....	111
5.3.3	Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado (CEEN)	112
5.3.4	Fator de Carga (FC).....	113
5.3.5	Rendimento do conjunto motor e bomba	116

5.4	DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA TRANSIENTES HIDRÁULICOS.....	118
5.5	CUSTO DO CICLO DE VIDA (CCV) E OUTROS INDICADORES	122
5.5.1	Custo de operação	124
5.5.2	Custo de implantação	126
5.5.3	Velocidades	127
5.5.4	Perda de carga	128
5.5.5	Volume do reservatório elevado.....	130
5.5.6	Consumo máximo de água	131
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	132
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
8	APÊNDICE	148
9	ANEXOS.....	158

1 INTRODUÇÃO

Recursos hídricos e energia tem sido tema em evidência nos últimos anos devido a estreita relação que estes elementos mantêm, já que são vários os processos técnicos de geração e aproveitamento de energia que utilizam os recursos hídricos, como por exemplo, as Usinas Hidrelétricas (UHE). Da mesma forma, os processos de captação, tratamento e distribuição de água, consomem energia. Essa relação, muitas vezes denominada de “nexo água-energia” (MARIANI *et al.*, 2016), tem se destacado como uma questão importante para o planejamento e políticas estratégicas em todo o mundo.

Historicamente a sensibilidade econômica às alterações nos recursos hídricos era considerada baixa em muitos países, ou pouco conhecida, devido à disponibilidade de água ser considerada elevada. No entanto, com o crescimento populacional acelerado e a crescente conscientização sobre as mudanças no ciclo climático e da água, houve a necessidade de integrar o planejamento de sistemas de água e energia (SIDDIQI e ANADON, 2011).

No Brasil, um exemplo expressivo da influência dos recursos hídricos na economia de uma região ocorreu na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), onde o Sistema Cantareira (SC), um dos maiores sistemas produtores de água do mundo (SORIANO *et al.*, 2016), enfrentou um período de forte seca entre os anos de 2013 e 2014, o que comprometeu não só o atendimento de 9 milhões de pessoas na RMSP, as quais foram submetidas a uma política intensa de racionamento de água, como também de bacias a jusante (BILLERBECK e MELLO JUNIOR, 2018). Frederice e Brandão (2016) citam a grande dependência das vazões regularizadas pelo SC em termos de população e economia por parte das duas maiores regiões do estado de São Paulo (SP). De acordo com Soriano *et al.* (2016), em situações de crise hídrica, um número expressivo de pessoas é afetado por meio do aumento dos custos de alimentos e bens que dependem de água em seus processos produtivos e, portanto, a escassez de água, pode criar um desastre.

De acordo com Mariani *et al.* (2016), a demanda por água e energia irá crescer muito nas próximas décadas. Devido ao crescimento e desenvolvimento econômico da população, além de mudanças culturais, climáticas e tecnológicas.

No setor elétrico brasileiro, tendo em vista os impasses para a geração de energia elétrica e o crescente consumo, entrou em vigor no ano de 2015 o sistema de bandeiras tarifárias

(BRASIL, 2019), que modifica a tarifa da energia elétrica de acordo com as fontes que estão sendo utilizadas para geração de energia.

Essa mudança no regime de cobrança pelo uso da energia elétrica, dentre outros setores, impactou as Despesas de Exploração (DEX) das concessionárias de água e esgoto, resultando em aumento do percentual da participação das despesas com energia elétrica na DEX, que em 2014, foi de 11,24 % e no ano de 2015 (ano de início do sistema de bandeiras), subiu para 15,61%, representando aumento de 4,37% (BRASIL, 2016; 2017). Entre os anos de 2013 e 2014, antes do sistema de bandeiras, esse crescimento foi de apenas 0,38 % (BRASIL, 2015; 2016). Apesar do aumento nas despesas com energia elétrica, entre os anos de 2014 e 2015, foi registrada redução do kWh consumido. Em 2014, o consumo foi de 11,57 bilhões de kWh, 5,26% acima do consumo de energia elétrica no ano de 2015, que foi de 10,96 bilhões de kWh (BRASIL, 2016; 2017).

No ano de 2018, foi registrado consumo de 11,53 bilhões de kWh, o que resultou em participação nas despesas com energia elétrica na DEX de 14,48%. O custo com energia elétrica neste ano foi de R\$ 6,18 bilhões (BRASIL, 2020).

Com o crescimento populacional, além da elevação do consumo/custo com energia elétrica para operar os sistemas de saneamento, há também os custos necessários para implantação de novos sistemas e/ou ampliação de sistemas existentes, custos de manutenção, custos ambientais, custos de mão de obra, entre outros. Estes custos são conhecidos como Custos de Ciclo de Vida (CCV). Tais custos no Brasil, constantemente representam montantes elevados o suficiente para inviabilizar a plena implantação de infraestrutura de saneamento nas cidades, criando uma situação que vai de encontro ao Art.2º da lei nº 11.445/2007 (alterada pela lei nº 14.026/2020), que estabelece a universalização do acesso como princípio fundamental para a prestação dos serviços públicos de saneamento básico (BRASIL, 2020).

Diante do desafio de se implantar obras de saneamento a custos cada vez menores, as ações de eficiência energética têm se mostrado um elemento positivo para essa questão, já que favorecem redução de custos com energia elétrica, especialmente em sistemas de bombeamento que, de acordo com Gomes (2009a) são responsáveis por 90% da energia consumida em SAAs, e Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES).

Para Capelli (2013), a eficiência energética é uma filosofia de trabalho que busca otimizar o uso da energia elétrica, se valendo de orientações, direcionamentos, ações e controle

dos recursos humanos, materiais e econômicos, reduzindo os índices globais e específicos da quantidade de energia necessária à obtenção do mesmo resultado ou produto.

A eficiência energética aplicada aos SAAs, pode diminuir significativamente o CCV do sistema, já que, para Gomes (2009a), em todo o mundo, aproximadamente 25% da energia elétrica consumidas em SAAs e SES são devido à ineficiência energética.

O uso de métodos de otimização vem permitindo o avanço de estudos ligados à eficiência energética no saneamento. Dentre os métodos probabilísticos de otimização destaca-se um de busca global, realizada por meio da evolução de população de soluções (COSTA *et al.* 2010). Esse método, que é um dos principais ramos da computação evolucionária é o Algoritmo Genético (AG).

Os AGs são uteis em problemas de otimização representados por única função objetivo, ou por várias. No primeiro caso utiliza-se o AG mono-objetivo. Para o segundo caso, no qual haverá múltiplos objetivos conflitantes, utiliza-se o AG multi-objetivo (CHANG *et al.*, 2010).

Neste estudo foi desenvolvida metodologia para otimização da regra de operação e avaliação do CCV de sistema de bombeamento acionado por chave boia (velocidade rotacional constante), utilizando como ferramenta de otimização, o *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA), que tem como base o AG convencional e foi desenvolvido por Duan *et al.* (1992), inicialmente, para a calibração de modelos hidrológicos.

2 OBJETIVOS E HIPÓTESE

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver metodologia para otimizar regra de operação e avaliar Custo do Ciclo de Vida (CCV) de sistemas de bombeamento de água

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Gerar informações para análise de sistema de bombeamento;
- Analisar, por meio de grupo de indicadores de eficiência energética, o aproveitamento energético das regras de operação otimizadas com a metodologia desenvolvida;
- Determinar valores de referência para indicadores que possam nortear o dimensionamento e análise de projetos de sistemas de bombeamento de água.

2.3 HIPÓTESE

O algoritmo SCE-UA, tendo como base o AG, é ferramenta útil para otimizar operação e avaliar custo do ciclo de vida de sistema de bombeamento de água acionado por chave boia (velocidade rotacional constante).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A implantação de sistema de bombeamento de água necessita, inicialmente, de estudos de viabilidade econômica. Para o estudo econômico, é preciso estimar o custo inicial de aquisição dos equipamentos e infraestrutura, custo de operação, custo de manutenção e outros custos, tais como o ambiental e de descomissionamento, se necessário. Todos esses custos devem ser previstos para o horizonte de projeto do sistema. Por este motivo, o conjunto de custos do sistema de bombeamento de água é denominado Custo do Ciclo de Vida (CCV).

Neste item serão apresentados conceitos importantes sobre sistemas de bombeamento de água e seus componentes, formas de redução dos custos de energia elétrica (redução o custo operacional) e ferramentas de otimização da operação do sistema que podem minimizar o custo do ciclo de vida. As estimativas do CCV propriamente ditas serão apresentadas na metodologia do trabalho, para melhor compreensão.

3.1 HIDRÁULICA PARA SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA E DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO

As bombas, de acordo com Gomes (2009a), são dispositivos construídos fornecerem energia ao fluido. A energia mecânica fornecida à bomba pode ser proveniente de qualquer tipo de fonte (motor elétrico, motor a diesel, energia humana, animal etc.). Em sistemas públicos de abastecimento de água (Figura 3.1), são utilizados em larga escala os motores elétricos como fonte de trabalho mecânico para as bombas hidráulicas.

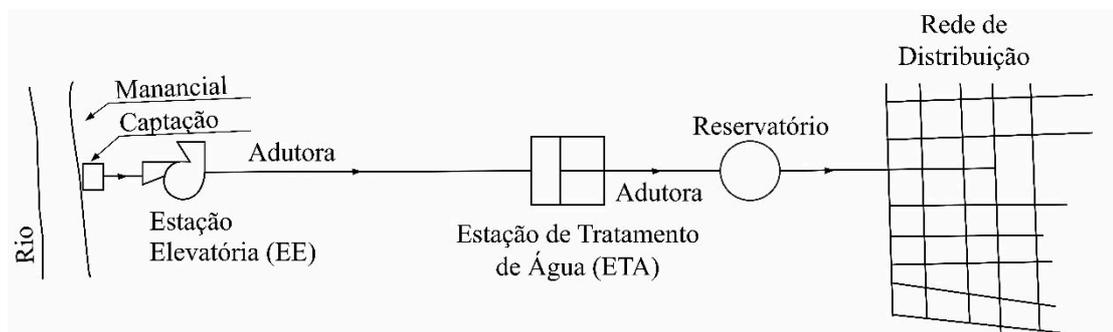


Figura 3.1 – Exemplo de posicionamento da estação de bombeamento (estação elevatória) no sistema de abastecimento de água.

Fonte: Tsutiya, 2006a, p.5.

De acordo com Çengel e Cimbala (2007) as bombas são classificadas como máquinas de deslocamento positivo e máquinas dinâmicas, de acordo com o modo como transformam a

energia mecânica em energia hidráulica e com o recurso para ceder essa energia ao líquido, aumentando a sua pressão e/ou velocidade.

Nas bombas dinâmicas, o fluido é posto em movimento a uma determinada velocidade (energia cinética) que, posteriormente passa a diminuir, o que permite ao fluido adquirir pressão (ocorreu uma conversão de energia cinética em energia de pressão) e vencer as resistências. A dependência funcional entre o volume de fluido Admitido e a pressão, é uma característica das bombas hidrodinâmicas. As bombas centrífugas, também denominadas bombas de hélice, são exemplos de bombas hidrodinâmicas (FIALHO, 2006).

Tsutiya e Além Sobrinho (2011) citam que uma bomba centrífuga é composta fundamentalmente de duas partes: o rotor (Figura 3.2) e a carcaça (Figura 3.3).

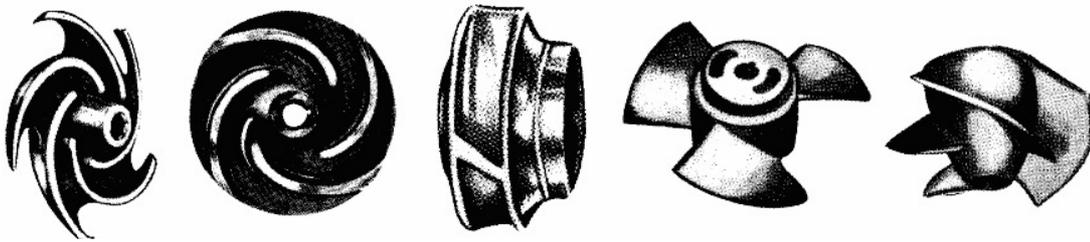


Figura 3.2 - Tipos de rotores utilizados de bombas centrífugas.
Fonte: Motta, 1982, p.57.

As pás do rotor impulsionam o líquido em direção à carcaça, gerando nesse líquido aumento de pressão e velocidade. A carcaça (Figura 3.3), que na maioria das vezes apresenta um formato de espiral (voluta), tem como principal finalidade, receber o líquido proveniente do rotor, transformando parte da energia de velocidade (energia cinética) desse líquido, em energia potencial de pressão (TSUTIYA e ALÉM SOBRINHO, 2011).

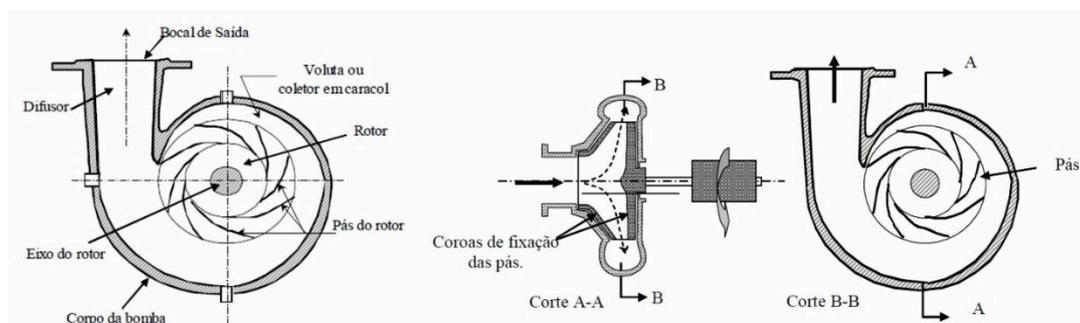


Figura 3.3 - Cortes esquemáticos de uma bomba centrífuga, onde pode ser verificado o posicionamento do rotor em relação à carcaça da bomba, que apresenta formato espiral.
Fonte: Máquinas Hidráulicas - Bombas, 2011.

De acordo com Macintyre (2015), o funcionamento de uma bomba ocorre devido às forças que as pás do rotor da bomba imprimem às partículas líquidas, fazendo com que adquiram trajetórias do centro para a periferia, gerando uma rarefação na entrada do rotor e da própria voluta da bomba. Observando a Figura 3.4, tem-se que o líquido, pela ação das pás recebe energia na forma de pressão e de velocidade. Chama-se altura útil de elevação (H_u) a energia ganha pelo líquido, por unidade de seu peso, ao longo do seu percurso no interior da bomba, desde o bocal de entrada (índice 0), até a boca de saída (índice 3). Por meio dessa energia, o líquido se desloca entre duas cotas, vencendo as resistências passivas ao longo da tubulação, e sai da tubulação de recalque com a energia cinética $v_4^2/2g$; “i” é o desnível do bocal de saída da bomba ao centro da mesma, conforme observado na Figura 3.4.

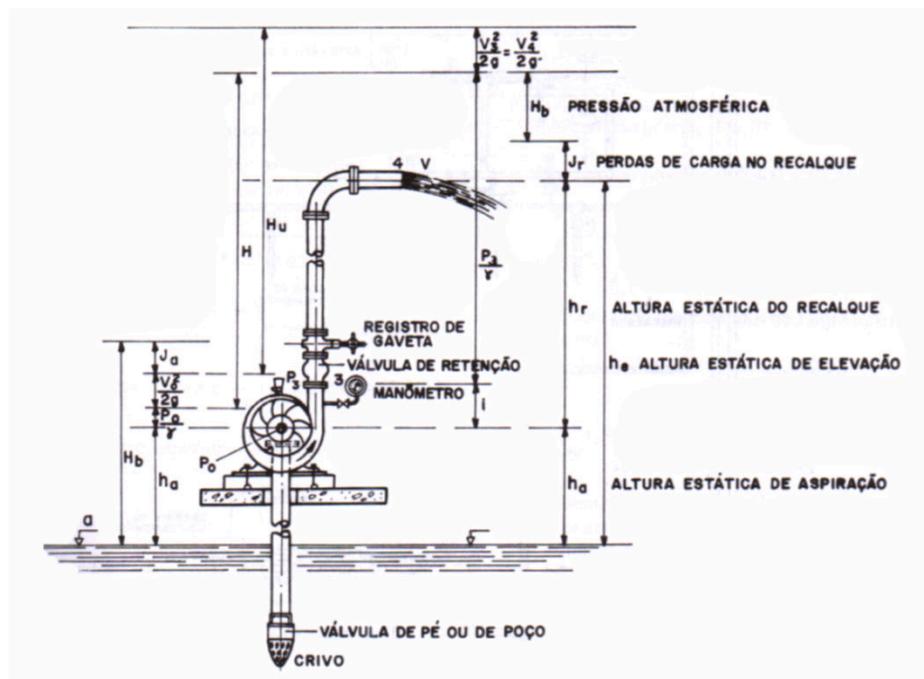


Figura 3.4 - Instalação típica de uma bomba centrífuga.

Fonte: Macintyre, 2015, p.29.

Denomina-se altura manométrica de elevação (H_m) o aumento da energia de pressão no líquido desde a entrada até a saída da bomba. Pode ser medida utilizando-se manômetro (p_3/γ) e vacuômetro (p_0/γ) quando a unidade está em funcionamento. Com os valores medidos, utiliza-se a equação (1).

$$H_m = \frac{p_3}{\gamma} + i - \frac{p_0}{\gamma} \quad (1)$$

Para selecionar a bomba mais apropriada para transportar determinada vazão em um sistema de tubulações, é preciso que o ponto de interseção entre a curva da bomba e a curva do sistema de tubulações, resulte no ponto de operação solicitado pelo projetista (Figura 3.5).

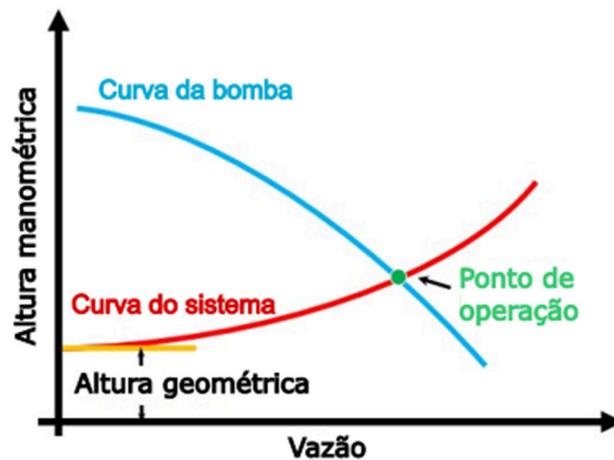


Figura 3.5 – Ponto de operação de um sistema de bombeamento.
Fonte: Xie et. al (2017).

No cálculo do valor de H_m , pode ser utilizada a equação da conservação de energia na tubulação de sucção e na tubulação de recalque e, de acordo com o observado na Figura 3.4, tem-se, para H_m :

$$H_m = h_a + h_r + J_a + J_r + \frac{v_0^2}{2g} \quad (2)$$

Onde H_m é a altura manométrica, em m; h_a é a altura geométrica de aspiração, em m; h_r geométrica de recalque, em m; J_a é a perda de carga na aspiração, em m; J_r é a perda de carga no recalque, em m; e $v_0^2/2g$ é a energia cinética, em m.

Neste caso, supondo que a pressão atmosférica H_b seja a mesma em “a” e em “4”.
Fazendo-se:

$$h_a + h_r = h_e = \text{desnível entre “4” e “a”} \quad (3)$$

$$J_a + J_r = \sum J = \text{soma das perdas de carga} \quad (4)$$

Tem-se:

$$H_m = h_e + \sum J + \frac{v_0^2}{2g} \quad (5)$$

Onde H_m é a altura manométrica, em m; h_e é a altura estática de elevação ou altura geométrica, em m; J é a perda de carga e $v_0^2/2g$ é a energia cinética, em m.

Para a determinação da curva do sistema, é necessário a determinação das perdas de cargas hidráulica, que em uma tubulação são divididas em perdas de carga lineares (ou distribuídas), que são aquelas que ocorrem ao longo da canalização retilínea, e perdas de carga singulares (ou localizadas), sendo aquelas que ocorrem em curvas, reduções, ampliações, válvulas e outras peças e conexões da canalização.

Existe uma considerável variedade de fórmulas que podem ser utilizadas para o cálculo das perdas lineares, sendo que a Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 12214/1992 que fixa as condições exigíveis para a elaboração de projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público, recomenda para o cálculo desse tipo de perda de carga, o disposto na NBR 12215, que na versão de 1991, recomenda o uso preferencialmente da equação (6) conhecida como fórmula de Darcy-Weisbach ou fórmula universal (ABNT 1992c; ABNT 1991):

$$J_d = \frac{fLv^2}{D2g} \quad (6)$$

Nesta formula, J_d é a perda de carga distribuída em metros, f é o coeficiente de atrito (adimensional), L é comprimento da tubulação em metros, v é a velocidade do escoamento em metros por segundo, D é o diâmetro da tubulação em metros e g é a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$).

O coeficiente f pode ser determinado pela equação (7), conhecida como fórmula de Colebrook (ELETROBRAS, 2005):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (7)$$

Sendo f o fator de atrito (adimensional), D o diâmetro da tubulação em metros; ε a rugosidade absoluta da parede interna da tubulação em metros e Re o número de Reynolds (adimensional).

A perda de carga também pode ser determinada pela equação (8) de Hazen-Williams, fórmula empírica que pode ser aplicada satisfatoriamente para água em qualquer tipo de conduto e material. Os seus limites de aplicação são os mais largos: diâmetro de 50 a 3500 mm e velocidade de até 3 m/s, ou seja, praticamente todos os casos do dia a dia que aí se enquadram (AZEVEDO NETTO, *et al.* 1998).

$$J_d = \frac{10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad (8)$$

Onde J_d é a perda de carga, em m; Q é a vazão transportada, em m^3/s ; L é o comprimento da tubulação, em m; C é o coeficiente de rugosidade de Haze-Williams e D é o diâmetro em m.

As perdas de carga singulares podem ser calculadas de acordo com as recomendações de ABNT (1992c), que orienta o uso da equação (9).

$$J_s = \sum k_s \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

Onde J_s é a perda de carga singular em metros; k_s é o coeficiente de perda de carga singular (adimensional); v é a velocidade média na seção em metros por segundo e g é a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m}^2/\text{s}$).

Os valores para k_s podem ser observados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de k_s para materiais de condutos.

Singularidade	k_s	Singularidade	k_s
Curva de 45° raio curto (cotovelo)	0,4	Registro ângulo aberto	5
Curva de 45° raio longo	0,2	Tê de passagem direta	0,6
Curva de 90° raio curto (cotovelo)	1,5	Tê de saída lateral	1,3
Curva de 90° raio longo	0,25 a 0,40	Tê de saída bilateral	1,8
Crivo	0,75	Válvula de retenção	2,5
Redução gradual	0,15	Válvula de pé	1,75
Ampliação gradual	0,3	Entrada normal em canalização	0,5
Registro de gaveta aberto	0,2	Entrada de borda	1
Registro globo aberto	10	Saída de canalização	1

(Fonte: Macintyre, 2013, p. 656 e p. 664; Azevedo Netto *et al.*, 1998, p.122).

Para a tubulação de aspiração, calculando-se a perda de carga distribuída e a localizada, tem-se a perda de carga total J_a na tubulação, dada por:

$$J_a = J_{d(\text{aspiração})} + J_{s(\text{aspiração})} \quad (10)$$

Para a tubulação de recalque a perda de carga total J_r fica:

$$J_r = J_{d(\text{recalque})} + J_{s(\text{recalque})} \quad (11)$$

Assim, a perda de carga total J utilizada para o cálculo de H_m é:

$$J_t = J_a + J_r \quad (12)$$

Na prática, pode-se dizer que a altura manométrica é a energia total entregue ao líquido pela bomba. Ela representa a quantidade de energia recebida por unidade de peso de fluido bombeado (energia/peso). Para obter a altura manométrica na forma de potência (energia/tempo), multiplica-se a mesma pela vazão gravimétrica γQ (peso/tempo). Desse modo, temos (GOMES, 2009a):

$$P_{hid} = \gamma \cdot Q \cdot H_m \quad (13)$$

Sendo P_{hid} a potência útil (energia/tempo), γ o peso específico do líquido (peso/volume); Q a vazão transportada e H_m a altura manométrica.

A forma de uso mais comum da equação (13) é na forma adaptada, no caso, equação (14), onde se expressa o valor de γ em kgf/m^3 , Q em m^3/s e H_m em metros, gerando dessa forma o valor da potência em cavalos-vapor (cv):

$$P_{hid} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75} \quad (14)$$

A potência útil (P_{hid}) é a potência efetivamente utilizada pelo líquido para o seu escoamento. No entanto, para que a bomba forneça P_{hid} , ela deve receber do eixo do motor a potência motriz ou mecânica (P_m). A conversão de energia mecânica para energia de fluido envolve perdas relacionadas à transformação da energia, por este motivo, $P_{hid} < P_m$. As perdas de energia entre o motor e a bomba são expressas por meio do conceito de rendimento (η).

O rendimento da bomba (η_b), assim como o de qualquer outra máquina, é a razão entre a energia utilizada pela bomba (energia hidráulica) e a energia fornecida a ela (energia motriz). Assim, η_b pode ser obtido pela equação (15):

$$\eta_b = \frac{P_{hid}}{P_m} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75 \cdot P_m} \quad (15)$$

Com isso, a potência motriz pode ser determinada pela equação (16):

$$P_m = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75 \cdot \eta_b} \quad (16)$$

Os motores podem ter seu rendimento determinado pelo conceito já explícito, isto é, divide-se a energia utilizada pela energia fornecida para a máquina, assim:

$$\eta_{me} = \frac{P_m}{P_{el}} \quad (17)$$

Determina-se o rendimento global η_G de um conjunto motor e bomba pelo produto dos rendimentos do motor (η_{me}) e da bomba (η_b):

$$\eta_G = \eta_b \cdot \eta_{me} \quad (18)$$

Com isso, η_G pode ser explicitado pela equação (19):

$$\eta_G = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{P_{el}} \quad (19)$$

A potência (P_{el}) requerida da rede elétrica para alimentar o sistema de bombeamento, pode ser obtida pela equação (20).

$$P_{el} = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H_m}{\eta_G} \quad (20)$$

Sendo P_{el} a potência requerida da rede elétrica em kW, Q a vazão em m^3/s , H_m a altura manométrica em m.c.a e η_G o rendimento global do conjunto motor e bomba.

Na Figura 3.6 pode-se analisar o balanço de energia simplificado em um conjunto motor e bomba. O conhecimento desse tipo de balanço contribui para a identificação das perdas que reduzem a eficiência do sistema, bem como fornece auxílio para a tomada de decisões relacionadas com o estabelecimento de melhorias.

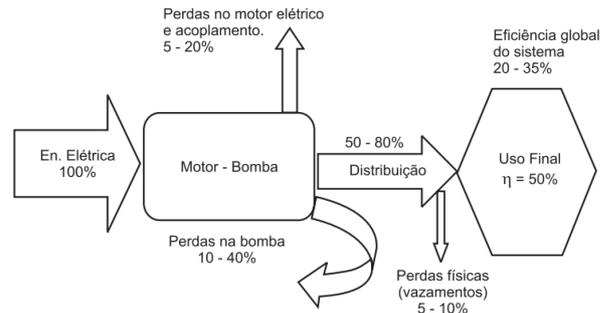


Figura 3.6 - Diagrama de balanço de energia com as perdas do sistema.
Fonte: Monachesi e Monteiro, não datado, p.15.

Matincyre (2015) cita que o valor de η_G pode variar de 30 a 80%, conforme o tipo, qualidade da bomba e as condições de Q e H_m nas quais ela opera. Nos catálogos técnicos dos fabricantes de bombas, podem ser encontrados os valores para η_G .

Tsutiya (2006a) cita que os aspectos econômico-financeiros devem ser levados em consideração na determinação do diâmetro da linha de recalque, sendo que deve ser escolhido o diâmetro que conduz ao mínimo custo de implantação, de operação e manutenção do sistema elevatório. Por tanto, a escolha final do diâmetro de recalque é feita após cotejo técnico-econômico, para diferentes valores do diâmetro da tubulação, considerando os custos de aquisição e assentamento de tubos, peças e aparelhos, aquisição do conjunto motor e bomba adequado para cada valor do diâmetro, operação, manutenção e consumo de energia e amortização de juros.

Na Figura 3.7 pode ser observada a representação gráfica dos custos de obtenção, operação/manutenção e custo total de um sistema de bombeamento.

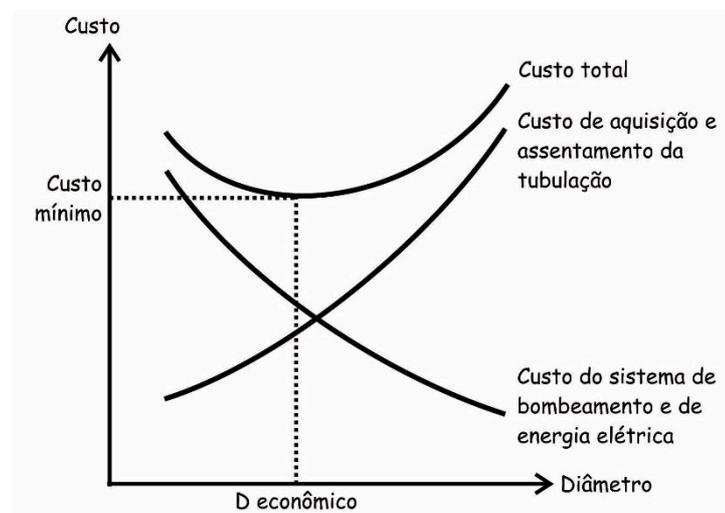


Figura 3.7 - Determinação do diâmetro econômico
Fonte: Adaptado de Tsutiya, 2006a, p.46.

Gomes (2009b) propõe que para a obtenção do custo total do sistema, onde são somados os custos de investimento, que são classificados como custos fixos, com os custos de operação, que são classificados como custos variáveis, devido às taxas de juros e inflação a que estão sujeitos, um destes custos deve ser convertido na mesma modalidade do outro, isto é, os custos fixos devem ser convertidos em custos variáveis, ou vice-versa.

Se o custo anual para operar um sistema de bombeamento daqui à 20 anos for estimado em R\$ 4.000.000,00, este valor é o valor final (VF). O valor presente (VP) necessário se ter em caixa neste momento para resultar em valor final de R\$ 4.000.000,00 em 20 anos pode ser obtido pela equação (21).

$$VP = VF \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^k} \right] \quad (21)$$

Onde VP é o valor presente, VF é o valor final, i é a taxa de juros anual e k é o ano estimado.

Em teoria, é possível escolher qualquer diâmetro para uma linha de recalque. Para um diâmetro elevado de recalque, as perdas de carga serão menores e a potência do conjunto elevatório será reduzida, tornando-as mais baratas, porém, o custo da linha de recalque será elevado. Por outro lado, caso o diâmetro seja pequeno, o que resultaria em menor custo com linha de recalque, o conjunto elevatório seria dispendioso, consumindo mais energia elétrica.

De acordo com Gomes (2009a) existe um diâmetro conveniente para o qual o custo total das instalações é um mínimo, e uma aproximação deste diâmetro pode ser obtido pela fórmula de Bresse, que é aplicável às instalações de funcionamento contínuo. A fórmula de Bresse é representada pela equação (22).

$$D = k \cdot \sqrt{Q_b} \quad (22)$$

Onde D é o diâmetro da tubulação de recalque, em m; k é a constante de Bresse (adimensional) e Q_b é a vazão a ser bombeada e transportada pela tubulação, em m^3/s .

Para um número específico de horas de funcionamento do sistema de bombeamento, o diâmetro de recalque pode ser determinado pela equação (23).

$$D = 1,3 \cdot \left(\frac{n}{24} \right)^{0,25} \cdot \sqrt{Q} \quad (23)$$

Onde D é o diâmetro da tubulação de recalque em m, n é o número de horas diárias de funcionamento do sistema de bombeamento e Q_b é a vazão de bombeamento, em m^3/s .

Verifica-se, por tanto, que as imposições econômicas são levadas em consideração no dimensionamento de sistemas de bombeamento. Os valores para k adotados no Brasil vão de 0,9 a 1,4, no entanto, o valor desse coeficiente na fórmula de Bresse é consequência dos preços da eletricidade, dos materiais e das máquinas empregadas nas instalações, variando por tanto, com o tempo e com a região considerada (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998). É importante ressaltar ainda, que o diâmetro, em geral, deve ser calculado mediante análise de custo-benefício, sendo que as equações 22 e 23 são aproximações que devem ser usadas para início de análise.

3.2 ALTERNATIVAS PARA A REDUÇÃO DO CUSTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

A maior parte das metodologias que envolvem a redução do custo com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água, está relacionada às seguintes ações: conhecimento das tarifas de energia elétrica praticadas na região, redução de potência dos equipamentos, modificação das condições operacionais, automação do sistema de bombeamento e geração de energia elétrica.

A partir dessas ações, Tsutiya (2006a) classifica quatro alternativas para a redução do custo com energia elétrica em sistemas de bombeamento, são eles:

- Redução do custo pela diminuição do consumo de energia elétrica;
- Redução do custo pela alteração do sistema operacional;
- Redução do custo pela automação do sistema de abastecimento de água;
- Redução do custo pela geração de energia elétrica.

A redução do custo sem investimentos é uma ação que não depende de intervenções em equipamentos e/ou instalações, pois podem ser realizadas monitorando-se os dados das concessionárias de energia elétrica e verificando a ocorrência de alguma anormalidade, tal como desvios de consumo e de demanda, operações indevidas e erros de leitura. Nesses casos, entra-se em contato com a concessionária de energia elétrica para que seja tomada medida mais cabível (TSUTIYA, 2006a).

Como medidas a serem adotadas, destaca-se a verificação da classe de consumo, pois no caso de unidades consumidoras classificadas como de saneamento, pode ser obtido desconto na tarifa (BRASIL, 2013). Outra medida é a adequação da demanda contratada e registrada, para que seja evitado o pagamento por demanda não utilizada ou demanda de ultrapassagem.

Também pode ser solicitada, junto à concessionária de energia, alteração da modalidade tarifária para outra que resulte em economia ao consumidor. Steffens *et al.* (2019) simularam em uma estação de bombeamento de água, redução da tarifa de demanda contratada de 2.150 kW para 1.750 kW no horário de ponta. Como resultado, obtiveram economia simulada, acima de R\$ 200.000 anuais.

Além da modificação tarifária, a desativação da ligação pode ser realizada nos casos em que não esteja sendo utilizada energia.

Maior atenção deve ser dada, também, a erros de leitura de equipamentos de medição e análise de qualidade de energia (MELLO *et al.*, 2016). Esses erros podem ser detectados comparando os dados registrados no equipamento com as contas de energia elétrica. Qualquer tipo de erro, seja nos dados de energia ativa, reativa, demanda, ou até mesmo na data da leitura, podem gerar custos irreparáveis, e quando for o caso, é possível amenizar os custos por meio de negociações com os fornecedores de energia elétrica, visando redução tarifária e operações emergenciais.

Outra ação bastante utilizada trata de investimentos relativamente baixos em equipamentos e instalações, se comparados à redução obtida no custo com energia elétrica. Normalmente os investimentos são realizados após estudos de viabilidade.

A redução do custo com investimento é normalmente utilizada quando o fator de potência ($\cos\phi$) está baixo, quando ocorre uma alteração da tensão de alimentação ou quando se objetiva melhorar o Fator de Carga (FC).

Ferreira *et al.* (2020) em estudos realizados em estações de bombeamento de água concluíram que a elevação do $\cos\phi$ para valores iguais ou superiores a 0,92 nestas estações poderia representar economia de até 11,9% do valor total da despesa com energia elétrica,

Esses baixos valores de $\cos\phi$, ocorrem com certa frequência e causa mais problemas do que apenas o desperdício de energia elétrica. Os principais motivos são níveis de tensão acima da nominal, grande quantidade de motores de pequena potência, além de motores e transformadores operando em vazio, ou, de acordo com Oliveira Filho *et al.* (2010), superdimensionados. Para o caso de motor superdimensionado, Capelli (2013) cita em um

exemplo que um motor de 50 cv trabalhando a 100% de carga, tem $\text{Cos}\phi$ de até 0,85, no entanto, quando se reduz a carga para 40% o $\text{Cos}\phi$ cai para 0,74. Diminuindo para 20%, o $\text{Cos}\phi$ fica abaixo de 0,6. De acordo com BRASIL (2010a), o $\text{Cos}\phi$ capacitivo ou indutivo deve ser de pelo menos 0,92 para grupos consumidores A e B de energia elétrica, determinados pela ANEEL.

Para a correção do $\text{Cos}\phi$, são feitos investimentos em bancos de capacitores (LOPES *et al.*, 2020), que operam como geradores de corrente reativa, podendo suprir as instalações elétricas com energia reativa contínua, durante 24 horas por dia (TSUTIYA, 2006a).

A diminuição do consumo de energia elétrica é outra importante ação para a redução de custo. Para realizar esta ação, pode-se diminuir a altura manométrica (H_m) do sistema, diminuir a vazão ou elevar a eficiência dos CMBs.

A redução de H_m pode ser obtida diminuindo-se a altura geométrica (H_g)¹ ou reduzindo-se a perda de carga total (J_t) no sistema. Martim *et al.* (2020) descrevem em um estudo de caso, que a substituição dos tubos de cimento-amianto de uma linha adutora de 2735,1 m por tubos de ferro fundido e PVC DEFOFO com diâmetros maiores, reduziu a perda de carga na linha, resultando em diminuição da altura manométrica de 82 m para 30,64 m, e gerando economia de R\$ 19.281,70 anuais com energia elétrica.

A redução da vazão bombeada como forma de economia com energia elétrica, pode ser obtida pelo controle das perdas de água na rede de distribuição e pelo uso racional.

Para melhorar a eficiência dos CMBs, estes equipamentos devem ser diagnosticados. Motores superdimensionados geralmente não oferecem as melhores condições de $\text{Cos}\phi$ e rendimento (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2010), implicando em custo de demanda maior que o necessário.

De acordo com Kuritza (2017), o rendimento da bomba (η_b) pode ser verificado pela rotação específica da bomba centrífuga (N_s). De acordo com este autor, baixos valores de N_s (menor que 30) resultam em η_b entre 20% e 80%. Para N_s entre 40 e 120, os valores de η_b se mantêm mais estáveis, estando próximos a 80%.

Além da elevação do rendimento, a redução do custo com energia pela alteração operacional do sistema de bombeamento é outra ação a ser considerada (KUREK e OSTFELD, 2013), já que esses sistemas são projetados para alimentar a demanda máxima diária, e na prática muitos operam com bombeamento contínuo sem a real necessidade, mantendo o

¹ Modificar a altura geométrica de um sistema é uma ação difícil de ser realizada, especialmente em sistemas existentes.

reservatório de distribuição constantemente cheio, evitando o desligamento do sistema e a economia de energia.

No início de projeto, o bombeamento contínuo (24 horas ao dia) pode não ser necessário e nesses casos, é possível fazer ajustes operacionais, tais como bombear água fora do horário de ponta elétrico, no qual a tarifa de energia elétrica é mais cara (ZHUAN *et al.*, 2018). Para Tang *et al.*, (2014), nesses casos, podem ser obtidos cerca de 30% de economia nas despesas com energia elétrica. Ferreira *et al.* (2020) estimaram economia de até 44%. De acordo com Brasil (2010b), o horário de ponta é o intervalo composto por 3 (três) 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 dias que constam na resolução normativa Nº 414 de 2010 da ANEEL. Outra alternativa para os casos em que não é possível evitar o bombeamento no horário de ponta, seria diminuir o bombeamento nesse horário e aumentar no horário fora de ponta (intervalo composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta) para valores ligeiramente superiores ao consumo médio diário, como forma de compensação. A segunda alternativa pode ser aplicada também para um bombeamento da vazão total no horário de ponta (que dura em média 3 horas), porém com duração inferior (uma hora, por exemplo).

Disponer de volume de reservação suficientemente capaz de suprir a demanda durante os horários de ponta, também é alternativa (MOREIRA *et al.*, 2019). Não havendo esse volume, seria preciso investir em volumes adicionais de reservação. Com isso, não haveria necessidade de bombeamento no horário de ponta, ou modificação de taxa de bombeamento para reduzir custo.

Pode-se ainda utilizar variadores de rotação nos CMBs (WU, *et al.*, 2011), destacando-se os variadores hidro cinéticos e principalmente, os inversores de frequência que são os dispositivos mais utilizados em estações de bombeamento de água e esgoto (TSUTIYA, 2006a). Vale ressaltar que para o controle de vazão (não necessariamente economia de energia elétrica) são bastante utilizadas no Brasil válvulas instaladas a jusante da bomba e válvula instalada no *by-pass* da bomba, também sendo realizado o controle de vazão por meio do número de bombas em operação no sistema.

Se tratando redução de custo com energia em todo o sistema de abastecimento, também é possível alterar procedimentos operacionais na estação de tratamento de água. Sendo

importante, para tanto, o conhecimento do processo de tratamento, técnicas de operação, informações dos equipamentos eletromecânicos e das instalações elétricas. O estudo desenvolvido por Lopes *et al.* (2020) exemplifica esta questão. A automação do sistema pode facilitar as alterações operacionais. Por este motivo, também é uma ação para a redução do custo.

A automação consiste no uso de computadores e equipamentos na operação da estação de bombeamento de água. Esses equipamentos, podem elevar o custo de instalação do sistema, no entanto, na comparação técnica-econômica entre a sua utilização ou não, opta-se por utilizar, uma vez que o custo com energia elétrica, custo com pessoal e custo com produtos químicos diminuem, além de que a eficiência do processo melhora, bem como a segurança operacional do sistema (TSUTIYA, 2006a).

Outra forma de diminuir o custo é gerando a própria energia elétrica, já que as dificuldades envolvendo a geração de energia elétrica no país, simultaneamente ao aumento da demanda e do consumo, têm solicitado dos engenheiros, soluções com viabilidade e rapidez. De acordo com Tsutiya (2006b), as alternativas viáveis para geração de energia elétrica em sistemas de água e esgoto são: uso de geradores no horário de ponta e o aproveitamento de potenciais energéticos. Para Ramos e Ramos (2009), os sistemas fotovoltaicos para uso de energia solar e sistemas de aproveitamento da energia eólica, associados à hidroenergia, estão se tornando possível fonte de energia sustentável para sistemas de bombeamento com intenso consumo de energia. Na Arábia Saudita, por exemplo, estudos relacionados ao uso da energia eólica para o bombeamento de águas subterrâneas para abastecimento de comunidades que não tinham acesso a rede de energia elétrica, já foram realizados (REHMAN e SAHIN, 2012).

3.2.1 Gestão energética em sistemas de bombeamento: indicadores do uso de energia elétrica

Em primeiro plano, deve-se atentar para o fato de que indicadores de desempenho são resultantes de relações entre dois ou mais parâmetros operacionais dos sistemas de bombeamento. De acordo com REGO *et al.* (2019), indicadores tem grande utilidade, pois relacionam o consumo de energia elétrica, seus custos operacionais e o volume de água bombeado. São eles:

3.2.1.1 Consumo Específico de Energia Elétrica (CEE)

Utilizado para indicar a eficiência no consumo de energia nas estações de recalque de água bruta e tratada, o CEE é um dos indicadores mais comuns aplicados às unidades de bombeamento de água. Este indicador pode ser interpretado como sendo a quantidade média de energia necessária por uma estação de bombeamento para elevar um metro cúbico de água, refletindo desta forma, a eficiência do CMB, unido à eficiência do sistema hidráulico a jusante da bomba. A equação (24) representa matematicamente o CEE.

$$CEE = \frac{C_E}{V_B} \quad (24)$$

Onde C_E é a energia elétrica consumida na unidade de bombeamento, geralmente expressa em kWh, e V_B é o volume de água bombeado pela unidade, expresso normalmente em m^3 . Assim, a unidade do indicador CEE é kWh/ m^3 .

O CEE é útil para acompanhar o desempenho ao longo do tempo, de um único sistema de bombeamento, não sendo eficaz na comparação do desempenho de estações de recalque distintas, sendo esta, sua principal limitação, uma vez que unidades de bombeamento podem recalcar água por configurações hidráulicas e alturas manométricas diferentes, consumindo, obviamente, quantidades diferentes de energia, mesmo sendo iguais os valores de η_G (GOMES, 2009a).

3.2.1.2 Consumo Específico de Energia Normalizado (CEE_N)

Com o objetivo de tornar viável a análise comparativa entre unidades de bombeamento distintas por meio do CEE, a International Water Association (IWA), propôs uma adaptação do indicador, criando assim o CEEN, definido como sendo a quantidade média de energia gasta para uma unidade de bombeamento elevar 1 metro cúbico de água a 100 m de Hm (ALEGRE *et al.*, 2016), conforme mostrado matematicamente na equação (25).

$$CEE_N = \frac{C_E}{V_B \cdot \frac{H_m}{100}} \quad (25)$$

Onde H_m é a altura manométrica, expressa em metros e CEE_N expresso em $kWh/m^3/100m$.

Em um estudo realizado por Bezerra (2009), foi constatado que o CEE_N pode apresentar discrepância nas avaliações de eficiência energética em unidades de bombeamento. Este fator ocorre, por exemplo, nas unidades de bombeamento com rotação variável, nas quais se usam os inversores de frequência.

Quando se reduz a rotação do eixo do motor acoplado à bomba, por meio do inversor de frequência, há uma diminuição da pressão, ou altura manométrica, bem como do volume de água bombeado. Em maior parte dos casos, a diminuição desses parâmetros hidráulicos é bem mais significativa se comparada à redução do consumo de energia elétrica, já que nos conjuntos elevatórios, uma mudança nas condições nominais de operação, bem como as perdas causadas pelo próprio inversor de frequência resulta em queda no rendimento e solicitação de energia da rede, fazendo com que o valor do CEE_N aumente.

3.2.1.3 Fator de Carga (FC)

Expressa a relação entre a capacidade disponível (a quantidade de energia elétrica realmente produzida por uma unidade geradora) e a capacidade teórica (a quantidade de energia elétrica que poderia teoricamente ter sido produzida se a unidade geradora tivesse operado continuamente em plena potência) durante um determinado tempo período (USNRC, 2020)

O FC é um indicador que permite verificar a quantidade de energia elétrica que se utiliza de forma racional. Assim como o $\text{Cos}\phi$, o FC varia entre 0 e 1 (CAPELLI, 2013), e pode ser expresso pela equação (26).

$$FC = \frac{C_E}{D_c \cdot (N^\circ \text{ horas mês})} \quad (26)$$

Onde C_E é a energia elétrica consumida (em kWh), D_c é a demanda em (kW) contratada da concessionária de energia pelo consumidor e N° horas mês varia de acordo com o consumidor, mas representa o número de horas médio em um mês genérico do ano (365/12 meses) x 24 horas, isto é, 730 h (CAPELLI, 2013).

Quanto mais próximo de 1 for o valor de FC, mais racional é o uso da energia elétrica.

3.3 TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM LINHAS DE RECALQUE

Tubulações pressurizadas podem sofrer alterações nas condições de escoamento caracterizadas pela variação de pressão e de velocidade de escoamento do fluido em função do tempo, ocasionando regimes variados. Denomina-se transiente ou transitório hidráulico em um escoamento, o regime variado que ocorre ao longo da passagem de um regime permanente para outro regime permanente.

Tsutiya e Além Sobrinho (2011) citam que os transientes hidráulicos são frequentes em operações de unidades de bombeamento e apresentam variações temporais de carga e vazão, que podem ser resultantes de manobras de válvulas, rotineiras ou não, e desligamento brusco de conjuntos motor e bomba. Esses regimes transitórios alteram o funcionamento da unidade, causando, desde uma perturbação, até rupturas nas instalações (Figura 3.8).



*Figura 3.8 - Rompimento em aqueduto em Porto Rico, ocasionado por transiente hidráulico.
Fonte: Abuiziah, et al. 2013.*

Por gerar ruído semelhante ao choque de um aríete num obstáculo, os transientes hidráulicos também são chamados de “golpes de aríete”. Para esses “golpes”, potencialmente prejudiciais aos componentes do sistema, são instalados equipamentos destinados a proteger as unidades de bombeamento.

A operação de um Sistema de Bombeamento de Água com velocidade constante é caracterizada pelos transientes hidráulicos que ocorrem durante a interrupção do regime permanente de bombeamento, isto é, durante o desligamento do conjunto motor e bomba ou no momento de seu acionamento. Esses transientes podem deformar (KERAMAT *et al*, 2012) e

colapsar a linha de adução, causando prejuízos às concessionárias de abastecimento de água devido ao custo de manutenção e reparos. Apesar de não ser fácil estimar os transientes hidráulicos em um sistema de bombeamento, esse procedimento é essencial aos engenheiros projetistas e construtores por garantir a eficiência econômica global e a segurança nas operações das concessionárias (TRIKI, 2016). Por isso, muitos pesquisadores estudaram o fenômeno do golpe de aríete com diferentes abordagens nas últimas décadas (GAD e MOHAMMED, 2014). A NBR 12215-1/2017, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), recomenda que essa atividade seja realizada com software específico, cuja modelagem matemática se aproxime do sistema hidráulico em estudo e/ou projeto. Também é recomendado que o software abrigue método numérico de análise, como o método das características, métodos das ondas planas, método de diferenças finitas e o método de elementos finitos; e que resolvam as equações de derivadas parciais governantes dos fenômenos transitórios considerando as características físicas da água e das tubulações e dos vínculos estruturais das tubulações com o meio externo (ABNT, 2017). Mesmo com a complexidade do estudo dos transientes hidráulicos, o que só pode ser feito mediante a utilização de certa quantidade de dados de entrada, na NBR 12215-1/2017 da ABNT é enfatizado que a análise de transitórios deve ser efetuada em diferentes etapas do estudo e/ou projeto, como no estudo de concepção, no projeto básico e no projeto executivo. Na etapa inicial de concepção do sistema de bombeamento, em que ainda são poucas as informações do sistema, os métodos analíticos de estimativa dos transientes são recurso conveniente e importante ao engenheiro projetista, por serem métodos que não necessitam de interação computacional, podendo ser calculados com mais facilidade, pois geram resultados explícitos utilizando número menor de dados de entrada. É importante destacar que os métodos analíticos não devem substituir os métodos numéricos, no entanto, podem auxiliar o projetista nas previsões iniciais dos transientes no sistema de bombeamento, contribuindo na tomada de decisão da melhor alternativa de concepção técnica, considerando no custo de implantação do sistema, o dispositivo de proteção, caso se mostre necessário já nesta etapa.

A seguir, são discutidos dispositivos de proteção utilizados nos sistemas de bombeamento de água.

3.3.1 Dispositivos de proteção contra transientes hidráulicos

Para se limitar um transiente hidráulico a um valor admissível, as proteções no sistema de bombeamento são necessárias, sendo que tais proteções podem variar de acordo com a

situação. Elas atenuam a variação da velocidade no fluido e limitam a sobrepressão em relação à subpressão na tubulação.

A ABNT (2017), assim como os autores Tomaz (2010), Macintyre (2013), Chaudhry (2014), e outros, citam diversos dispositivos de proteção contra transientes, tais como válvula de retenção, volante de inércia, by-pass, válvulas de alívio, válvula antecipadora de onda, válvula controladora de onda, válvulas de admissão de ar, chaminé de equilíbrio, tanque de alimentação unidirecional (TAU) e reservatório hidropneumático (RHO).

Para Andrade e Araújo (2015), os dispositivos mais comumente aplicados em sistemas hidráulicos são a chaminé de equilíbrio e o TAU. Em razão do exposto pelos referidos autores, será utilizada neste trabalho e apresentada a seguir a chaminé de equilíbrio.

3.3.1.1 Chaminé de equilíbrio (*standpipe*)

É um reservatório aberto para a atmosfera, e está conectado como uma derivação da adutora e com área superior à da seção da linha de tubos.

O dispositivo intercepta as ondas de pressão na tubulação de adução, operando como um reservatório intermediário com nível de água variável (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Chaminés de equilíbrio.

Fonte (a): www.esalq.usp.br; Fonte(b): portoimagem.wordpress.com.

Em linhas de adução, quando a bomba é desligada, a linha é suprida com vazão pela chaminé de equilíbrio, impedindo a desaceleração rápida da coluna de água e amenizando a depressão transiente, sendo que, no momento em que a bomba é acionada, grande parte da vazão inicial é absorvida pela chaminé, proporcionando aceleração suave da coluna de água.

Macedo (2012) cita que existem diversas configurações de chaminés de equilíbrio, das quais as principais são a chaminé de equilíbrio do tipo simples e de seção constante, chaminés com orifício ou estrangulamento, chaminés descarregadoras, chaminés diferenciais ou Johnson e chaminés com câmaras.

Na Figura 3.10 podem ser observados os tipos de chaminés de equilíbrio.

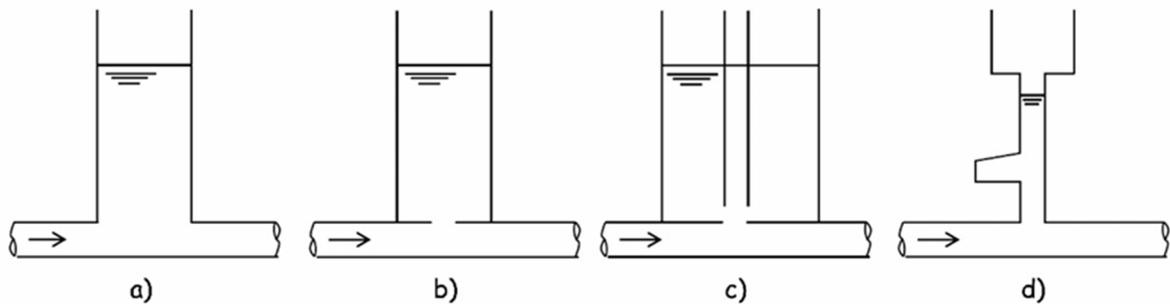


Figura 3.10 - a) chaminé de equilíbrio simples e seção constante, b) chaminé com estrangulamento na base, c) chaminé de equilíbrio diferencial, d) chaminé de equilíbrio com câmaras.

Fonte: Adaptado de Macedo, 2012, p.20, e 21.

Silvestre (1979) cita que o funcionamento eficiente da chaminé de equilíbrio exige:

- Localização, o mais próximo possível da estação elevatória;
- Altura suficiente para evitar transbordamento em qualquer condição de operação ou, alternativamente, dever dispor de vertedor adequado;
- Profundidade suficiente para evitar entrada de ar na tubulação nas condições mais desfavoráveis de nível mínimo de oscilação.

As chaminés de equilíbrio são muito utilizadas sistemas hidrelétricos, pois há no geral, um favorecimento por parte da topografia do terreno. Já em linhas de adução de água, é economicamente difícil implantar a chaminé. Quando instalada adjacente ao reservatório superior, perderá eficiência por estar afastada da unidade de bombeamento (Figura 3.11a). Por outro lado, a implantação da chaminé adjacente às bombas, resultaria em dispositivo com elevada altura, o que será oneroso, e por muitas vezes, inviável economicamente (Figura 3.11b).

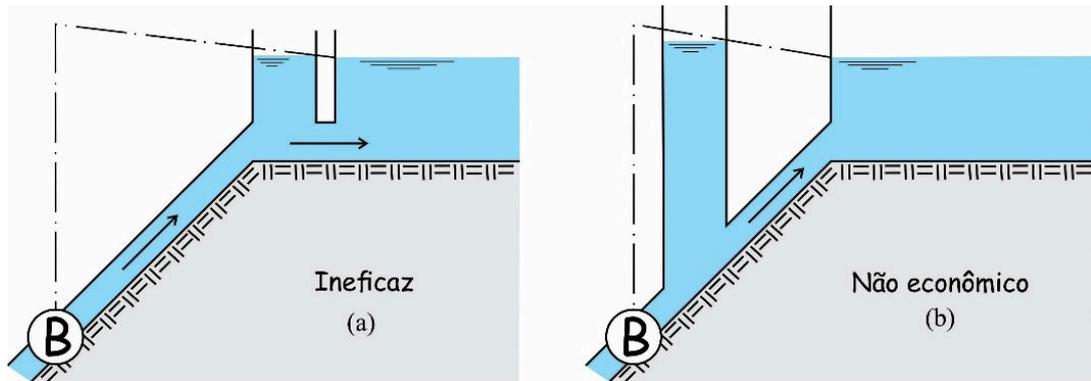


Figura 3.11 - Limites inviáveis de posicionamentos da chaminé de equilíbrio por ineficácia ou elevado custo.

Fonte: Adaptado de Silvestre, 1979, p.228.

Assim, a desvantagem da chaminé de equilíbrio está no fato de que, como o seu nível de água atinge a cota piezométrica de regime permanente no local, sua posição limita-se às cotas elevadas da linha de adução, para que seu custo não seja excessivo. Por outro lado, não pode estar demasiadamente próxima ao reservatório superior, para que não perca sua eficácia.

Na Figura 3.12 podem ser observadas as envoltórias de pressões máximas e mínimas, com e sem chaminé de equilíbrio, em uma linha de adução por bombeamento, após a interrupção do fornecimento de energia elétrica da bomba.

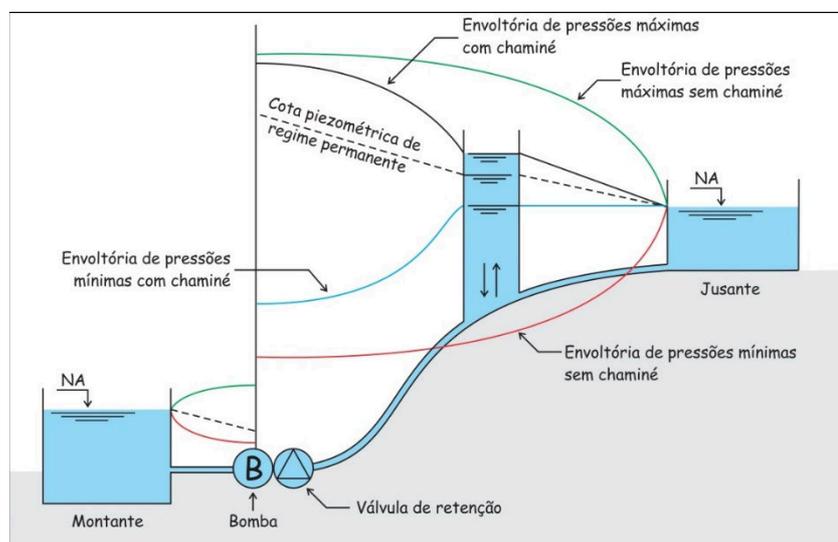


Figura 3.12 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem chaminé de equilíbrio em uma linha de adução por bombeamento, após o desligamento acidental do conjunto motor e bomba.

Fonte: adaptado de Tsutiya e Além Sobrinho, 2011, p.475.

De acordo com Eletrobras (1985), o primeiro procedimento é verificar a necessidade do uso de uma chaminé de equilíbrio no sistema hidráulico. O uso do dispositivo é necessário quando a equação (27) não for atendida.

$$\frac{L}{H_m} \leq 5 \quad (27)$$

Onde L é o comprimento total da linha de adução e H_m é a altura manométrica.

Nos casos em que o comprimento da adutora sobrepor cinco vezes a H_m, haverá a necessidade de se prever uma chaminé de equilíbrio.

Eletrobras (1985) também cita o uso do critério da constante de aceleração da água na tubulação, onde o valor de t_h é determinado pela equação (28). Caso o valor de t_h for interior a 3 s, não haverá necessidade da chaminé de equilíbrio. Existem casos de não se necessitar de chaminé para valores até 6 s para t_h. Acima de 6 s, a instalação da chaminé é obrigatória.

Sendo t_h obtido por:

$$t_h = \frac{vL}{gH_m} \quad (28)$$

Onde t_h é o tempo de desaceleração do escoamento em segundos, L é o comprimento da tubulação, v é a velocidade de escoamento em m/s e H_m é a altura manométrica em m.

Para os casos nos quais a chaminé é obrigatória, podem ser estudados os diversos tipos desse dispositivo para ser implantado. Eletrobras (1985) oferece a opção de dimensionamento de chaminé de equilíbrio do tipo simples e de seção constante (Figura 3.13). Dispositivo este que será adotado nesta pesquisa.

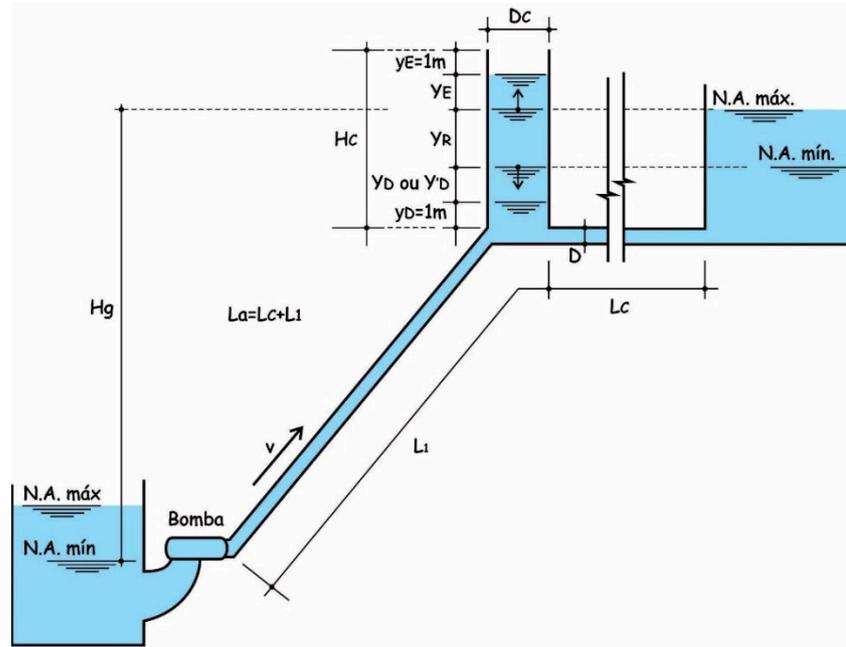


Figura 3.13 - Parâmetros utilizados do cálculo de uma chaminé de equilíbrio do tipo simples e seção constante.

Fonte: Eletrobrás, 1985, p.215.

Para o cálculo desse tipo de chaminé, utiliza-se a equação (29) deduzida por Thoma, que permite determinar a área mínima da seção transversal da chaminé de equilíbrio.

$$A_c \geq \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{L_c \cdot A_t}{(H_g - J_{cr}) \cdot J_{cr}} \quad (29)$$

Onde A_c é a área em m^2 interna mínima da seção transversal da chaminé de equilíbrio, v é a velocidade em m/s da água no interior da linha de adução, L_c é o comprimento da linha de adução entre a chaminé e o reservatório de chegada da água, A_t é a área interna da seção transversal da adutora entre o reservatório de chegada da água e a chaminé, H_g é a altura geométrica do sistema, J_{cr} é a perda de carga total (distribuída - J_d + localizada - J_s) em m na adutora entre o reservatório de chegada da água e a chaminé, e g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$).

A altura da chaminé de equilíbrio é determinada em função da oscilação do nível de água no seu interior. Tal oscilação pode ser calculada pela sequência de cálculo a seguir.

Desprezando-se as perdas de carga J_{cr} da linha de adução, pode-se determinar a elevação Y_e ou depleção Y_d do nível de água, em metros, pela equação (30).

$$Y_e = Y_d = v \cdot \sqrt{\frac{A_t \cdot L_c}{g \cdot A_c}} \quad (30)$$

A elevação do nível de água da chaminé de equilíbrio é contada para cima do nível estático máximo e a depleção, para baixo do nível estático mínimo (ELETROBRAS, 1985).

Sendo consideradas as perdas de carga na linha de adução, tem-se:

$$Y_E = z_e \cdot Y_e \quad (31)$$

Em que:

$$z_e = 1 - \frac{2}{3} \cdot J_R + \frac{1}{9} \cdot J_R^2 \quad (32)$$

Sendo:

$$J_R = \frac{J_{cr}}{Y_e} = \frac{J_{cr}}{Y_d} \quad (33)$$

Onde Y_E é a elevação do nível de água, em m (considerando as perdas de carga), J_R é a perda de carga relativa e J_{cr} é a perda de carga total no sistema adutor entre a chaminé de equilíbrio e o reservatório de descarga da água, com a perda de carga J_d (perda de carga distribuída), por atrito, na tubulação adutora.

O cálculo da depleção Y_D , é realizado com base em duas hipóteses de cálculo, optando-se pela hipótese que gerar o valor mais desfavorável:

1. Depleção consecutiva à elevação máxima, resultante do fechamento total (100%) do dispositivo de fechamento.
2. Depleção resultante da abertura parcial de 50% a 100% do dispositivo de fechamento.

Para a primeira hipótese, utiliza-se a equação (34):

$$Y_D = z_d \cdot Y_d \quad (34)$$

O valor do coeficiente z_d pode ser determinado pela equação (35), obtida por meio de uma curva polinomial ajustada a partir dos valores propostos por Eletrobrás (1985, p.217).

$$z_d = 0,6535 \cdot J_R^2 - 1,3066 \cdot J_R + 0,9625 \quad (35)$$

Para a segunda verificação, o procedimento é análogo ao da primeira:

$$Y'_D = z'_d \cdot Y_d \quad (36)$$

O valor do coeficiente z'_d pode ser determinado pela equação (37), obtida, assim como a equação (35), por meio de uma curva polinomial ajustada a partir dos valores propostos por Eletrobras (1985, p.219²).

$$z'_d = 0,1735 \cdot J_R^2 - 0,3165 \cdot J_R + 0,5044 \quad (37)$$

A altura da chaminé de equilíbrio (H_C) pode ser determinada conforme a seguir:

$$H_C = Y_E + y_E + (Y_D \text{ ou } Y'_D) + y_D + Y_R \quad (38)$$

Onde y_E e y_D são os acréscimos (segurança) nas alturas de elevação e da depleção (usa-se 1 m), Y_R é a depleção máxima do N.A. do reservatório de chegada de água, isto é, a diferença entre o N.A. máximo Normal e o N.A. Mínimo, em m. Para o caso de sistemas de bombeamento em que o nível de água do reservatório de chegada não varie, adota-se $Y_R \approx 0$, pois a variação do N.A. do reservatório é desprezível.

Por fim, o volume da chaminé pode ser determinado por:

$$V_C = A_C \cdot H_C \quad (39)$$

Onde V_C é o volume da chaminé, em m³, A_C é a área da seção interna da chaminé, em m², e H_C é a altura da chaminé, em m.

3.4 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

² Os valores de J_R expostos nesta pesquisa estão representados em Eletrobrás (não datado) de duas formas: como J_R (para tubos lisos) e J'_R (para tubos ásperos), pois o método de dimensionamento proposto é para hidrelétricas. Nesta pesquisa foi realizada uma adaptação para sistemas de bombeamento, na qual as perdas de carga são calculadas pela fórmula de Darcy-Weisbach (fórmula Universal). Assim, na adaptação deste dimensionamento de chaminé para sistemas de bombeamento, não foi estabelecida distinção entre tubos lisos e ásperos, logo, $J_R = J'_R$.

Otimização é uma das ferramentas de aplicação mediata mais importante da atualidade, empregada na resolução dos mais variados problemas nas diversas áreas da engenharia (TELES e GOMES,2010). Consiste basicamente em encontrar valores ótimos ou otimizados dos parâmetros do sistema ou do modelo (SOUZA, 2019). Na Figura 3.14 pode ser observado o fluxograma de um processo de otimização.

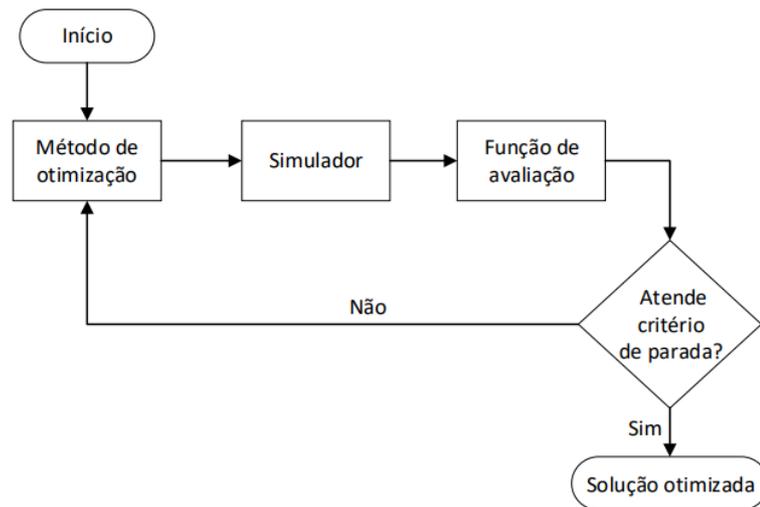


Figura 3.14 – Fluxograma do processo de otimização.

Fonte: Gomes, 2017.

Os métodos usados para a solução de um problema de otimização podem ser, basicamente, determinísticos ou probabilísticos. É considerado método determinístico se for possível prever todos os seus passos conhecendo seu ponto de partida. Em outras palavras, o método determinístico sempre leva à mesma resposta se partir do mesmo ponto inicial (GOMES, 2017). Esses métodos, na maioria das vezes, requerem o uso de pelo menos a primeira derivada da função objetivo em relação às variáveis de projeto.

Os métodos probabilísticos, não empregam o cálculo de derivadas, mas sim atuam diretamente na busca das soluções no espaço viável. Estes métodos, entretanto, exigem grande número de avaliações do valor da função objetivo e das restrições, sendo considerados métodos computacionalmente caros (MEDEIROS e KRIPKA, 2012).

Para Manzi, *et al.* (2018), a evolução computacional tem proporcionado resolução de equações de conservação de massa e energia, em sua maioria não lineares, com velocidade e precisão suficientes para que o problema da modelagem hidráulica deixe de ser barreira. Assim, a aplicação de diversas técnicas metaheurísticas de otimização em variadas etapas do SAA, como a etapa de bombeamento e a de distribuição, tem crescido. Algumas dessas técnicas, que

são inspiradas na natureza, são os Algoritmos Genéticos (AGs), *Simulated Annealing* (SA); *Ant Colony Optimization* (ACO), *Harmony Search* (HS), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Artificial Bee Colony* (ABC), *Flower Pollination Algorithm* (FPA), *League Championship Algorithm* (LCA), *Soccer League Competition* (SLC).

De acordo com Bastos (2004), alguns elementos comumente associados a um problema de otimização são:

- Variáveis de decisão: são aquelas que se alteram durante o processo de otimização, podendo ser contínuas (reais), inteiras ou discretas.
- Restrições: São funções de igualdade ou desigualdade que descrevem situações de projeto consideradas não desejáveis.
- Espaço de busca: é o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado, sendo delimitado pelas funções de restrição.
- Função objetivo ou de avaliação: é a função de uma ou mais variáveis que se quer otimizar, minimizando-a ou maximizando-a. De acordo com Manzi, *et al.* (2018), em problemas relacionados ao SAA, está normalmente ligada ao custo de implantação das tubulações, sujeita a restrições operacionais, como pressões nos nós de abastecimento ou velocidades nos trechos, em um problema típico de otimização não linear e restrito.
- Ponto ótimo: É o ponto formado pelas variáveis de projeto que extremizam a função objetivo e satisfazem as restrições.
- Valor ótimo: É o valor da função objetivo no ponto ótimo.

Dentre os diversos métodos de otimização disponíveis na literatura, a seleção dos mais adequados aos problemas relacionados ao SAA, com avaliação do custo computacional envolvido e do adequado atendimento às restrições físicas, tem recebido atenção do meio acadêmico e das concessionárias de abastecimento, pois são fator estratégico para a universalização do abastecimento de água (MANZI, *et al.* 2018). Dentre os métodos mais utilizados em SAA estão os AGs, cujo princípio de funcionamento, difundido por Goldberg (1989), é baseado na analogia biológica da teoria da evolução e da seleção natural.

3.4.1 Algoritmos Genéticos (AGs)

Os AGs são um método heurístico de computação evolutiva para otimização combinatória. Como toda heurística, esse método não dá garantias sobre a qualidade da solução encontrada, mas usualmente tende a encontrar a solução ótima ou ficar bem próximo dela

(LINDEN, 2012). Seu uso é importante para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos (MABRETTI e ORSI, 2016). A exemplo, pode ser citado o estudo de Kurek e Ostfeld (2013) que realizaram otimização em SAA, considerando como objetivo, a operação da estação de bombeamento, a qualidade da água (concentração de cloro e idade da água) e custo do reservatório de armazenamento.

A computação evolutiva usa técnicas baseadas em biologia evolutiva, tais como recombinação e mutação, seleção natural e hereditariedade (LINDEN, 2012). Assim, os AGs encontram soluções aproximadas em problemas de otimização de busca por meio da seleção de indivíduos mais aptos.

Na Figura 3.15 pode ser observada a configuração genérica de um AG.

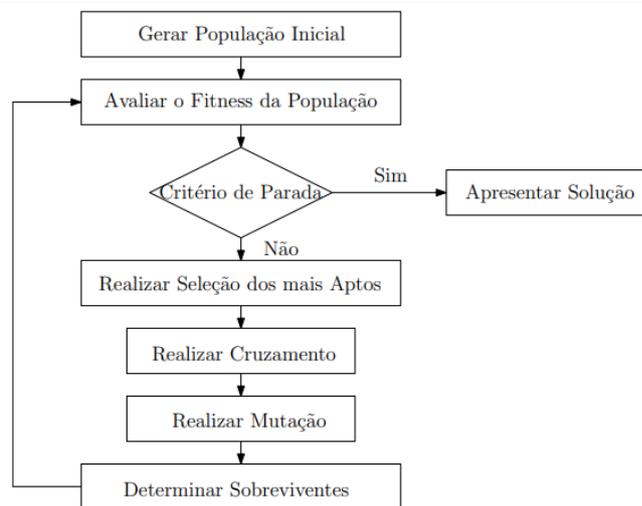


Figura 3.15 - Sequência de um AG clássico.

Fonte: Vitor, 2015, p.40.

Para Ghidaoui *et al.* (2005), os AGs funcionam bem para determinados problemas envolvendo tubulações de água. Devido a isso, nas últimas duas décadas, os AGs foram amplamente utilizados para melhorar a eficiência dos sistemas de distribuição de água quando os métodos tradicionais de otimização se mostraram incapazes de lidar com a complexidade geométrica desses sistemas (MAMBRETTI e ORSI, 2016).

A otimização em si, é, em geral, a busca da melhor solução para um problema, sendo obtida por meio de várias tentativas de soluções. As soluções obtidas nestas primeiras tentativas são utilizadas para tentar encontrar soluções cada vez melhores.

De acordo com Galvão e Valença (1999), técnicas de otimização, são compostas por:

- Um espaço de busca, no qual estão todas as soluções possíveis para o problema.

- Uma função objetivo (algumas vezes chamada de função de aptidão), utilizada para avaliar as soluções geradas, associando a cada uma delas uma nota.

Matematicamente, otimizar uma Função monobjetivo, é obter solução correspondente ao ponto de máximo ou ponto de mínimo desta função.

Ao buscar o ponto de máximo da função $f(x) = x \text{sen}(10\pi x) + 1$ dentro do intervalo $1 \leq x \leq 2$, obtém-se vários pontos que maximizam o valor da função (pontos de máximo), denominados máximos locais que, no entanto, não representam o maior valor possível de ser atingido pela função, denominado máximo global. Esses pontos são denominados “máximos locais”, já que nesses pontos, a função atinge maiores valores do que nos pontos adjacentes (GALVÃO E VALENÇA, 1999).

A melhor solução para este problema ocorre no ponto “máximo global” (Figura 3.16) em que a função possui o valor máximo em todo o intervalo de busca $1 \leq x \leq 2$. Neste problema, o máximo global foi obtido no valor de x igual a 1,85055, para o qual a função assume valor igual a 2,85027 (GALVÃO E VALENÇA, 1999).

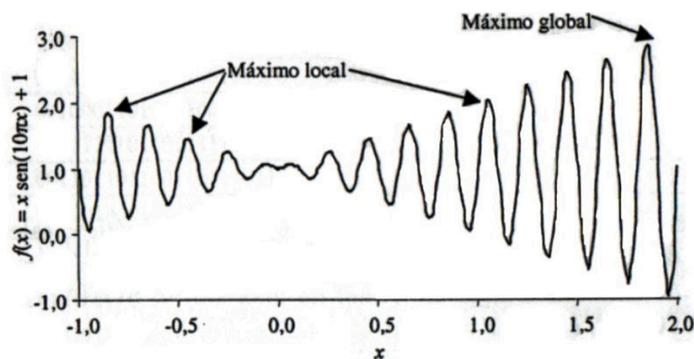


Figura 3.16 - Gráfico da função $f(x) = x \text{sen}(10\pi x) + 1$.
Fonte: Galvão e Valença, 1999, p.100.

Muitas técnicas de otimização não são capazes de obter o ponto de máximo global (ou mínimo global) de uma função contendo vários máximos locais (ou mínimos locais), sendo os AGs, um método importante na solução desse tipo de problema de otimização.

Diante disso, a aplicação dos AGs para a calibragem automática de modelos tem sido muito utilizada. Calibragem automática está essencialmente ligada à obtenção de um conjunto ótimo de parâmetros, de modo que o valor mínimo da função objetivo seja absoluto (ótimo global). A otimização global depende de certas características, relacionadas em geral, com número de parâmetros que se precisa calibrar e com as características da função objetivo.

Nesta pesquisa, será utilizada uma técnica de otimização global cuja base é o AG. Trata-se do “Algoritmo de Evolução de Complexos Misturados da Universidade do Arizona” (*Shuffled Complex Evolution – University of Arizona*), criada por Duan *et al.* (1992) para a calibração de modelos chuva-vazão. O *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) foi utilizado por Kuritza (2017) para a otimização operacional de sistema de bombeamento de água com velocidade de rotação variável por meio da minimização dos custos operacionais. De acordo com o autor, o algoritmo SCE-UA foi capaz de otimizar as variáveis de decisão em todos os cenários avaliados.

3.4.2 Algoritmo *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA)

O SCE-UA é um algoritmo de otimização global baseado em um processo de evolução desenvolvido por Duan *et al.* (1992). O SCE-UA é baseado em uma síntese de quatro conceitos: a combinação de abordagens determinísticas e probabilísticas; a evolução sistemática de um complexo de pontos que abrangem o espaço de parâmetros, na direção da melhoria global; a evolução competitiva e a mistura dos complexos (LEE e KANG, 2016).

A síntese desses elementos torna o SCE-UA eficaz e robusto, e também flexível e eficiente (Duan *et al.* 1994). O SCE-UA utiliza uma população composta por pontos de amostra. A população é dividida em vários complexos, cada um dos quais é permitido evoluir independentemente dos outros. Após um especificado número de gerações, os complexos são forçados a se misturar, formando novos complexos. Este procedimento aumenta a capacidade de sobrevivência compartilhando as informações que são obtidas independentemente por cada complexo (Duan *et al.* 1993).

De acordo com Galvão e Valença (1999), para a execução do algoritmo SCE-UA, observado na Figura 3.17, deve-se executar os seguintes passos:

1. Definir o número de complexos $p \geq 1$ bem como o número de pontos de cada complexo $m \geq n+1$, onde n é o número de parâmetros do modelo a serem otimizados. Calcular o tamanho da população ou amostra $s=p.m$. O valor de $m=2n+1$ é aqui recomendado inicialmente, porém, deve ser ajustado de acordo com o problema de otimização.
2. Selecionar de forma aleatória, s pontos (x_1, \dots, x_s) no espaço da pesquisa dos parâmetros U contidos em R^N . Para essa seleção, a distribuição uniforme pode ser utilizada. Cada conjunto de valores dos parâmetros calibráveis é um ponto do complexo. Calcular o valor da função objetivo f_i em cada ponto x_i .

3. Os s pontos devem ser ordenados de forma decrescente do valor da função objetivo f_i . Os pontos devem ser guardados em uma matriz $D = \{x_i, f_i, i=1, \dots, s\}$, de tal forma que $i=1$ represente o melhor ponto ou de menor valor da função objetivo.
4. A matriz D deve ser dividida em p complexos A^1, \dots, A^p , sendo que cada complexo terá m pontos, de maneira que $A^k = \{x_j^k, f_j^k / x_j^k = x_{k+p(j-1)}, j=1, \dots, m\}$.
5. Cada complexo $A^k, k=1, \dots, p$ deve ser evoluído de acordo com o algoritmo de evolução competitiva, apresentado a seguir.
6. Os complexos resultantes da evolução devem ser misturados, substituindo A^1, \dots, A^p em D , de tal forma que $D = \{A^k, k=1, \dots, p\}$. Arranjar D em ordem crescente do valor da função objetivo.
7. Verificar o critério de convergência. Quando o critério for satisfeito, parar. Em caso contrário, retornar para o passo 4.

No algoritmo de evolução competitiva, requerido no passo 5, observado na Figura 3.18, deve-se proceder da seguinte forma:

1. Realizar a seleção de q (número de sub complexos), β (parâmetro que define como cada complexo será evoluído ou melhorado) e α (determina como cada sub complexo será melhorado), de forma que $2 \leq q \leq m$, $\alpha \geq 1$ e $\beta \geq 1$. Os valores de $q=n+1$, $\alpha=7-P$, $P=4$ e $\beta=2n+1$ são aqui recomendados.
2. Deve ser atribuída uma distribuição triangular de probabilidade acumulada para A^k do tipo, $P_i = P_{i-1} + 2(m+1-i)/m(m+1), i=1, \dots, m$, onde $P(0)=0$.
3. Realizar a seleção dos pais escolhendo-se aleatoriamente q distintos pontos u_1, \dots, u_q de A^k de acordo com a distribuição especificada acima, definindo assim um sub complexo. Guardá-los em uma matriz $B = \{u_i; v_i, i=1, \dots, q\}$, onde v_i é o valor da função associado com o ponto u_i . Guardar em L as localizações de A^k que foram usadas para construir B .
4. Gerar descendentes de acordo com o processo a seguir:
 - a) Ordenar B e L de modo que os q pontos fiquem arranjados em ordem crescente do valor da função; calcular o centroide g :

$$g = (1/q - 1) \sum_{j=1}^{q-1} u_j$$

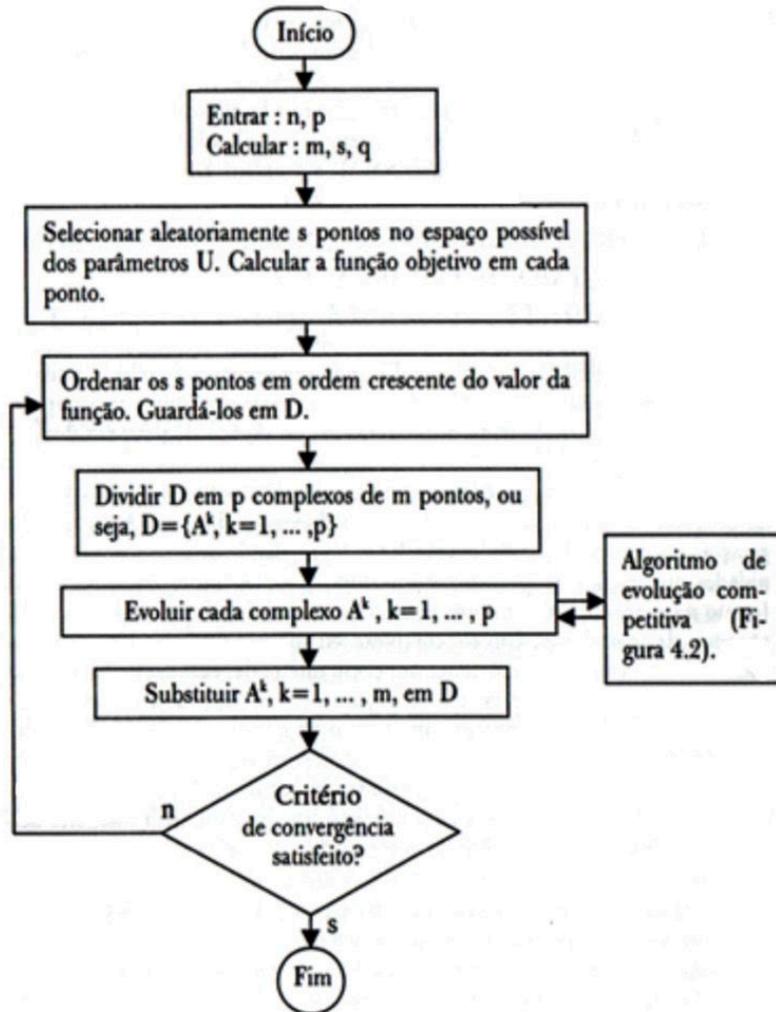


Figura 3.17 - Fluxograma do algoritmo SCE-UA.
 Fonte: Duran et al., 1992 apud Galvão e Valença, 1999, p.155.

- b) Calcular um novo ponto $r=2g-u_q$ (reflexão);
- c) Se r estiver dentro do espaço U , calcular o valor da função f_r e seguir para o passo (d); caso contrário, deve ser calculado o menor hipercubo H contido em R^N que contém A^k , selecionar, de forma aleatória, um ponto z dentro de H , calcular f_z , fazer $r=z$ e $f_r=f_z$ (mutação);
- d) Se $f_r < f_l$, calcular $ex=2r-g$ (expansão); caso contrário, seguir para o passo (g);
- e) Se ex estiver dentro do espaço U , seguir para o passo (f); caso contrário, deve-se selecionar de forma aleatória um ponto z dentro de H e fazer $ex=z$;
- f) Calcular a função f_{ex} ; se $f_{ex} < f_r$ fazer $u_q=ex$, $f_q=f_{ex}$ e seguir para o passo (j); caso contrário, seguir para o passo (h);

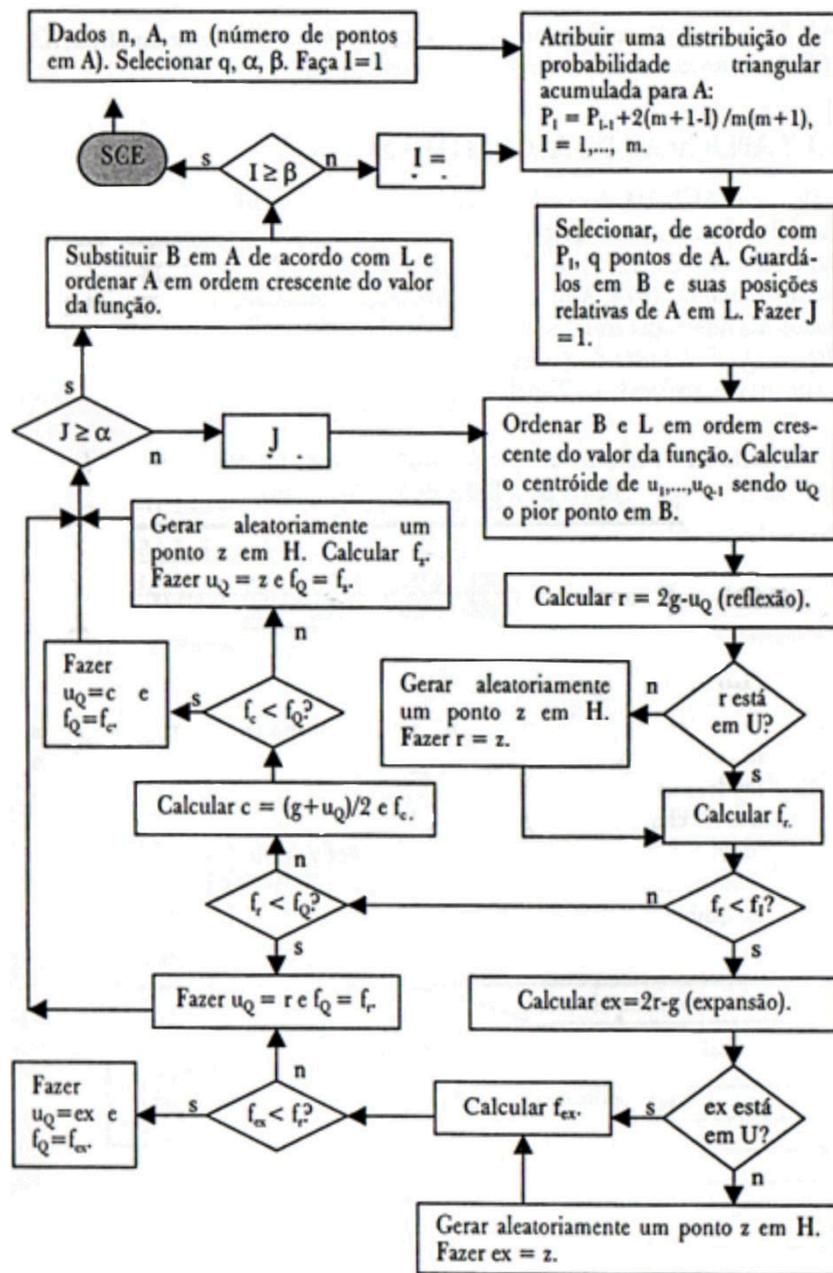


Figura 3.18 - Algoritmo de evolução competitiva

Fonte: Galvão e Valença, 1999, p.156.

- g) Se $f_r < f_q$, seguir para o passo (h); caso contrário, calcular $c = (g + u_q)/2$ e f_c ; seguir para o passo (i);
- h) Fazer $u_q = r$, $f_q = f_r$ seguir para o passo (j);
- i) Se $f_c < f_q$, fazer $u_q = c$, $f_q = f_c$ e seguir para o passo (j); caso contrário, seleccionar de forma aleatória um ponto z em H , calcular f_z , fazer $u_q = z$ e $f_q = f_z$ (mutação);
- j) Repetir os passos (a) a (i) α vezes, sendo que $\alpha = 7 - P$.

5. Substituir os pais pelos descendentes: substituir B em A^k usando as localizações originais guardadas em L . Organizar A^k em ordem crescente do valor da função.
6. Repetir os passos 2 a 5 β vezes, sendo que $\beta=2n+1$ é um parâmetro que determina como cada complexo será evoluído.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa, tais como a estimativa de consumo de água, concepção adotada para o sistema de bombeamento, equações utilizadas para modelar o custo do ciclo de vida do sistema, parametrização do algoritmo SCE-UA e indicadores.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um sistema de bombeamento de água, composto por tubulações de aspiração e recalque, reservatório inferior (que pode ser um manancial superficial ou subterrâneo), equipamento eletromecânico e reservatório superior, para ser viável e eficiente, deve apresentar o menor Custo de Ciclo de Vida (CCV), isto é, deve apresentar o menor custo de implantação (também chamado de custo inicial) somado ao menor custo de operação, custo de manutenção e reparo (Figura 4.1), entre outros (SAHOO *et al.*, 2009). Os custos com energia elétrica (aqui descritos como custos operacionais) podem ser reduzidos mediante tomadas de decisão baseadas nos indicadores de desempenho operacional discutidos no item 3.2.1.

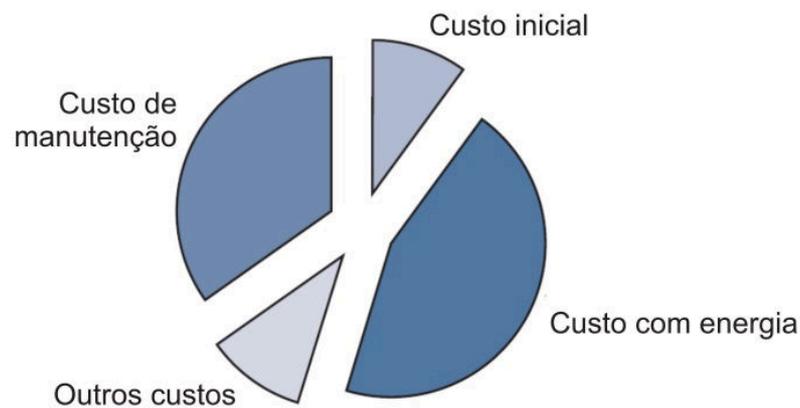


Figura 4.1 - Custos que compõem o CCV de um sistema de bombeamento
 Fonte: SAHOO *et al.* (2009)

A estimativa do custo inicial e de energia elétrica, que correspondem a maior parte do CCV pode ser realizada pela obtenção de três elementos básicos, sendo o primeiro, o consumo ou demanda de água, pois é partir deste consumo que se define a vazão que o sistema terá de bombear para atender a demanda. O segundo elemento é o conjunto de parâmetros do sistema

de bombeamento, isto é, comprimento da tubulação, diâmetro, altura geométrica, vazão de bombeamento, altura manométrica, entre outros. O terceiro elemento é a rotina de acionamento do conjunto elevatório, que varia de acordo com o volume útil disponível reservatório superior (e reservatório inferior, caso, por exemplo, o nível de água não seja constante) em cada intervalo de tempo. Os três elementos descritos anteriormente, são apresentados na Figura 4.2.

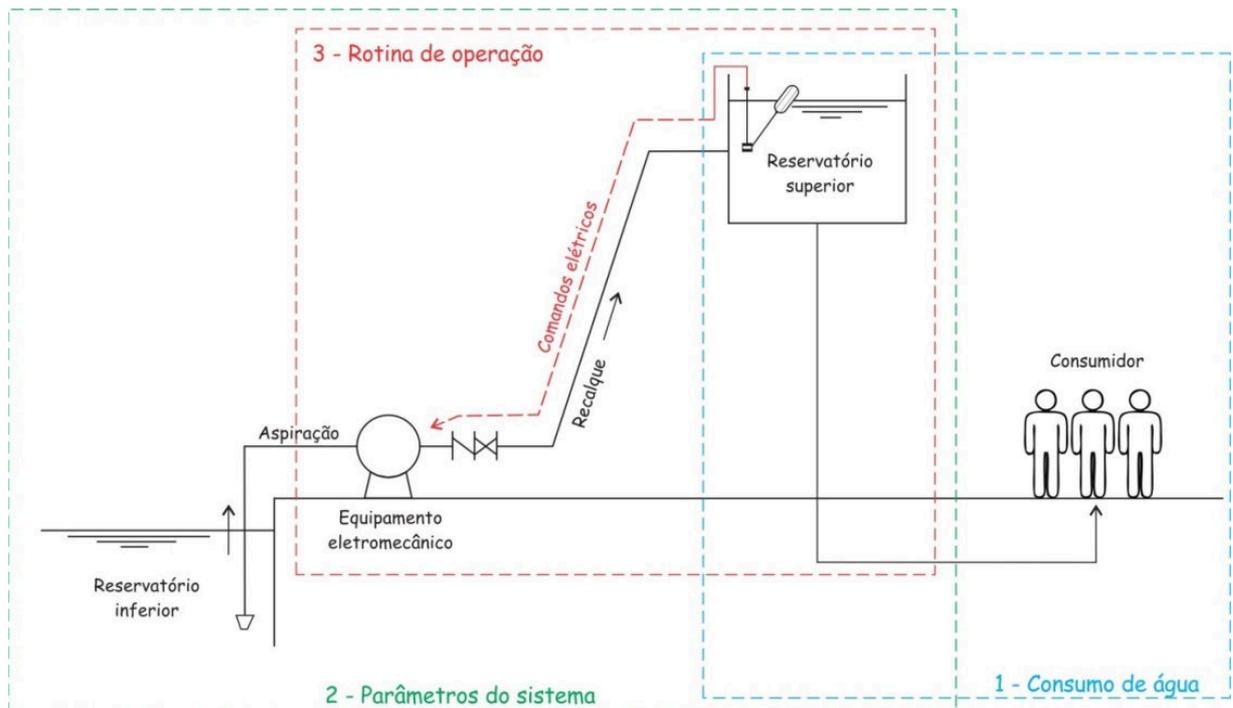


Figura 4.2 - Elementos básicos para a obtenção custo.

Com base nos três elementos da Figura 4.2, é possível afirmar que quando se define fisicamente um sistema de bombeamento, isto é, quando são fixados parâmetros como altura geométrica, comprimento, diâmetro e material da tubulação, é possível obter para esse sistema, diferentes rotinas de operação e CCVs, ao se testar diferentes vazões de bombeamento e volumes de reservação. Isto significa que definir as vazões de bombeamento e o volume de reservação como variáveis de decisão a serem otimizadas, resulta em operação otimizada e menor CCV para sistema de bombeamento.

Neste estudo, foi utilizada como ferramenta de otimização das variáveis de decisão, o algoritmo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution – University of Arizona*, DUAN *et al.*, 1992). Este algoritmo (ver item 3.4.2) foi utilizado para determinar as vazões de bombeamento e

volume do reservatório superior que resultassem em rotina de operação otimizada e menor CCV para sistema de bombeamento de água.

Na Figura 4.3 é observado um fluxograma resumo do desenvolvimento metodológico desta pesquisa.

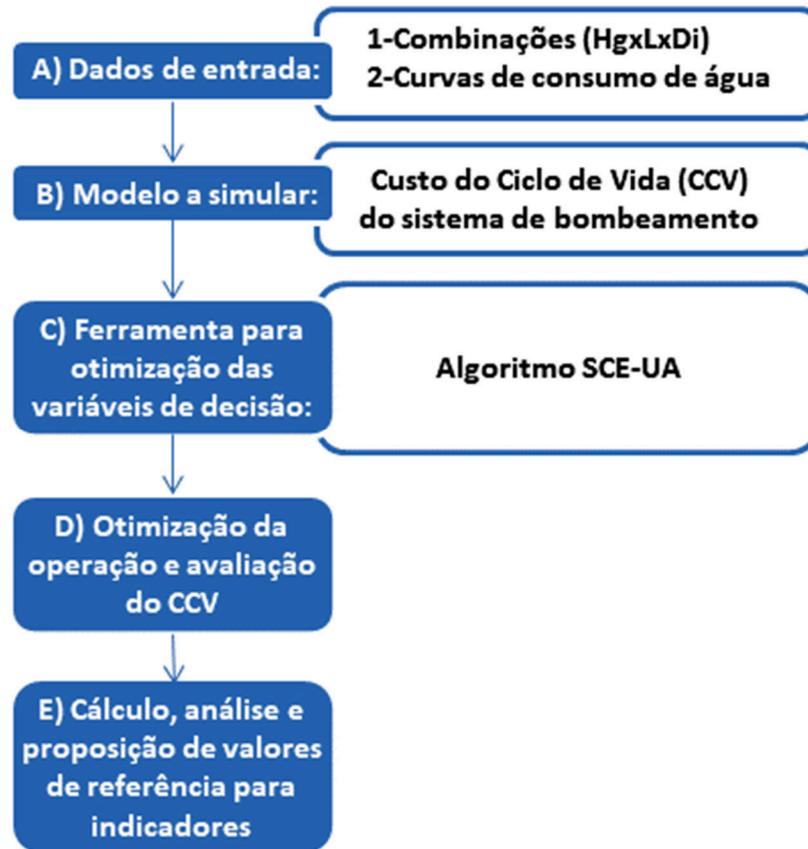


Figura 4.3 - Fluxograma geral do estudo.

Para a obtenção dos dados de entrada, e o modelo de simulação, foram desenvolvidas as atividades descritas a seguir.

4.2 ESTIMATIVA DE CONSUMO DE ÁGUA

Os volumes de água que alimentam diariamente o sistema de distribuição a partir do reservatório elevado representam a vazão real de água que deve ser fornecida diariamente por um sistema de bombeamento.

O conhecimento das curvas diárias de consumo de água de uma determinada cidade ou região é importante, pois se mantendo o perfil de variação da curva, este pode ser utilizado para

a previsão da demanda de água diária de cidades com características climáticas e hábitos semelhantes à cidade da qual se obteve a curva diária de consumo. No geral, mantém-se o perfil de variação da curva de consumo utilizada como referência, ajustando-a para a magnitude da vazão de consumo estimada da nova localidade.

Para que as curvas de consumo possam ser utilizadas nas previsões em outras localidades, é necessário que sejam adimensionalizadas e posteriormente, multiplicadas pelo valor de vazão estimada para a nova localidade.

Neste estudo foram utilizadas quatro curvas de consumo de água, sendo que a primeira é da cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul (RS), Figura 4.4a. De acordo com Kuritza (2017), a curva foi fornecida pelo setor de Gerência de Projetos e Obras do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE).

A segunda curva utilizada é a da Cidade Universitária Prof. José da Silveira Netto, principal campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), localizado no município de Belém, estado do Pará, Figura 4.4b. A curva foi monitorada por Sá (2012) no reservatório elevado do setor básico do referido campus universitário.

A terceira curva utilizada pertence ao reservatório Jardim Popular, da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), Figura 4.4c. De acordo com Silva (2003), a curva foi fornecida pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

A Quarta curva foi monitorada pela equipe do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da UFRGS, no município de Santana do Livramento, estado do Rio Grande do Sul (RS), Figura 4.4d.

Com objetivo de gerar mais resultados para a análise, foi criado um grupo de novas curvas de consumo baseadas nas curvas já descritas. As novas curvas tiveram seu consumo máximo deslocado para o início do horário de ponta, a fim de se verificar se o pico de consumo de água, ocorrendo no horário de ponta elevaria significativamente o volume de reservação de água. O deslocamento do pico de consumo não precisou ser realizado para a curva do DMAE, uma vez que esta originalmente já tem seu consumo máximo no início do horário de ponta.

As curvas foram adimensionalizadas dividindo-se cada um de seus valores horários de consumo pelo seu consumo horário máximo do dia, obtendo-se as curvas adimensionais da Figura 4.4. O intervalo de ponta adotado na pesquisa é o praticado pela Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE/RS), que vai das 18 às 21 horas.

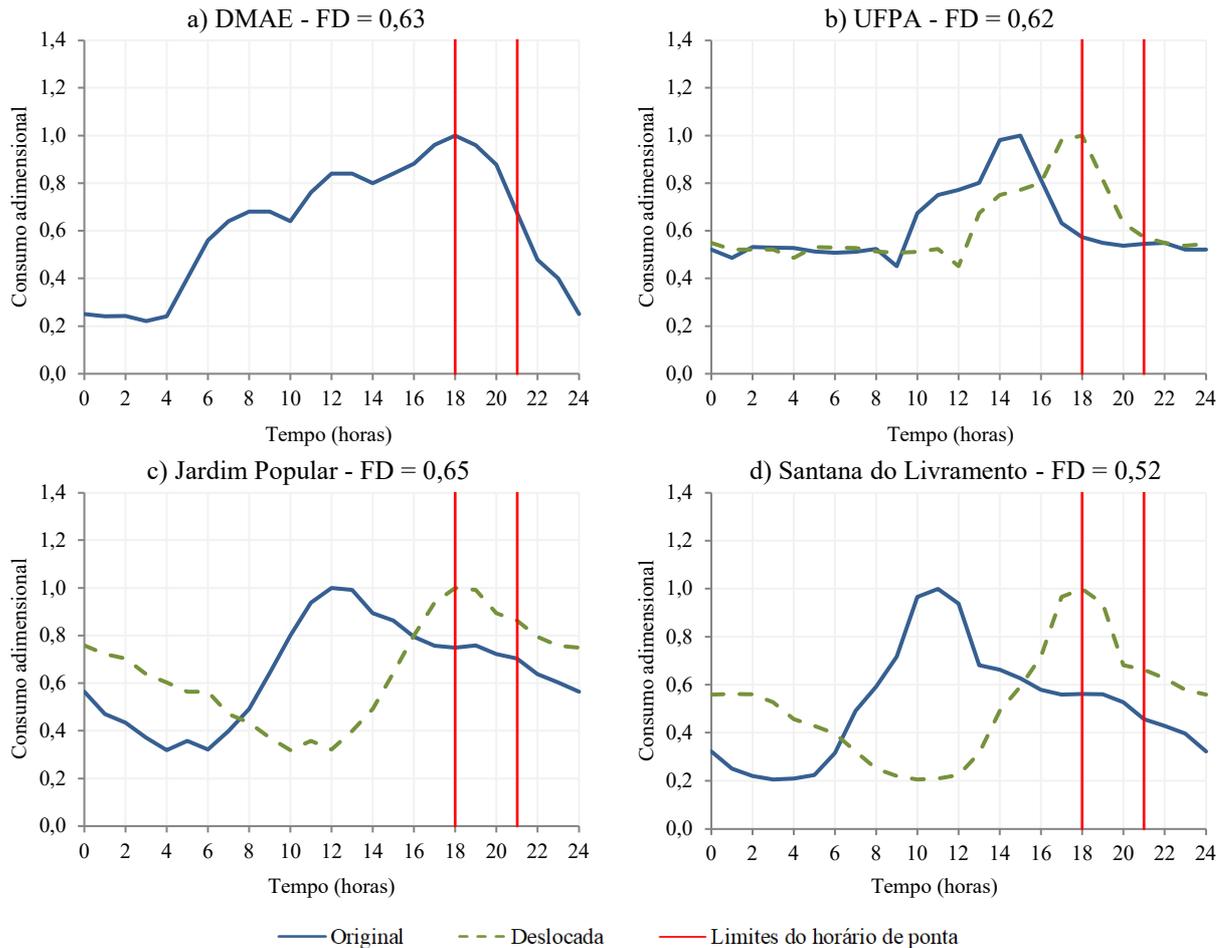


Figura 4.4 – Curvas adimensionais originais e deslocadas e seus fatores de demanda de água (FD^3) para o início do horário de ponta.

As sete curvas adimensionais foram utilizadas para a determinação de curvas de consumo horário, expresso em m^3/h , a partir da multiplicação dos valores adimensionais pelo valor de consumo máximo horário do dia. Assim, a curva de consumo apresenta 23 valores em m^3/h que, se somados, representam o volume diário (m^3/d) associado ao sistema de bombeamento, que pode ser avaliado em função da população que poderia ser abastecida por ele, considerando o consumo per capita de água e o coeficiente $K1$, que representa um percentual de acréscimo na vazão de abastecimento, para que as variações diárias de consumo sejam atendidas.

³ Fator de Demanda de água (FD) ou Fator de Consumo de água (FC) de uma curva de consumo é a razão entre a vazão média de consumo da curva e sua vazão máxima de consumo. Isto é: Q_{med}/Q_{max} . O FD pode ser interpretado também como o inverso do coeficiente da hora de maior consumo ($K2$) utilizado na determinação da vazão de projeto de sistemas de abastecimento de água.

Como FC também pode se referir a Fator de Carga, que é um parâmetro de eficiência energética citado nesta pesquisa, a denominação FD será utilizada, quando se referir a consumo de água.

Nesse sentido, Kuritza (2017) propôs a utilização de quatro consumos, relacionado-os à população atendida no início do horizonte de projeto. A utilização dessas populações (exibidas na Tabela 4.1) foi justificada pelo autor a partir estudo estatístico de frequências acumuladas da população dos municípios brasileiros, pois verificou que 50% desses municípios apresentaram população de até 10.904 habitantes.

Tabela 4.1 - Valores de população com representatividade elevada.

População 1	2.296
População 2	4.595
População 3	11.487
População 4	22.977

(Fonte: Kuritza, 2017)

Como o número máximo de habitantes proposto na Tabela 4.1 é bastante superior aos 10.904 habitantes, observa-se que as populações utilizadas nesta pesquisa apresentam boa representatividade frente ao cenário dos municípios brasileiros que, em sua maior parte, são de pequeno porte.

Para o valor da população 4 da Tabela 4.1, ao invés de se estabelecer valores de volumes máximos para determinar diretamente as curvas de consumo e verificar o número de habitantes atendidos por essas curvas, buscou-se realizar o caminho inverso, isto é, utilizar o valor populacional para determinar seus respectivos volumes e, posteriormente, utilizar esses volumes para obter as curvas de consumo.

Para determinar os volumes diários de consumo, foi utilizada a equação (40).

$$V = P \cdot q \cdot K_1 \quad (40)$$

Onde V é o volume em m³/dia, P é a população em habitantes, q é o consumo per capita (em m³/hab.dia) e K₁ é o coeficiente do dia de maior consumo, cujo valor adotado foi de 1,3 (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ, 2015).

O consumo per capita de água, pode variar de acordo com a cultura, clima, ou renda da população. Estudos realizados no estado de Minas Gerais⁴, indicaram faixas desse consumo

⁴ De acordo com Von Sperling (2005), o estado de Minas Gerais pode ser considerado bom retrato médio do Brasil, por apresentar regiões de maior e menor poder aquisitivo, maior e menor precipitação e maior e menor temperatura.

METODOLOGIA PARA OTIMIZACAO DA REGRA DE OPERACAO E AVALIACAO
DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

entre 0,084 e 0,248 m³/hab.dia (VON SPERLING, 2005). De acordo com Brasil (2021), os consumos per capita médios nos estados, entre os anos de 2017 e 2019 variaram de 0,921 e 0,1839 m³/hab. dia, com média de 0,1549 m³/hab. dia. Assim, com base nos valores descritos, foi adotado 0,185 m³/hab.dia para q no início do horizonte de projeto. Para o fim do horizonte de projeto, foi adotado q de 0,25 m³/hab. dia, devido ao aumento do padrão de vida da população, que tende a obter mais equipamentos residenciais, como lava-roupas, banheiras etc. Lombardi *et al.* (2018) citam que a variabilidade da demanda de água de um centro urbano ao longo do tempo está diretamente relacionada ao uso de equipamentos residenciais pelos cidadãos.

Assim, a equação (40) para um valor de V calculado, foi utilizada com a ferramenta interativa “atingir meta” do *Software* Microsoft Excel para determinar o valor de Q_{max} que deveria ser multiplicado pela curva adimensional, para que a soma de todos os volumes horários dessa curva, já na forma de curva de vazão, fosse igual ao volume diário consumido (valor de V calculado).

4.2.1 Horizonte de projeto e crescimento populacional

A elaboração de projetos de sistemas de abastecimento de água (e outros sistemas de saneamento) deve prever o atendimento da população por um determinado período, chamado de horizonte de projeto. Esta ação é necessária por conta do crescimento da população. Assim, um sistema não deve ser projetado e construído para atender a população atual, mas sim, a população futura, estimada para o horizonte de projeto, pois caso contrário, haverá um sistema sobrecarregado, com constantes interrupções no fornecimento de água ao longo dos anos após a construção do sistema.

É usual nos estudos de concepção adotar-se horizonte de projeto de 20 a 30 anos (GOMES, 2009b). Para esses períodos é necessária uma projeção populacional.

Além da projeção populacional, durante o horizonte de projeto, ocorre o envelhecimento e desgaste das partes eletromecânicas (conjuntos elevatórios) e das tubulações, causando a diminuição da eficiência energética do sistema. No caso das partes eletromecânicas, o problema é pontual, o que facilita a sua resolução em termos de logística. Já para as tubulações, são muitos os fatores que dificultam o acesso para monitoramento e manutenção. Alguns deles são: tubulação normalmente está enterrada, trechos muito longos (o que dificulta o diagnóstico em toda a sua extensão), dependendo das características (pH) da água podem ter aumento na

rugosidade das paredes internas do tubo (AZEVEDO NETTO, *et al.* 1998) e diminuição do diâmetro interno, o que eleva de sobremaneira as perdas de carga, e em consequência, o custo com energia elétrica para operar o sistema.

De acordo com Gomes (2009b) em um sistema de bombeamento, o alcance máximo de projeto de seus componentes são os seguintes: 30 anos para as linhas de adução com grande diâmetro e reservatórios de distribuição em aço. Para reservatórios em concreto o alcance é de até 40 anos, enquanto para estação de bombeamento, esse horizonte é de até 20 anos. Diante dessas informações, optou-se por fixar em 20 anos o horizonte de projeto, que é o tempo recomendado estações de bombeamento.

O crescimento do consumo ao longo do alcance de projeto depende do crescimento e hábitos da população, sendo este último, responsável pelo aumento do consumo per capita.

Na literatura existem diversos métodos de projeção populacional, tais como, método dos componentes demográficos, projeção aritmética, projeção geométrica, método do crescimento logístico (ou curva logística), método da extrapolação gráfica (TSUTIYA e ALÉM SOBRINHO, 2011), entre outros. No entanto, esses métodos só podem ser aplicados com razoável aproximação a um município específico, se houver a série histórica do referido município. Assim, por exemplo, um município com população elevada e que esteja com tendência de saturação, poderá ter sua população estimada, a priori, pelo método da curva logística, que prevê estagnação no crescimento. Porém, este mesmo método poderá não ser adequado para um município do interior, no qual não há tendências de estagnação da população. Talvez, a um município do interior, dependendo do número de habitantes, seja mais apropriado o uso da projeção aritmética ou geométrica para estimativa populacional. Além disso, existem os municípios especiais, que apresentam população flutuante, isto é, populações que crescem momentaneamente em períodos específicos, como é o caso dos municípios Rio de Janeiro, São Paulo, Salvador e Olinda, durante o carnaval, e como foram os casos dos municípios de Tucuruí e Altamira durante as obras de suas usinas hidrelétricas.

Assim, é importante destacar que os métodos de projeção populacional citados são modelos para se obter valor aproximado da população futura, e podem ser utilizados para o objetivo proposto quando o município é real, pois deve-se inicialmente realizar um aprofundado estudo das características populacionais do referido município para, depois, selecionar, criteriosamente, o método mais apropriado para esta projeção.

Como neste estudo a população utilizada não está relacionada a um município específico (ver item 4.2), foram consultadas informações sobre os padrões de crescimento populacional no Brasil de acordo com os Censos demográficos do IBGE, bem como utilizadas as populações dos censos dos anos de 1991⁵, 2000 e 2010 para aplicação de alguns dos métodos de projeção já citados (ver anexo I), e consultados estudos voltados para a temática do abastecimento de água, a fim de se determinar uma taxa anual de crescimento populacional, considerando também, o aumento da demanda por água e a garantia de fornecimento.

Os resultados das consultas e aplicações descritas são relacionados na Figura 4.5, onde pode ser observado que a projeção logística remete ao menor crescimento populacional, enquanto a taxa de 2,5 % ao ano, proposta por Kuritza (2017) apresenta maior crescimento até o ano de 2040, no qual o horizonte de projeto adotado neste estudo, se encerra.

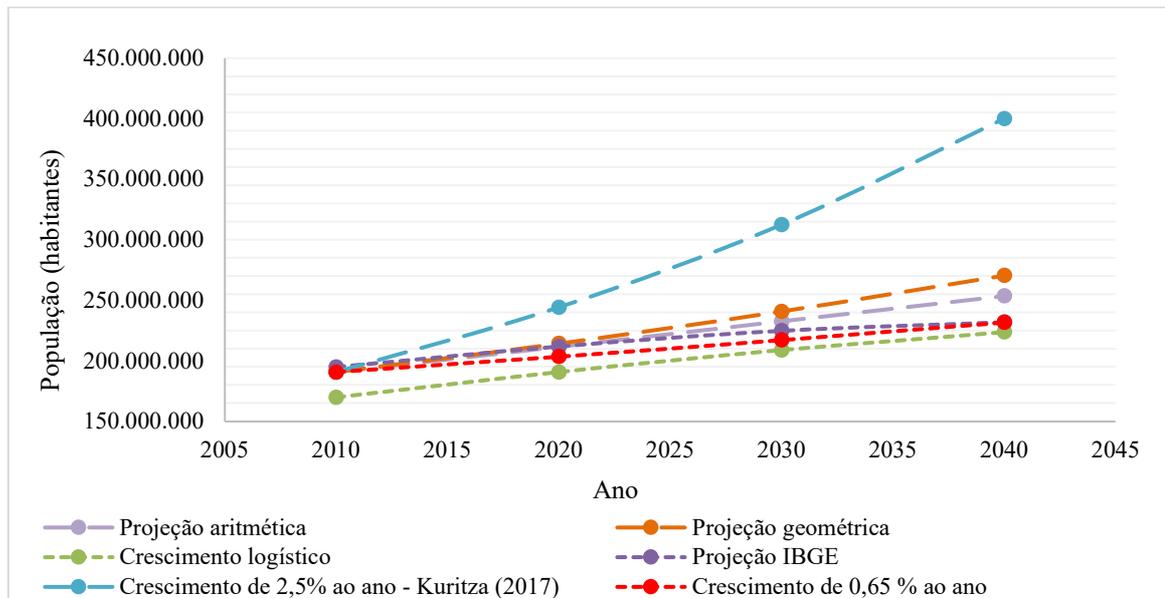


Figura 4.5 – Crescimentos da população brasileira até 2040 a partir dos dados dos Censos do IBGE, utilizando variados métodos de projeção populacional.

Sabe-se que, pela projeção do IBGE, observada na Figura 4.5, há uma tendência de estagnação do crescimento, por volta do ano de 2040, resultante da diminuição das taxas anuais de crescimento (IBGE, 2018). Devido a esta característica, buscou-se utilizar uma taxa de crescimento fixa, que se aproxime da dinâmica de crescimento populacional estimada pelo

⁵ Para o uso do método do crescimento logístico, foi necessário estimar a população do ano de 1990, pois a aplicação desse método necessita que os três anos utilizados para a projeção sejam igualmente espaçados. No caso, utilizando 1990, 2000 e 2010, tem-se um intervalo de 10 anos entre os anos utilizados na projeção.

IBGE. O valor da taxa de crescimento utilizado foi de 0,65% ao ano, e como mostra a Figura 4.5, esta taxa foi utilizada por resultar em mesma população estimada pelo IBGE no ano de 2040.

A taxa de 0,65 % ao ano, foi aplicada à população desta pesquisa (ver item 4.2) durante os 20 anos de horizonte de projeto.

4.3 CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Existe uma diversidade de concepções de sistemas de bombeamento, e por isso, o estudo de todas elas envolveria uma quantidade significativa de dados, o que tornaria inviável a proposta desta pesquisa. Assim, optou-se pela escolha de única concepção, neste caso, típica, que pode ser observada na Figura 4.6. O sistema de bombeamento estudado é composto por dois conjuntos motor e bomba, um operante e um reserva (sistema 1+1), e uma tubulação adutora. A bomba recalca água do reservatório inferior para o reservatório superior interligado à bomba pela tubulação adutora.

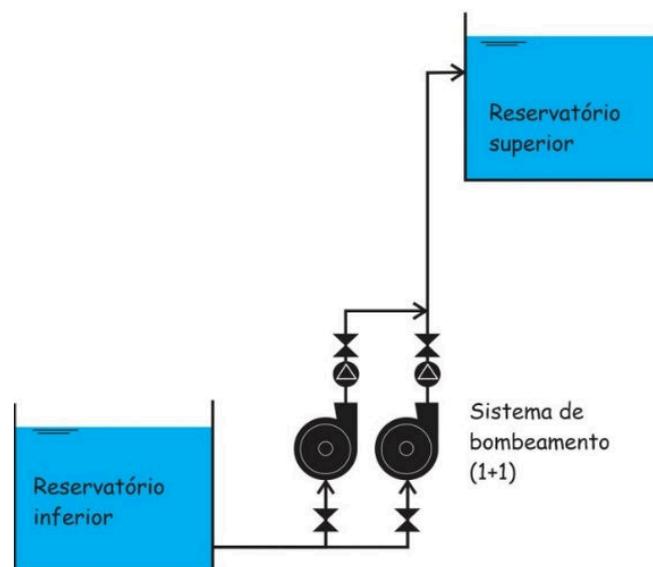


Figura 4.6 - Concepção típica do sistema de bombeamento utilizado no estudo.

Na operação do sistema acionado por chave boia independentemente da característica do consumo de água, a bomba desligará sempre que o reservatório superior estiver em um nível máximo de água pré-estabelecido e será acionada mediante um nível mínimo.

A altura geométrica, comprimento, diâmetro e material da tubulação, são bastante variados, devido às particularidades do local em que o sistema foi implantado. A população a

ser atendida e as condições topográficas são dois exemplos de particularidades a serem citados, sendo que as condições topográficas, bem como o posicionamento dos reservatórios a montante, e a jusante do sistema de bombeamento definem a altura geométrica, que em geral, é um parâmetro não modificável e por isso, deve ser estabelecido antes de qualquer outro.

O traçado da linha de adução, bem como o valor do comprimento, diâmetro, material da tubulação, potência do conjunto elevatório, e volume do dispositivo de proteção contra transientes (quando houver), são alguns dos parâmetros que podem ser definidos com base em critérios técnicos e econômicos, buscando reduzir os custos de implantação e operação.

Para o desenvolvimento de método de redução do custo de implantação e operação do sistema da Figura 4.6 considerando o acionamento/desligamento por um sistema chave-boia, foram utilizadas diversas combinações de valores de altura geométrica, comprimento e diâmetro da linha de adução. O material utilizado nesta pesquisa foi o ferro fundido (F°F°), dadas as limitações de disponibilidade de diâmetros comerciais para o uso de PVC. Além disso, o F°F° é um material mais barato em relação ao aço e apresenta grande variedade de diâmetros comerciais. Na Tabela 4.2 pode ser observada uma relação de diâmetros comerciais de tubos de F°F° disponível para as classes de pressões K7 e K9.

Tabela 4.2 - Diâmetros comerciais, espessura das paredes e Pressões Máximas de Serviço dos tubos em Ferro Fundido, Junta Elástica – JGS.

Diâmetro		Classes de Pressão			
Nominal (DN)	Interno (Di) (mm)	K-7		K-9	
		Espessura (e) (mm)	PMS (Mpa)	Espessura (e) (mm)	PMS (Mpa)
150	170	5,2	7,7	6,0	7,7
200	222	5,4	6,3	6,3	7,4
250	274	5,5	5,2	6,8	6,6
300	326	5,7	4,6	7,2	5,9
350	378	5,9	4,1	7,7	5,5
400	429	6,3	3,6	8,1	5,1
450	480	6,7	3,5	8,6	4,9
500	532	7,0	3,3	9,0	4,6
600	635	7,7	3,1	9,9	4,3
700	738	8,4	2,9	10,8	4,1
800	842	9,1	2,8	11,7	3,9
900	945	9,8	2,7	12,6	3,7
1000	1048	10,5	2,6	13,5	3,6
1200	1255	11,9	2,5	15,3	3,5

(Fonte: Saint Gobain, 2015).

4.3.1 Seleção dos valores para as combinações dos parâmetros geométricos

Os valores de altura geométrica, comprimento e diâmetros utilizados para as combinações geométricas são observados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores de H_g e L utilizados no estudo.

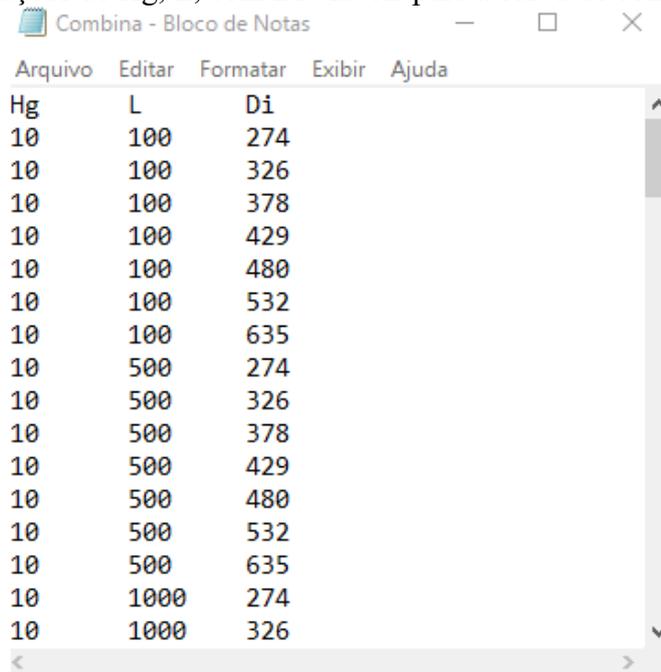
Altura geométrica (H_g) – m	25	50	100				
Comprimento (L) – m	100	500	1000	-	-		
Diâmetros internos (D_i) - mm	274	326	378	429	480	532	635

Os diâmetros inferiores a 274 mm foram descartados devido a vazão máxima que podem transportar (cuja velocidade máxima é de 3 m/s, de acordo com a NBR 12215/2017), serem inferiores à vazão máxima de consumo no último ano do horizonte de projeto.

O diâmetro máximo utilizado foi o de 635 mm para evitar bombeamento de vazões excessivamente elevadas, o que poderia reduzir muito o tempo de bombeamento diário do sistema, elevar a potência do equipamento e conseqüentemente, resultar em uso pouco racional da energia elétrica (ver item 3.2.1.3).

Na Tabela 4.4 pode ser observada parte da matriz de combinações de parâmetros geométricos, em arquivo de texto, utilizada como dados de entrada, juntamente com as curvas de consumo ajustadas para a população estimada nesta pesquisa.

Tabela 4.4 - Combinações de H_g , L , com D_i viáveis para a curva de consumo de água.



Comбина - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

H_g	L	D_i
10	100	274
10	100	326
10	100	378
10	100	429
10	100	480
10	100	532
10	100	635
10	500	274
10	500	326
10	500	378
10	500	429
10	500	480
10	500	532
10	500	635
10	1000	274
10	1000	326

4.4 ESTIMATIVA DO CUSTO COM ENERGIA ELÉTRICA (CUSTO DE OPERAÇÃO)

Um sistema de bombeamento, para operar dentro de um conceito de eficiência energética satisfatório, deve funcionar em uma faixa de elevado rendimento e estar sujeito a um rigoroso e adequado plano de manutenção, especialmente do equipamento eletromecânico. De acordo com o estudo publicado por Bloch (2012), operar um CMB dentro de uma faixa de alto rendimento, gera impactos positivos que vão além da diminuição do consumo de energia elétrica. Uma faixa operacional de alto rendimento eleva a confiabilidade do CMB, e por conta disso, diminui o custo do ciclo de vida do equipamento. A maioria dos custos probabilísticos está diretamente associada às características de confiabilidade e manutenção do sistema (SINISUKA e NUGRAHA, 2013). A confiabilidade, em geral, é a capacidade que um sistema tem de se manter operando em condições de rotina e também, em condições atípicas. Na Figura 4.7 pode ser observada a curva de Barringer-Nelson, que é uma curva de confiabilidade para bombas, criada com bases nos estudos da distribuição de probabilidades de Weibull (BLOCH, 2012).

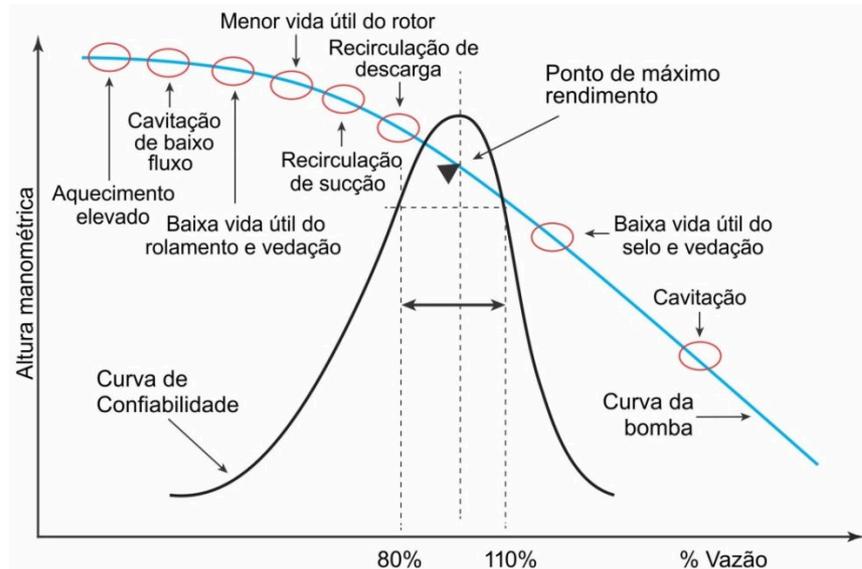


Figura 4.7 - Curva de confiabilidade de Barringer-Nelson.
Fonte: Adaptado de Bloch (2012).

Na Figura 4.7 pode ser observado que são vários os parâmetros que interagem para causar repetidas falhas nas bombas. Muitos deles são problemas hidráulicos, que já foram melhorados. No entanto, a maioria das causas desses problemas está ligada a parte mecânica

(BLOCH, 2012). Além desse fator, também é observado que a faixa de maior confiabilidade da bomba ocorre quando sua vazão de bombeamento está entre 80% e 110% da vazão de bombeamento no ponto de máximo rendimento.

Ao longo do período de 20 anos, adotado como horizonte de projeto para o sistema de bombeamento, ocorre decaimento da capacidade hidráulica da tubulação do sistema, devido ao aumento das perdas de carga e, conseqüentemente, da altura manométrica do sistema. As perdas de carga se ampliam em função do envelhecimento da tubulação, que pode ser expresso pela mudança nos valores do coeficiente C, da equação de Hazen-Williams.

Neste estudo, optou-se pelo uso da equação empírica de Hazen-Williams por ser equação explícita, e ter praticidade de uso, não necessitando das interações computacionais utilizadas na obtenção do fator de atrito (f)⁶ da equação científica de Darcy-Weisbach (fórmula universal da perda de carga), o que elevaria o esforço computacional durante a otimização, comprometendo a realização do estudo. Além disso, para Azevedo Netto e Fernández (2015), as incertezas sobre a temperatura da água na tubulação e rugosidades reais a se encontrar (KELLNER *et al.*, 2015), anulam em grande parte as vantagens teóricas do uso das fórmulas “científicas” sobre as empíricas, pois a ordem de grandeza das imprecisões, remetem ambos os métodos à mesma faixa de soluções.

Na Tabela 4.5 são observados os valores dos coeficientes C de Hazen-Williams que representam o envelhecimento da tubulação. Vale observar que para um material específico de tubulação, como o ferro fundido, adotado neste estudo, há diversidade de valores para o coeficiente C, que está em função da temperatura e qualidade da água a ser conduzida, além do revestimento e diâmetro da tubulação. A exemplo, cita-se uma tubulação de ferro fundido dúctil revestida com argamassa de cimento. Para esta tubulação, se for nova e tiver diâmetro nominal de até 125 e estiver conduzindo águas pouco incrustantes e pouco corrosivas, à temperatura de aproximadamente 20°C, seu coeficiente C será de 125. Para a tubulação, nas mesmas condições, modificando-se apenas o diâmetro nominal para 300, o valor de C passará a ser de 130 (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ, 2015). Devido a grande variedade de valores do coeficiente C, o que elevaria a complexidade do modelo deste estudo, buscou-se na literatura técnica, valores centralizados do coeficiente C para tubos de ferro fundido novos, com 10, 20 e

⁶ Embora existam equações como a de Swamee (1976), para Gomes (2009a) a equação de Colebrook-White é a mais precisa. No entanto, nesta equação, o valor do fator de atrito f não pode ser explicitado, sendo necessário o uso de calculadoras programáveis ou computadores.

30 anos de uso, sendo estes valores encontrados em Azevedo Netto *et al.* (1998) e Macintyre (2015).

Tabela 4.5 - Valores de coeficientes C para tubos de ferro fundido.

Anos de uso	Coefficiente C
0	130
10	120
20	105
30	90

(Fonte: Azevedo Netto *et al.*, 1998 e Macintyre, 2015).

Vale observar que para tubos em ferro fundido com revestimento permanente, ou revestimento em argamassa de cimento, com idade entre 0 e 20 anos, podem ter seus coeficientes C variando entre 90 e 140, dependendo das condições já explicadas (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ, 2015).

Os valores da Tabela 4.5 foram utilizados para ajustar a curva da Figura 4.8.

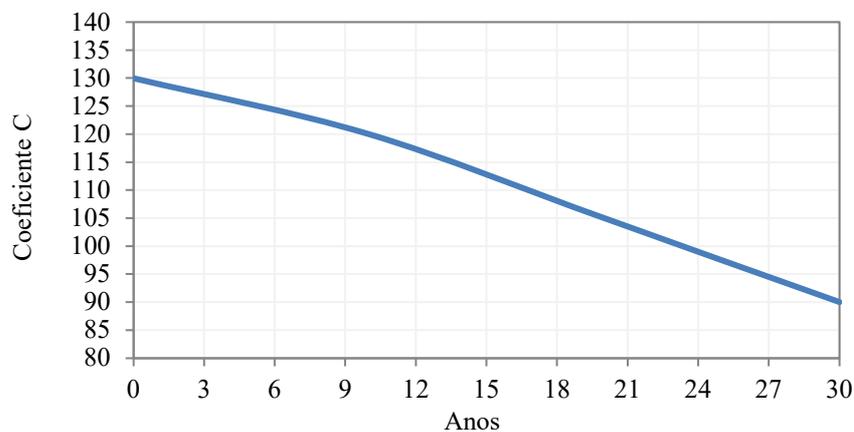


Figura 4.8 - Curva de decaimento do coeficiente C para tubos de F^oF^o.

A partir da curva apresentada na Figura 4.8, foi ajustada, com $R^2=0,9986$, a equação (41), que permite determinar o C da tubulação e seguidamente, a altura manométrica do sistema em algum outro momento do horizonte de projeto.

$$C = -0,0125 \cdot An^2 - 0,975 \cdot An + 130,25 \quad (41)$$

Onde C é o coeficiente de Hazen-Williams, e An é o número de anos de uso da tubulação.

Sabendo-se que o ponto operacional de um sistema de bombeamento é a interseção entre a curva de altura manométrica do sistema e a curva de altura manométrica da bomba, neste estudo foi determinado o ponto de operação no primeiro e no último ano do horizonte de projeto, isto é, no ano 1 e no ano 20.

Para a determinação dos dois pontos operacionais, considerou-se inicialmente que o ponto de operação no ano 20 será o ponto no qual a bomba atingirá o máximo rendimento. Assim, a altura manométrica do sistema no ano 20 ou da bomba no ponto de máximo rendimento foi calculada pela equação (42).

$$H_{ms_{20}} = H_{mb_{1/1}} = H_g + \frac{10,643 \cdot Q_{b_{20}}^{1,85} \cdot L}{C_{20}^{1,85} \cdot D_i^{4,87}} \quad (42)$$

Onde $H_{ms_{20}}$ é a altura manométrica do sistema no ano 20, em m; $H_{mb_{1/1}}$ é a altura manométrica da bomba no ponto de máximo rendimento, em m; H_g é a altura geométrica, em m; $Q_{b_{20}}$ é a vazão de bombeamento no ano 20, em m^3/s , C_{20} é o coeficiente de Hazen-Williams da tubulação com 20 anos de uso, adimensional; e D_i é o diâmetro interno da tubulação, em m.

As combinações de valores de altura geométrica, comprimento e diâmetro interno foram inseridos no programa como uma matriz de valores, enquanto $Q_{b_{20}}$ foi a segunda variável de decisão do problema, isto é, $x_2 = Q_{b_{20}}$. O espaço de busca foi definido a partir da fixação de limites superior e inferior. O limite inferior foi definido como sendo o consumo máximo de água no ano 20 e o limite superior foi definido de modo que a velocidade do escoamento para $Q_{b_{20}}$ não ultrapasse 3m/s, ou seja, o limite superior para $Q_{b_{20}}$ é igual a $3 \cdot \pi \cdot D_i^2 / 4$.

Kuritza *et al.* (2017) propuseram a equação (43) para a altura manométrica da bomba.

$$\frac{H_{mb_n}}{H_{mb_{1/1}}} = 1,245 - 0,265 \cdot \left(\frac{Q_{b_n}}{Q_{b_{1/1}}} \right)^2 \quad (43)$$

Onde Qb_n é a vazão de bombeamento no ano n do horizonte de projeto e $Qb_{1/1}$ é a vazão de bombeamento no ponto de máximo rendimento da bomba.

A equação (43) necessitou de correção em seus coeficientes, e foi aplicada ao problema do estudo, isto é Qb_n passou a ser a vazão de bombeamento no primeiro ano de projeto, enquanto $Qb_{1/1}$ passou a ser a vazão de bombeamento no ano 20. Com isso a equação (43) foi modificada para a equação (44).

$$\frac{Hmb_1}{Hmb_{20}} = 1,26 - 0,26 \cdot \left(\frac{Qb_1}{Qb_{20}} \right)^2 \quad (44)$$

Reorganizando a equação (44), tem-se.

$$Hmb_1 = Hmb_{20} \cdot \left[1,26 - 0,26 \cdot \left(\frac{Qb_1}{Qb_{20}} \right)^2 \right] \quad (45)$$

Ratificando que o ponto de operação de um sistema de bombeamento é a interseção entre a curva da bomba e a curva do sistema, para o ano 1, temos:

$$Hms_1 = Hmb_1 \quad (46)$$

Substituindo as expressões, tem-se:

$$Hg + \frac{10,643 \cdot Qb_1^{1,85} \cdot L}{C_1^{1,85} \cdot Di^{4,87}} = Hmb_{20} \cdot \left[1,26 - 0,26 \cdot \left(\frac{Qb_1}{Qb_{20}} \right)^2 \right] \quad (47)$$

Onde Hg é altura geométrica, em m; Qb_{20} é a vazão de bombeamento no ano 20, em m^3/s ; L é o comprimento da tubulação, em m; C_{20} é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams da tubulação com 20 anos de uso, adimensional; Di é o diâmetro interno da tubulação, em m; Hmb_{20} é a altura manométrica da bomba com 20 anos de uso, Qb_1 é a vazão de bombeamento no ano 1; em m^3/s .

A equação (47), transcendente, foi solucionada pelo algoritmo SCE-UA, buscando o valor da relação Qb_1/Qb_{20} , que é a primeira variável de decisão do problema. Isto é, $x_1 = Qb_1/Qb_{20}$.

Q_{b1}/Q_{b20} neste estudo, é o percentual que a vazão de bombeamento no ano 1 representa da vazão de bombeamento no ano 20 (vazão no ponto de máximo rendimento). A faixa operacional de maior confiabilidade da bomba está entre 80% e 110% do ponto de máximo rendimento (BLOCH, 2012). Com base nesta informação, o espaço de busca definido para x_1 (Q_{b1}/Q_{b20}), foi de⁷:

$$1 \leq x_1 \leq 1,20$$

Com a obtenção de Q_{b20} e de x_1 , foi possível calcular Q_{b1} pela equação (48).

$$Q_{b1} = x_1 \cdot Q_{b20} \quad (48)$$

Sabendo que $Q_{b20}=x_2$, tem-se:

$$Q_{b1} = x_1 \cdot x_2 \quad (49)$$

Em resumo, o algoritmo SCE-UA busca Q_{b20} de forma direta, já que $Q_{b20}=x_2$ e busca Q_{b1} indiretamente por meio de x_1 .

A justificativa para a inversão da sequência de cálculo, no caso, de Q_{b20} para Q_{b1} pode ser observada na Figura 4.9.

⁷ Neste estudo a vazão de bombeamento estará sempre entre a vazão no ponto de máximo rendimento e algum valor acima dela. Por conta disso, o limite inferior de x_1 foi de 1, que representa 100% da vazão no ponto de máximo rendimento. O limite superior de x_1 foi definido como 1,2 para se ter uma folga de 0,1 no limite superior (que seria inicialmente de 1,1).

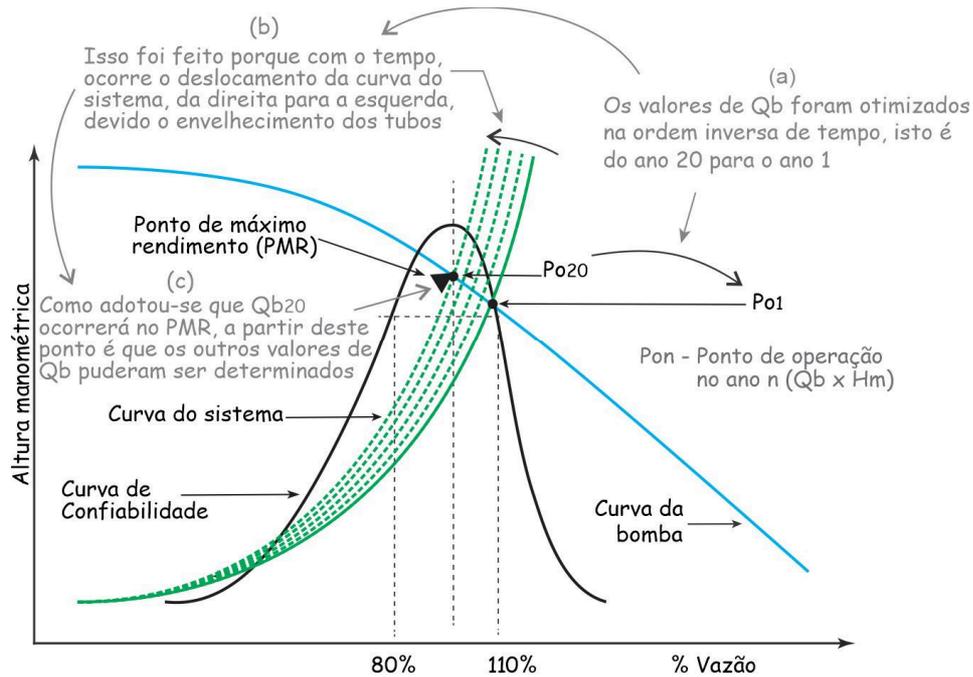


Figura 4.9 – Deslocamento do Ponto de Operação (PO) do sistema de bombeamento para que coincida com o Ponto de Máximo Rendimento (PMR) da bomba.

O descolamento da curva do sistema para a esquerda ao longo dos anos, como observado na Figura 4.9, ocorre devido ao aumento nas perdas de carga, ocasionado pela diminuição do coeficiente C ao longo dos anos (ver Figura 4.8). Isso resulta em uma elevação no valor da altura manométrica do sistema, forçando a diminuição no valor da vazão de bombeamento com o passar do tempo.

Para de determinação do valor do rendimento máximo da bomba, foi utilizada a equação(50) proposta por Kuritza *et al.* (2017).

$$\eta_{bmax}(\%) = e^{5,092 - \frac{9,121}{N_s} - 0,124 \cdot \ln(N_s)} \quad (50)$$

Onde η_{bmax} é o rendimento máximo da bomba, em %, e N_s é a rotação específica (adimensional) do conjunto motor e bomba.

O valor de N_s utilizado na equação(50) foi obtido para o ponto operacional de máximo rendimento (que ocorrerá no ano 20) pela equação (51).

$$N_s = \frac{N\sqrt{Qb_{20}}}{Hmb_{20}^{3/4}} \quad (51)$$

Onde N é a rotação nominal, em rpm. Para este estudo foi utilizada a rotação de 3500 rpm.⁸

Com a determinação do rendimento máximo da bomba, isto é, o rendimento da bomba no ano 20, foi possível determinar o rendimento da bomba para o ano 1 por meio da equação (52 proposta por Kuritza *et al.* (2017).

$$\frac{\eta_b}{\eta_{bmax}} = -0,995 \left(\frac{Q_b}{Q_{b_{1/1}}} \right)^2 + 1,977 \left(\frac{Q_b}{Q_{b_{1/1}}} \right) + 0,025 \quad (52)$$

A equação (52) foi corrigida e ajustada ao problema deste estudo, passando a ser a equação (53).

$$\frac{\eta_{b_1}}{\eta_{b_{20}}} = -0,995 \left(\frac{Q_{b_1}}{Q_{b_{20}}} \right)^2 + 1,977 \left(\frac{Q_{b_1}}{Q_{b_{20}}} \right) + 0,018 \quad (53)$$

Onde η_{b_1} é o rendimento da bomba no ano 1, $\eta_{b_{20}}$ é rendimento máximo da bomba (ou rendimento da bomba no ano 20) e $Q_{b_1}/Q_{b_{20}}$ é a variável de decisão x1 usado pelo algoritmo SCE-UA para a minimização do valor da função objetivo.

Com os valores de $\eta_{b_{20}}$ e a relação $\eta_{b_1}/\eta_{b_{20}}$, foi possível determinar η_{b_1} .

Os rendimentos do motor elétrico, para o ano 1 e para o ano 20, foram obtidos pela equação (54) proposta por Kuritza (2017) a partir de uma tabela de potências e rendimentos para motores elétricos trifásicos com 2 polos, de um fabricante reconhecido no mercado brasileiro.

$$\eta_{me(k)} = 2,9899 \cdot \ln(P_{m(k)}) + 79,921 \quad (54)$$

⁸ Neste estudo foi utilizada rotação de 3500 rpm devido esta ser a rotação assíncrona de motores elétricos com 2 polos que operam à frequência de 60 Hz (GOMES, 2009). As especificações dos motores com 2 polos foram utilizadas por Kuritza (2017) para desenvolver a equação (55, utilizada nesta pesquisa para estimativa do rendimento do motor elétrico.

Onde η_{me} é o rendimento do motor elétrico em % nos k anos analisados nesta pesquisa e P_m é a potência do motor (potência motriz solicitada pela bomba), em kW, obtida pela equação (55).

$$P_{m(k)} = \frac{9,81 \cdot Q_{b(k)} \cdot H_{m(k)}}{\eta_{b(k)}} \quad (55)$$

Onde P_m é a potência mecânica do motor elétrico, em kW; Q_b é a vazão de bombeamento, em m^3/s ; H_m é a altura manométrica, em m e η_b é o rendimento da bomba nos k anos analisados.

Com a obtenção de η_{me} , pela equação (54) foi possível calcular a potência elétrica do conjunto elevatório pela equação (56).

$$P_{el(k)} = \frac{P_{m(k)}}{\eta_{me(k)}} \quad (56)$$

Onde P_{el} é a potência elétrica do motor (em kW) no ano k, P_m é a potência mecânica em kW e η_{me} é o rendimento do motor elétrico.

A energia elétrica consumida no ano 1 e 20 foi obtida multiplicando-se o tempo de bombeamento pela potência do conjunto elevatório, conforme a equação (57).

$$CE_{(k)} = P_{el(k)} \cdot t_{b(k)} \quad (57)$$

Onde CE é a energia elétrica consumida no ano k, em kWh, P_{el} é a potência elétrica, em kW e t_b é o tempo de bombeamento em horas, para cada ano.

Embora CE tenha sido calculado em horas, inicialmente foi necessário discretizar as horas em minutos, já que com tempo sendo contabilizado em horas, eventuais acionamentos ou desligamentos da bomba em curtos intervalos de tempo (5 minutos, por exemplo), não seriam contabilizados, o que elevaria o erro de cálculo do balaço de volume de água no reservatório elevado. Assim os 24 intervalos de tempo (horas) que caracterizam um dia de operação, foram discretizados em 1440 intervalos (24 horas x 60 minutos).

A curva de consumo de água utilizada como dado de entrada também foi discretizada em minutos para que fosse compatível com o programa desenvolvido.

Para definir o tempo de bombeamento (t_b) foi programada regra na qual foi definido inicialmente um parâmetro denominado balanço de volume de água (bva) no reservatório de distribuição no primeiro minuto ($i=1$), do primeiro dia ($j=1$), de um dos anos (k) do horizonte de projeto para uma combinação n de parâmetros geométricos. O cálculo desse parâmetro foi realizado pela equação (58).

$$bva_{(1,1,k,n)} = V_i - V_{c(1,k)} \quad (58)$$

Onde V_i é o volume inicial (em m^3) no REL (esse volume não pode ser maior que o volume útil do REL – V_u), e $V_{c(1,k)}$ é o volume de água (m^3) consumido no minuto 1 do ano k .

Em seguida o volume acumulado (Vac) para $i=1$ e $j=1$ foi obtido pela equação (59).

$$Vac_{(1,1,k,n)} = bva_{(1,1,k,n)} + Q_{b(1,1,k,n)} \cdot t_{b(1,1,k,n)} \quad (59)$$

Onde Q_b é a vazão de bombeamento em m^3/min e t_b é o tempo de bombeamento em minutos. Para cada minuto do dia, a variável t_b recebeu o valor 1 se o CMB estivesse ligado (indicando tempo de funcionamento de 1 minuto) e recebeu o valor 0, se CMB estivesse desligado. No total, o vetor de 1440 posições (equivalente aos 1440 minutos existentes em 1 dia) recebido por t_b conteve valores binários, sendo que o $t_b=0$, indica que naquele minuto, não houve bombeamento. Nas posições do vetor onde $t_b=1$, o CMB esteve acionado, bombeando água naquele minuto. Se t_b será 0 ou 1 em cada posição do vetor, dependerá de V_u , V_i e V_c . Assim, o valor total de t_b isto é, o número de minutos diários em que o CMB esteve acionado é a soma dos 1440 valores do vetor t_b . Essa mesma lógica foi utilizada para delimitar o número de minutos diários em que o CMB operou no horário fora de ponta, considerado das 18h00min às 20h59min, vigente no estado do Rio Grande do Sul (CEEE/RS, 2019).

O condicional para que o conjunto motor e bomba (CMB) não fosse acionado no primeiro minuto do primeiro dia do ano k , foi: $0 < bva_{(1,1,k,n)} \leq V_u$. Neste caso, como o CMB não seria acionado, então $Q_{b(1,1,k,n)}=0$, resultando em $Vac_{(1,1,k,n)}=bva_{(1,1,k,n)}$. Essa condição faz com que o reservatório esvazie, já que a cada minuto, está sendo consumido determinado volume de água do reservatório, que não está sendo repostado devido o CMB está desligado. Caso a condição $0 < bva_{(1,1,k,n)} \leq V_u$ não fosse satisfeita, o CMB acionaria no primeiro minuto. Como $Q_{b(1,1,k,n)} \neq 0$, então $Vac_{(1,1,k,n)} \neq bva_{(1,1,k,n)}$

Para melhor esclarecimento, na Figura 4.10 pode ser observado fluxograma da regra de operação no primeiro minuto do primeiro dia de qualquer ano k para qualquer combinação geométrica n .

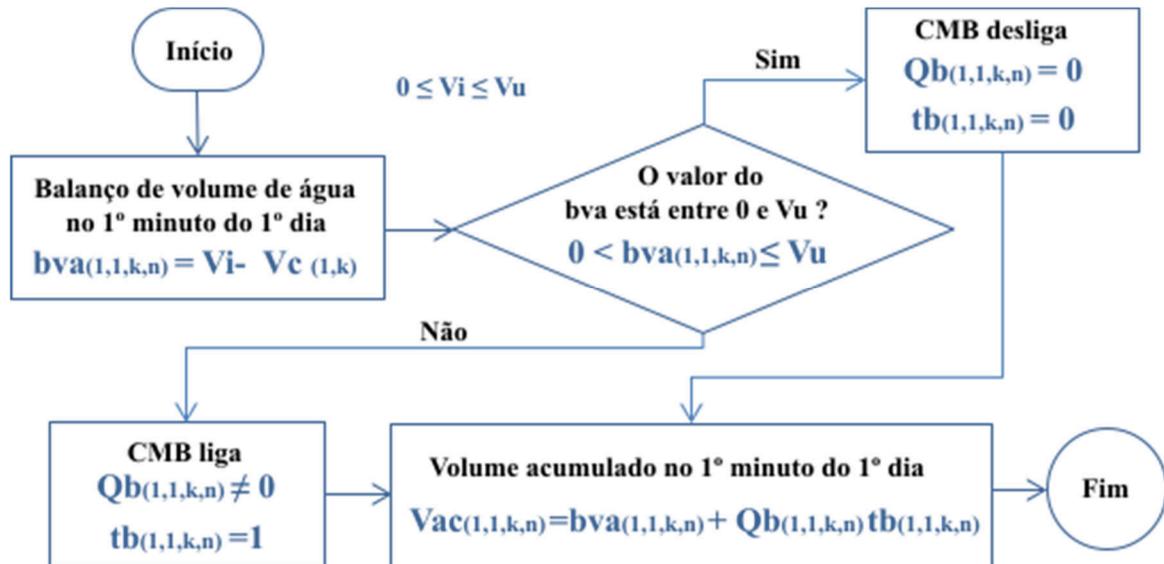


Figura 4.10 – Regra de operação do sistema de bombeamento de água para o primeiro minuto do primeiro dia em um dos anos k para a combinação n de parâmetros geométricos do sistema.

A partir do segundo minuto ($i \geq 2$) do primeiro dia, o bva foi determinado pela equação (60)

$$bva_{(i,1,k,n)} = Vac_{(i-1,1,k,n)} - Vc_{(i,k)} \quad (60)$$

Para a equação (60), o condicional foi de que se o CMB estivesse desligado no minuto anterior (isto é, se $tb_{(i-1,1,k,n)} = 0$) e $0 < bva_{(i,1,k,n)} \leq Vu$, o CMB continuaria desligado no minuto atual. Isto é, $tb_{(i,1,k,n)} = 0$ e $Vac_{(i,1,k,n)} = bva_{(i,1,k,n)}$. Essa instrução manteve a condição de esvaziamento do reservatório. Caso o CMB estivesse ligado no minuto anterior (isto é: se $tb_{(i-1,1,k,n)} = 1$) e $0 < bva_{(i,1,k,n)} < Vu$ ou se o CMB estivesse desligado no minuto anterior ($tb_{(i-1,1,k,n)} = 0$) e $bva_{(i,j,k,n)} \leq 0$, o CMB seria ligado, e $Vac_{(i,1,k,n)}$ seria determinado pela equação (61)

$$Vac_{(i,1,k,n)} = bva_{(i,1,k,n)} + Qb_{(i,1,k,n)} \cdot tb_{(i,1,k,n)} \quad (61)$$

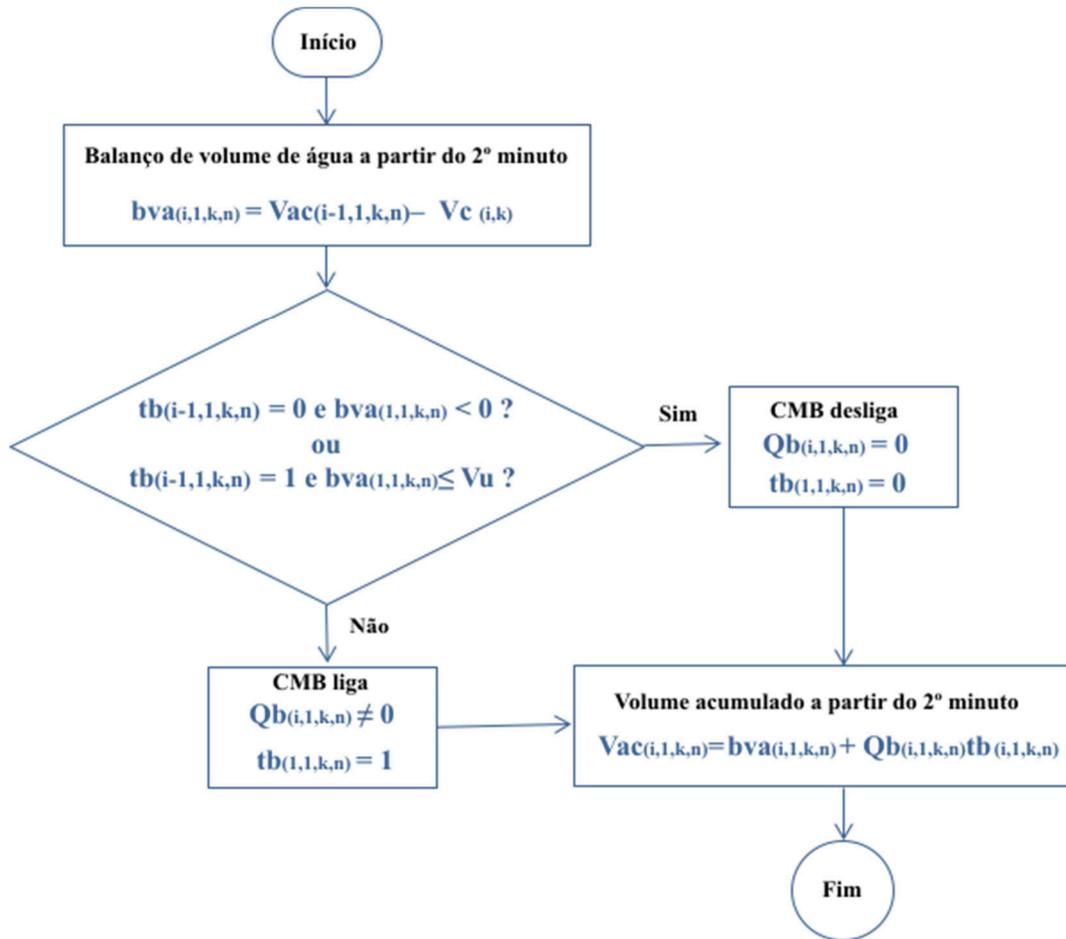


Figura 4.11 – Regra de operação do sistema de bombeamento a partir do segundo minuto do primeiro dia para qualquer ano k e combinação n .

A partir do segundo dia, a regra de operação foi a mesma indicada nas Figura 4.10 e Figura 4.11, no entanto, o volume inicial utilizado no primeiro minuto do dia, foi o volume acumulado no último minuto do dia anterior, isto é $V_i = Vac_{(1440,j-1,k,n)}$, conforme observado na equação (62). As equações (63), (64) e (65) também são as mesmas utilizadas para o primeiro dia. No entanto, neste caso, foram utilizadas para o segundo dia em diante.

$$bva_{(1,j,k,n)} = Vac_{(1440,j-1,k,n)} - Vc_{(1,k)} \quad (62)$$

$$Vac_{(1,j,k,n)} = bva_{(1,j,k,n)} + Qb_{(1,j,k,n)} \cdot tb_{(1,j,k,n)} \quad (63)$$

$$bva_{(i,j,k,n)} = Vac_{(i-1,j,k,n)} - Vc_{(i,k)} \quad (64)$$

$$Vac_{(i,j,k,n)} = bva_{(i,j,k,n)} + Qb_{(i,j,k,n)} \cdot tb_{(i,j,k,n)} \quad (65)$$

A metodologia para a estimativa da energia elétrica consumida foi utilizada para realizar a previsão do custo de operação do sistema, que neste estudo é o custo de energia elétrica necessária para alimentar o conjunto elevatório. Esse custo é cobrado pelas concessionárias por meio do consumo de energia elétrica e por meio da demanda. A tarifa de consumo é cobrada por unidade de energia elétrica consumida, isto é R\$/kWh, enquanto a tarifa de demanda é cobrada em R\$/kW. A demanda apresenta um valor fixo que está relacionado com a potência instalada.

A potência instalada é a potência solicitada pelo consumidor à concessionária de energia elétrica para alimentar todos os seus equipamentos elétricos. Assim, é necessário determinar as potências de todos os equipamentos elétricos que o consumidor necessitará acionar para assim, definir a potência instalada.

Como neste estudo será considerado o acionamento de apenas um conjunto motor e bomba (uma vez que ou outro é para reserva), foi desenvolvida rotina para que o programa buscasse um motor elétrico comercial com potência mecânica igual ou imediatamente superior à maior potência solicitada pela bomba dentre os anos 1 e 20. Como a potência solicitada pela bomba é maior no ano 1, esta potência foi utilizada para a seleção.

A seleção foi realizada utilizando vetor contendo todos os valores de potências nominais de motores elétricos utilizados em bombas que normalmente são comercializadas no mercado. Os valores das potências nominais utilizadas são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Potências dos motores elétricos comercializados.

Potências nominais dos motores elétricos (em cv)								
0,2	0,8	3,0	7,5	20,0	50,0	125,0	250,0	450,0
0,3	1,0	4,0	10,0	25,0	60,0	150,0	300,0	500,0
0,3	1,5	5,0	12,5	30,0	75,0	175,0	350,0	550
0,5	2,0	6,0	15,0	40,0	100,0	200,0	400,0	

Fonte: WEG (2020)

Encontrada a potência nominal do motor elétrico comercial, foi possível determinar a potência instalada pela equação (66).

$$P_{\text{inst}} = \frac{P_{\text{com}}}{\eta_{\text{me}}} \quad (66)$$

Onde P_{inst} é a potência instalada, em kW; P_{com} é a potência comercial (nominal ou mecânica) do motor elétrico, em kW e η_{me} é o rendimento do motor elétrico obtido pela equação (54).

As tarifas de consumo e de demanda variam de acordo com a modalidade tarifária contratada. Esta modalidade pode ser convencional, branca, horossazonal azul ou horossazonal verde.

Além das tarifas já conhecidas, existem as bandeiras tarifárias que modificam o valor de cobrança pelo uso da energia elétrica de acordo com as condições de geração. Como essas condições estão sujeitas a grandes variações, as bandeiras tarifárias não foram consideradas para o cálculo do custo de operação.

Como nesta pesquisa busca-se reduzir o custo operacional diminuindo ou evitando o bombeamento no horário de ponta, foi utilizada a modalidade tarifária verde, que passa a ser interessante para consumidores que podem desligar parte de seus equipamentos no horário da ponta, ou utilizam seus equipamentos por pouco tempo neste horário (COURA, 2007). Vale ressaltar que este mesmo tipo de tarifa foi utilizado por Kuritza (2017) para minimizar custo de operação em sistemas de bombeamento com rotação variável.

Foram utilizadas de tarifas vigentes na Companhia Estadual de Energia – Rio Grande do Sul (CEEE/RS), para a modalidade tarifária verde. Além das tarifas, foram consideradas as alíquotas de imposto para o Programa de Integração Social (PIS), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) e o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) que são utilizados no cálculo do preço final da energia elétrica.

As alíquotas de PIS e COFINS variam ao longo do mês, dessa forma, foi necessário determinar uma média para obter um valor único. Para isso, foi utilizada a série histórica valores de alíquotas de PIS e COFINS disponibilizada pela CEEE (anexo II), de agosto de 2005 a fevereiro de 2019. Esses valores foram plotados no gráfico da Figura 4.12.

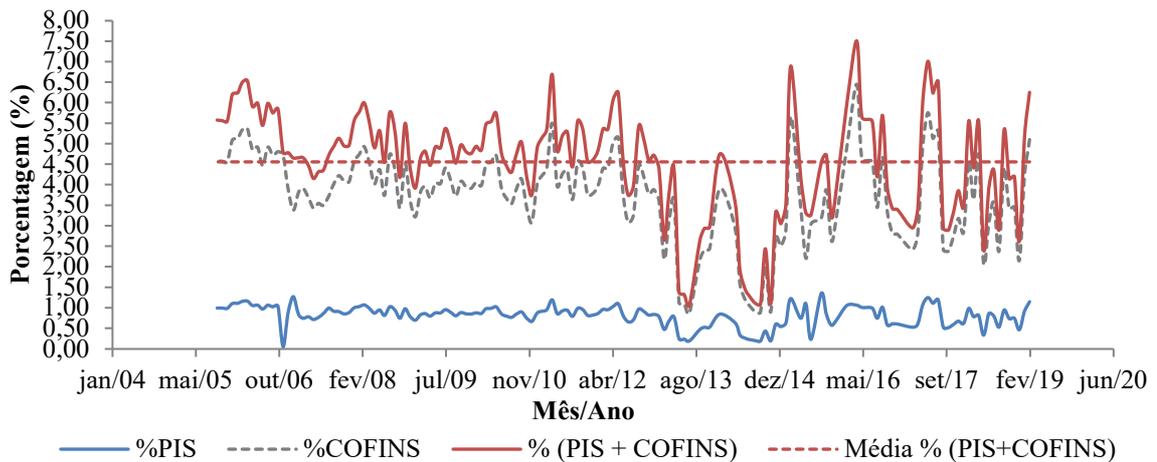


Figura 4.12 - PIS, COFINS e PIS+COFINS de outubro de 2005 a fevereiro de 2019.
Fonte: CEEE/RS (2019)

O valor médio para a alíquota de PIS+COFINS da série histórica foi de 4,56 %,

De acordo com a CEEE/RS (2018), a partir de 22/11/2018 a alíquota de ICMS para consumidores do grupo A, residencial (acima de 50 kWh), comercial, poderes públicos, serviços públicos e rurais (sem CPR), é de 30%. Valor este que foi utilizado no estudo.

Os valores de tarifa verde para consumo dentro e fora de ponta (ver folder de tarifas no anexo III) e as alíquotas de impostos praticados no Rio Grande do Sul são observados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Tarifas de consumo, demanda e impostos para a modalidade tarifária verde.

Modalidade Tarifária Verde		
Consumo Ponta	R\$/kWh	1,515010
Consumo fora de ponta	R\$/kWh	0,324990
Demanda	R\$/kW	18,89
ICMS		30%
PIS+COFINS		4,75%

Fonte: CEEE/RS (2018), CEEE/RS (2019).

O custo parcial, isto é, sem impostos foi obtido pela expressão (67).

$$CO_{Si(k)} = T_p \cdot CE_{p(k)} + T_{fp} \cdot CE_{fp(k)} + T_D \cdot D_C \quad (67)$$

Onde CO_{Si} é o custo mensal de operação no ano k , sem considerar os impostos, em R\$; T_p é a tarifa de consumo no horário de ponta, em R\$/kWh; CE_p é a energia elétrica consumida no

horário de ponta, em kWh; T_{Fp} é a tarifa de consumo no horário fora de ponta, em R\$/kWh; CE_{Fp} é a energia elétrica consumida no horário fora de ponta kWh; T_D é a tarifa de demanda, em R\$/kW e D_C é a demanda contratada, ou potência instalada, em kW.

Para o custo final (com impostos), pode ser utilizada a expressão (68)

$$CO_{(k)} = \frac{CO_{si(k)}}{(1 - PIS - COFINS - ICMS)} \quad (68)$$

Onde CO é o custo mensal de operação no ano k, considerando os impostos (em R\$); PIS é o imposto para o Programa de Integração Social, COFINS é a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social e ICMS é o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços.

Inicialmente a rotina de operação do sistema de bombeamento foi desenvolvida para um mês, no entanto, o esforço computacional foi excessivo e inviabilizou a análise. Com isso, optou-se por desenvolver a rotina de bombeamento para cinco dias e multiplicar os resultados operacionais por 6, para que as estimativas de custos com os resultados mensais (30 dias) e posteriormente, anuais, pudessem ser realizadas.

Conforme discutido no item 3.1, os custos de operação de um sistema de bombeamento são uma modalidade diferente se comparados aos custos de implantação desse sistema. Por este motivo é preciso que se converta um dos custos na modalidade do outro, para que, desta forma, possam ser somados. Diante dessa lógica, optou-se pela conversão dos custos de operação (custos variáveis) em custos fixos para que estes pudessem ser somados ao custo de implantação do sistema, e assim, fornecer o custo total.

Para a obtenção do custo de operação, foi necessário determinar inicialmente as vazões de bombeamento e posteriormente a energia elétrica consumida em cada um dos 20 anos do horizonte de projeto. Para essa determinação, seria necessário incluir mais 18 variáveis de decisão no problema, totalizando apenas para a determinação das vazões de bombeamento anuais, 20 variáveis de decisão a serem testadas pelo algoritmo SCE-UA, sendo que cada variável de busca representaria uma vazão de bombeamento no horizonte de projeto. Esse número relativamente elevado de parâmetros inviabilizou a análise devido ao esforço computacional elevado.

Como solução alternativa, os custos operacionais dos anos intermediários ao ano 1 e ano 20 (que tiveram suas vazões de bombeamento otimizadas) foram estimados por meio de um

ajuste linear entre o custo operacional do ano 1 e do ano 20, conforme exemplificado na Figura 4.13.

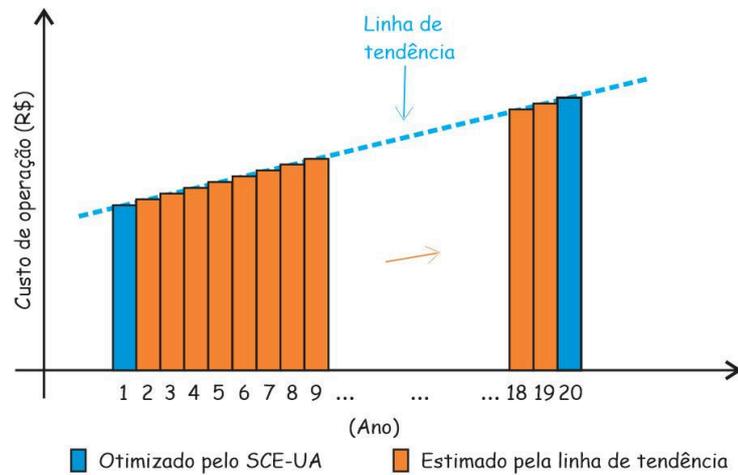


Figura 4.13 - Estimativa dos custos operacionais anuais intermediários ao ano 1 e ano 20.

É importante observar que a metodologia utilizada na Figura 4.13 não é a ideal, uma vez que a variação dos custos de um sistema de bombeamento ao longo dos anos depende do envelhecimento da tubulação, desgaste do equipamento eletromecânico e aumento do consumo de água, podendo não ser linear. Neste estudo não foi estimado desgaste do conjunto elevatório, devido às grandes incertezas relacionadas à manutenção, no entanto, determinando-se o custo operacional no primeiro e no último ano, foi possível delimitar com certa aproximação o custo total de operação ao longo de todo o horizonte de projeto. Diz-se com certa aproximação, porque foi possível estimar o custo no ano 1 e 20 (barras azuis da Figura 4.13.). Logo, calculando a diferença entre os custos operacionais no ano 20 e no ano 1, determina-se a amplitude total desse custo durante o horizonte de projeto. Sabe-se que os custos operacionais intermediários aos do ano 1 e 20 (barras alaranjadas da Figura 4.13), independentemente de terem variação linear ou não, estarão dentro do valor de amplitude total dos custos operacionais do horizonte de projeto.

Os custos anuais de operação obtidos foram corrigidos utilizando inflação da tarifa de energia elétrica de 8,1%. Para a conversão, foi utilizada a equação (69) reorganizada a partir da equação (21) discutida no item 3.1.

$$VFE_{(k)} = VE_{(k)} \cdot (1 + e)^k \quad (69)$$

Onde VFE é o valor do custo de operação no ano k, corrigido (em R\$); VE é o valor do custo de operação no ano k, sem correção (em R\$) e e é a inflação da tarifa de energia elétrica.

Com os custos anuais de operação corrigidos, estes foram trazidos para valor presente com taxa de 10% ao ano (GOMES, 2009b) utilizando a equação (21).

$$VP_{(k)} = VFE_{(k)} \cdot \left[\frac{1}{(1 + i)^k} \right] \quad (21)$$

Onde VP é o custo em valor presente da energia elétrica consumida no ano k (em R\$); VFE é o valor do custo de operação no ano k, corrigido (em R\$) e i é a taxa de juros anual.

Após a conversão dos custos anuais para custos em valor presente (custo fixo), esses custos foram somados, resultando no custo total, necessário para operar o sistema de bombeamento ao longo dos 20 anos de horizonte de projeto.

4.5 ESTIMATIVA DO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

Referem-se tanto à aquisição dos componentes do sistema de bombeamento, no caso, tubulações, conexões, válvulas, equipamentos eletromecânicos e dispositivos de proteção contra os transientes, como as obras civis necessárias para a construção deste sistema, isto é, assentamento dos tubos, execução estrutural e montagem dos componentes.

Como o reservatório elevado é uma das unidades do sistema com maior impacto no custo de implantação, seu volume útil (V_u) foi utilizado como a terceira variável de decisão (x3). De acordo com Tsutiya (2006b) a capacidade do reservatório elevado pode variar, sendo comum utilizar entre 10 e 20% do valor total da capacidade de reserva necessária. O valor de 1/30 do volume diário distribuído no dia de maior consumo também pode ser utilizado como capacidade mínima para o reservatório elevado.

Em geral os reservatórios elevados têm sua capacidade máxima limitada a 1000 m³, devido problemas econômicos e estéticos, sendo mais comum a capacidade máxima de 500 m³ (TSUTIYA, 2006b).

Com base nas informações da literatura, foi utilizado o valor de 1/30 do volume diário consumido (V_c) no ano 20 como limite inferior para V_u , enquanto para o limite superior, foi estabelecido o valor de 1000 m³.

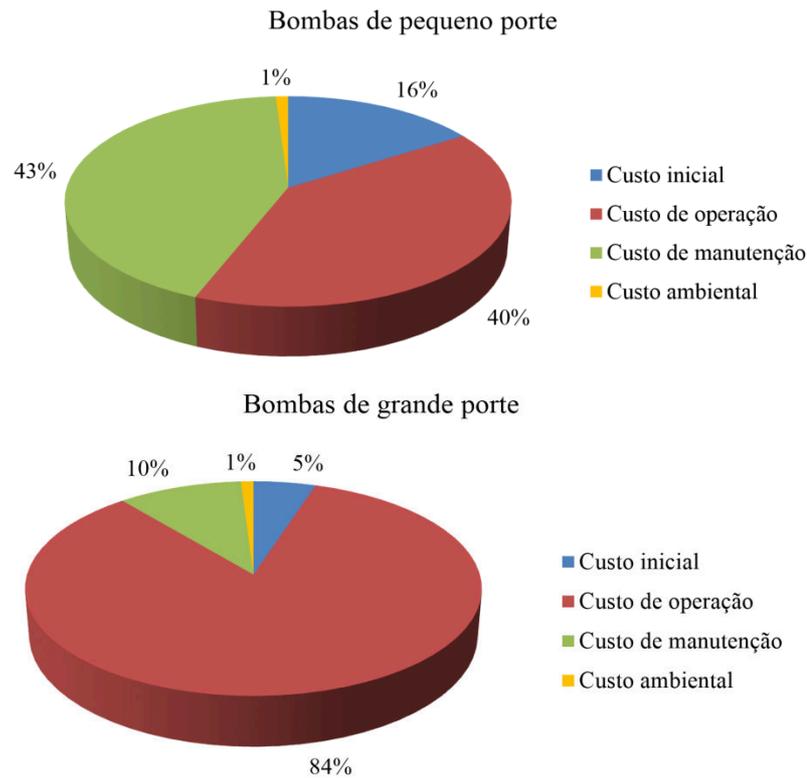
Assim o algoritmo irá testar soluções para o V_u dentro dos intervalos já mencionados, isto é: $(1/30) \cdot V_c \leq V_u \leq 1000 \text{ m}^3$

As equações utilizadas para a estimativa do custo de implantação podem ser observadas no anexo IV.

4.6 ESTIMATIVA DO CUSTO DE MANUTENÇÃO E OUTROS CUSTOS

De acordo com Sahoo *et al*, 2009, além dos custos de implantação (ou iniciais) e do custo com energia elétrica, existem os custos de manutenção e outros custos. O custo de manutenção e reparo do sistema de bombeamento durante sua vida útil está dividido em custo da mão de obra, desmonte, transporte e limpeza. Para Grundofs Sarlin Pumps (2000) *apud* Marques (2001) o custo de manutenção e reparos de bombas de pequeno porte corresponde a 43% do CCV, enquanto este mesmo custo para bombas de grande porte representa 10 % do CCV. Para o referido autor, o custo ambiental de bombas de grande e pequeno porte corresponde a 1% do CCV, sendo em muitos casos, desconsiderado. Este custo, que para Grundofs Sarlin Pumps (2000), está mais associado a bombeamento de líquidos perigosos (não é o caso neste estudo), foi incluído, pois também poderá representar as licenças ambientais para implantação e funcionamento do sistema de bombeamento. No Brasil as questões ambientais evoluíram, estando mais rigorosas e gerando custos maiores, e por isso, devem ser consideradas. Outros custos que poderiam fazer parte do CCV são o custo do período de inatividade e custos de descomissionamento (desativação) ou descarte. O custo do período de inatividade não foi considerado neste estudo, pois a concepção do sistema de bombeamento desta pesquisa inclui uma bomba reserva o que minimiza o risco de ocorrência de inatividade. Como os sistemas de bombeamento de água, ao final do seu horizonte de projeto são normalmente reavaliados e, quando possível, reaproveitados como sistema existente, os custos de descomissionamento são geralmente inexistentes ou modestos, o que pode não ocorrer quando se tratar de bombeamento de líquidos perigosos. O projeto e a construção do sistema têm pouco efeito nos custos de desativação e descarte. Por este motivo, os custos de descarte ou descomissionamento também não estão sendo considerados nesta análise.

Na Figura 4.14 pode ser observada composição dos custos do CCV para bombas.



*Figura 4.14 - Distribuição típica de custos para bombas.
Fonte: Grundofs Sarlin Pumps (2000) apud Marques (2001).*

Devido o custo de manutenção variar com o porte da bomba, e não haver consenso definitivo sobre o limite que define bomba ou sistema de bombeamento como sendo de grande ou pequeno porte (podem ser classificadas por sua carga, capacidade hidráulica, método construtivo, potência, entre outros), neste estudo foi adaptada a classificação baseada na capacidade hidráulica proposta por Tsutiya e Além Sobrinho (2011) para estações de elevatórias de esgoto. Vale ressaltar que, mesmo se tratando de esgoto, os critérios hidráulicos de dimensionamento do sistema de bombeamento são em geral os mesmos de um sistema de bombeamento de água, com exceção aos aspectos relacionados ao teor de sólidos, septicidade e corrosividade do esgoto. A classificação proposta por Tsutiya e Além Sobrinho (2011) é observada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Classificação das estações elevatórias de esgoto baseada na capacidade hidráulica.

Tipo de estação de bombeamento	Capacidade (l/s)
Pequena	50
Média	50 a 500
Grande	Maior que 500

Fonte: Tsutiya e Além Sobrinho (2011).

Na adaptação da Tabela 4.8, realizada por este autor, a classificação das estações de bombeamento de porte médio, cuja capacidade vai de 50 L/s a 500 L/s, foi movida para classificação de estações de bombeamento de grande porte (ver Tabela 4.9).

Tabela 4.9 - Classificação das estações elevatórias utilizadas neste estudo.

Tipo de estação de bombeamento	Capacidade (l/s)
Pequena	50
Grande	Maior que 50

Para a determinação dos custos de manutenção e ambiental, foi criada uma rotina computacional em que, caso a vazão bombeada fosse menor ou igual a 50 l/s, o sistema de bombeamento é considerado de pequeno porte, com isso, o cálculo dos custos de manutenção e ambiental são realizados considerando que a soma do custo de implantação (16% do CCV) e operação do sistema (40% do CCV) correspondem a 56% do CCV (Figura 4.13). Sabendo-se que para bomba de pequeno porte, o custo de manutenção corresponde a 43% do CCV e o custo ambiental corresponde a 1% do CCV, estes custos foram calculados pelas equações (70 e (71.

$$CM = \frac{(CI + CO) * 43}{56} \quad (70)$$

$$CA = \frac{(CI + CO) * 1}{56} \quad (71)$$

Caso a vazão bombeada fosse maior que 50 l/s, a soma dos custos de implantação (5% do CCV) e operação do sistema (84% do CCV) correspondem a 89% do CCV (Figura 4.13). E o cálculo dos custos de manutenção e ambiental foram realizados pelas equações (72 e (73.

$$CM = \frac{(CI + CO) * 10}{89} \quad (72)$$

$$CA = \frac{(CI + CO) * 1}{89} \quad (73)$$

Onde CM é o custo de manutenção, em R\$; CA é o custo ambiental, em R\$; CI é o custo de implantação (ou custo inicial), em R\$ e CO é o custo de operação (ou de energia elétrica) em R\$.

Vale ressaltar que o uso dos percentuais para a determinação dos custos de manutenção e ambiental, são alternativa à falta de modelos de custo para esses componentes do CCV dos sistemas de bombeamento de água.

4.7 MODELO PARA REGRA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

A otimização das variáveis de decisão para cada combinação geométrica do sistema de bombeamento acionado por chave boia, foi realizada a fim de se obter regra de operação que resultasse em menor custo com operação e implantação. Como os custos de manutenção e ambiental representam percentuais do CCV, estes também foram reduzidos.

A função-objetivo, que é dada pela soma do custo de operação, implantação, manutenção e ambiental (isto é, o CCV), foi minimizada utilizando o algoritmo SCE-UA. Foi adotada a versão do algoritmo SCE-UA, disponível no site www.mathwoks.com. Inicialmente, o algoritmo SCE-UA precisou ser parametrizado de acordo com o problema desta pesquisa. Foram realizados diversos teste iniciais para determinar o número de indivíduos necessários para a população inicial no algoritmo. Foi analisado também o número de interações necessárias para a otimização e o tempo necessário para o algoritmo convergir para a solução ótima global. Parametrizado o algoritmo, foram testadas diversas vezes a mesmas combinações, de modo a verificar se os valores ótimos globais encontrados pelo algoritmo foram os mesmos para suas respectivas combinações.

Finalizados os testes iniciais, a parametrização do algoritmo SCE-UA foi realizada da seguinte forma:

- Número de complexos: 15;
- Número de pontos em cada complexo: 50;
- Número de interações: 100.000;
- Critério de parada: caso o algoritmo ultrapasse as 100.000 gerações ou caso as melhores soluções dos cinco últimos loops apresentarem diferença inferior a 0,01%, o algoritmo encerra a busca (Figura 4.15).

```

Evolution Loop: 4 - Trial - 6432
BESTF : 21441519.2364
BESTX : 1.015669      0.1589912      999.8305
WORSTF : 27514907.0034
WORSTX : 1.083874      0.1762211      992.6565

Evolution Loop: 5 - Trial - 7931
BESTF : 21441519.2364
BESTX : 1.015669      0.1589912      999.8305
WORSTF : 27514907.0034
WORSTX : 1.083874      0.1762211      992.6565

THE BEST POINT HAS IMPROVED IN LAST 5 LOOPS BY LESS THAN THE THRESHOLD 0.01%
CONVERGENCY HAS ACHIEVED BASED ON OBJECTIVE FUNCTION CRITERIA!!!
SEARCH WAS STOPPED AT TRIAL NUMBER: 7931
NORMALIZED GEOMETRIC RANGE = 0.99832
THE BEST POINT HAS IMPROVED IN LAST 5 LOOPS BY 0%

```

Figura 4.15 - Critério de parada do algoritmo SCE-UA quando não há melhora no valor da solução otimizada os últimos 5 loops.

- O restante da parametrização foi mantido na forma padrão, conforme disponibilizada no site.

É importante observar que mesmo o algoritmo SCE-UA tendo sido configurado para 100.000 interações, em todas as combinações otimizadas este não ultrapassou 50.000 interações para obter cada solução. No entanto, por segurança, as 100.000 interações foram mantidas.

A seguir, a descrição das etapas para o cálculo da função-objetivo.

- 1) Discretização das curvas de consumo de água: conforme observado no item 4.2, a curva de consumo de água de uma localidade foi transformada em 2 curvas, para descrever o crescimento do consumo de água no início e no fim do horizonte de projeto. As curvas possuíam 24 valores para representar a variação horária de consumo ao longo do dia, e foram discretizadas em intervalos de um minuto para melhorar o detalhamento operacional, o que resultou em 1440 valores para cada curva.
- 2) Leitura dos valores de altura geométrica (Hg), comprimento (L) e diâmetro interno (Di): o programa faz a leitura do arquivo com os valores das combinações de Hg, L e Di.
- 3) Material da tubulação: o material utilizado para a tubulação foi o F^oF^o, representado pelo coeficiente C. A equação (41) foi utilizada para representar o envelhecimento do tubo no ano 1 e 20.
- 4) População inicial do modelo de otimização: o algoritmo gerou a população inicial, aleatoriamente, no entanto, respeitando os limites inferiores e superiores das variáveis de decisão. No caso, para x1 (Qb₁/Qb₂₀), x2 (Qb₂₀) e x3 (Volume útil do reservatório), os limites são observados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - limites de busca para x1, x2 e x3.

Parâmetro	Limites	
	Inferior	Superior
x1	1,0	1,20
x2	$Q_{\max 20}$ (m ³ /s)	$3,25 \cdot \pi \cdot D_i^2 / 4$ (m ³ /s)
x3	$V_{d20} / 30$ (m ³)	1000 m ³

V_{d20} – Volume diário consumido no ano 20.

A partir da população inicial que representa a primeira solução, a função-objetivo passa a ser avaliada para cada solução candidata, gerada pelo algoritmo.

- a) Cálculo do tempo de bombeamento: com as vazões de bombeamento e volume de reservação gerados pelo algoritmo SCE-UA como uma solução candidata, os tempos de bombeamento, para o ano 1 e ano 20 são calculados, conforme discutido no item 4.4. Esses tempos de bombeamento, quando multiplicado às vazões de bombeamento do ano 1 e ano 20 (que são vazões fixas, por se tratar de um sistema acionado por chave-boia), devem ser capaz gerar volume de reservação suficiente para atender à demanda diária de consumo de água.
- b) Alturas manométricas: as alturas manométricas do sistema (H_{ms}) foram obtidas por meio da equação (42), enquanto a altura manométrica da bomba (H_{mb}) foi obtida pela equação (45).
- c) Verificação da necessidade de chaminé de equilíbrio: foi realizada por meio dos métodos discutidos no item 3.3.1.1. Caso o sistema necessitasse de chaminé de equilíbrio, esta seria incluída no custo de implantação e seu dimensionamento seria realizado conforme a metodologia apresentada no referido item. O custo de seu volume seria calculado pela equação 8, do item 0.
- d) Rotação específica: foi obtida por meio da equação (51).
- e) Os rendimentos da bomba: foram obtidos pela equação (50) e equação (53).
- f) Potência mecânica: foi obtida pela equação (55).
- g) Rendimento do motor: foi obtido pela equação (54)
- h) Potência elétrica: Foi obtida pela equação (56).

- i) Potência instalada: foi determinada por meio de um método iterativo de seleção de potências nominais de motores elétricos comercializados no mercado (ver item 4.4). Selecionado o motor comercial, a potência instalada foi determinada pela equação (66).
- j) Definição da regra de operação do sistema de bombeamento: foi programada regra de acionamento do conjunto elevatório de acordo com o volume de água acumulado no reservatório elevado (ver item 4.4). Neste estudo, não foi considerada a forma ou utilizados os níveis de água no reservatório para a operação do sistema de bombeamento.
- k) Energia Elétrica consumida: definidas as potências elétricas e a rotina operacional do conjunto elevatório, foi possível calcular a energia elétrica consumida pelo sistema utilizando a equação (57).
- l) Cálculo do custo de operação: obtido de acordo com a equação (68), (69) e (21).
- m) Cálculo do custo de implantação: foi obtido pela equação (74) que é a soma das equações disponíveis no anexo IV.

$$CI = C_{\text{Adutora}} + C_{\text{CMB}} + C_{\text{Reservatório}} + C_{\text{Chaminé}} \quad (74)$$

- n) Cálculo do custo de manutenção e outros: foram estimados de acordo com a metodologia apresentada no item 4.6.
- o) Cálculo da função-objetivo: foi obtida a partir da equação (75),

$$FO = CO + CI + CM + CA + \textit{penal} \quad (75)$$

Onde FO é a função objetivo (em R\$); CCV é o custo do ciclo de vida do sistema de bombeamento (em R\$); CO é o custo de operação do sistema em todo o horizonte de projeto (em R\$); CI é o custo de implantação ou custo inicial do sistema (em R\$); CM é o custo de manutenção do sistema (em R\$); CA é o custo ambiental do sistema (em R\$); *penal* é a penalidade, no valor de R\$ 1000.000,00 atribuída às soluções que resultassem em velocidade no ano 1 maior que 3,25 m/s, pois como o limite superior de velocidade para o ano 20 é de 3,25 m/s, a velocidade no ano 1 deve obrigatoriamente ser maior (sistema novo). Com a penalidade, o algoritmo de otimização irá buscar soluções mais baratas, que são aquelas em que as vazões no ano 20, resultam em velocidades inferiores a 3,25 m/s, permitindo que a faixa de velocidades recomendada

pela NBR 12215/2017 seja explorada até as proximidades do seu limite, que é de 3 m/s. O valor de R\$ 1000.000,00 como penalidade foi utilizado por Kuritza (2017), autor do qual foram utilizadas equações de custo para a modelagem do problema deste estudo. Como a escala de custos é similar, devido as equações utilizadas do trabalho do autor, o valor foi testado, e se mostrou apropriado para o problema deste estudo.

- 5) Com a função objetivo, o algoritmo inicia a interação (ver item 3.4.2) para encontrar a melhor solução (melhor conjunto de valores das variáveis de decisão) que resulta em melhor valor da função-objetivo. Na sequência, novas soluções são geradas a partir da existente na população, e novamente, a função objetivo é avaliada.
- 6) Finalizadas as interações, é obtida a regra de operação otimizada e o CCV para o sistema de bombeamento de água acionado por chave-boia.

4.8 INDICADORES

Foram calculados indicadores para o sistema de bombeamento. Esses indicadores auxiliam na tomada de decisão sobre ações de redução do consumo, custo com energia elétrica e planejamento financeiro no que diz respeito à viabilidade de implantação e operação do sistema. Por meio desses indicadores, foi possível realizar análises comparativas entre diversas combinações de parâmetros geométricos Hg, L e Di.

Os indicadores utilizados foram os seguintes:

- 1) Energia elétrica consumida no mês (kWh/mês): indica o consumo de energia elétrica destinado à operação do sistema de bombeamento durante um mês. Esse indicador pode ser a base para justificar alguns parâmetros operacionais, como o número de acionamentos e número de horas de bombeamento do CMB. No entanto não reflete as despesas operacionais já que o custo do kWh pode variar em um dia de operação, isto é, dois sistemas cujo consumo de energia diário sejam idênticos, podem ter custos operacionais diferentes, dependendo do período do dia em que a energia elétrica foi consumida.
- 2) Consumo Específico de Energia (kWh/m³): o CEE foi discutido no item 3.2.1.1.
- 3) Consumo Específico de Energia Normalizado (kWh/m³/100 m): o CEE_N foi tratado no item 3.2.1.2
- 4) Fator de carga: o FC foi discutido no 3.2.1.3.
- 5) Rendimentos da bomba e do motor (%): foi obtido pelas equações (50) e (54), descritas no item 4.4.

- 6) CCV: obtido pela soma do CO, CI, CM e CA. O CCV é a função objetivo otimizada pelo algoritmo SCE-UA, conforme a equação (75).

$$CCV = CO + CI + CM + C \quad (762)$$

- 7) Custo de operação (%): razão entre o custo de operação e o CCV, conforme a equação (77). Esse indicador determina a porcentagem que o custo operacional ocupa de todo o valor do custo global.

$$CO_{\%} = \frac{CO}{CCV} \cdot 100 \quad (77)$$

- 8) Custo de implantação (%): razão entre o custo de implantação e o CCV, conforme a equação (78).

$$CI_{\%} = \frac{CI}{CCV} \cdot 100 \quad (78)$$

Esse indicador determina o percentual que o custo de implantação ocupa de todo o valor do CCV.

- 9) Velocidades mínima e máxima: as velocidades determinadas são velocidades econômicas, assim poderão ser utilizadas para dimensionamento econômico de sistemas de bombeamento de água (KURITZA, 2017).
- 10) Perda de carga relativa (%): razão entre o a perda de carga (J_t) e a altura geométrica (H_g) do sistema equação (79).

$$Jt_{\%} = \frac{J_t}{H_g} \cdot 100 \quad (79)$$

Esse indicador determina o percentual que as perdas de carga representaram das alturas geométricas de seus sistemas.

- 11) Volume útil do reservatório (%): razão entre o volume útil do reservatório elevado (V_u) e a demanda de água consumida diariamente no ano 20. Equação (78).

$$Vu_{\%} = \frac{Vu}{d_{\text{manda20}}} \cdot 100 \quad (80)$$

Esse indicador determina o percentual que volume útil do reservatório elevado representou do volume diário consumido no ano 20.

12) Vazão máxima consumida (%): razão entre o a vazão de bombeamento no ano 1 (Qb1) e a e a vazão máxima consumida no ano 20. Equação (82).

$$Qc20max_{\%} = \frac{Qb1}{Qc20max} \cdot 100 \quad (81)$$

Esse indicador determina o percentual de crescimento da vazão de consumo no ano 20 em relação à vazão de bombeamento no ano 1..

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo foi desenvolvido um programa para minimizar a função objetivo que estima Custo do Ciclo de Vida (CCV) de um sistema de bombeamento de água em ferro fundido, com dois conjuntos motor e bomba (um operante e outro reserva), acionados por chave-boia. Neste programa, que é a implementação do modelo de simulação denominado “**SRC**”⁹, foi acoplado um modelo de otimização. O algoritmo SCE-UA, que minimiza o CCV.

O CCV é a soma do Custo de Implantação (CI) ou Custo Inicial, Custo de Operação (CO), Custo de Manutenção (CM), Custo Ambiental (CA). Desse modo o algoritmo SCE-UA minimizou os dois principais custos da composição do CCV, no caso o CI e o CO, pois foram modelados matematicamente, enquanto o CM e o CA foram determinados pelos percentuais que estes custos representam do CCV. Estes percentuais foram obtidos a partir da literatura técnica. A fim de buscar um CCV ainda menor, foi estabelecida faixa operacional de maior confiabilidade para a bomba, de modo a minimizar o desgaste do equipamento diminuindo desta forma o CM.

5.1 INFORMAÇÕES GERADAS PELO SRC

Inicialmente, são apresentados como resultados deste estudo, as principais informações geradas pelo **SRC**, sendo a primeira delas, a rotina operacional otimizada para 5 dias no sistema com $H_g = 75 \text{ m}$ / $L = 1000 \text{ m}$ / $D_i = 274 \text{ mm}$, associado à curva de consumo de água do DMAE/RS (Figura 5.1). Nesta figura é observado que no ano 20, os intervalos de tempo em que a bomba permanece ligada são maiores se comparados à operação no ano 1, já que no ano 20 o consumo de água é maior.

Vale observar que cinco dias foi o tempo máximo de operação possível de ser otimizada sem que o esforço computacional comprometesse a pesquisa. Inicialmente foi testado no **SRC** um tempo de operação de 30 dias.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as principais informações operacionais da Figura 5.1, bem como as informações para a análise do CCV. A partir dessas e de outras informações

⁹ SRC – Sistema com Velocidade Rotacional Constate

geradas pelo **SRC** para cada combinação geométrica nas sete diferentes curvas de consumo é que as análises desta pesquisa foram realizadas.

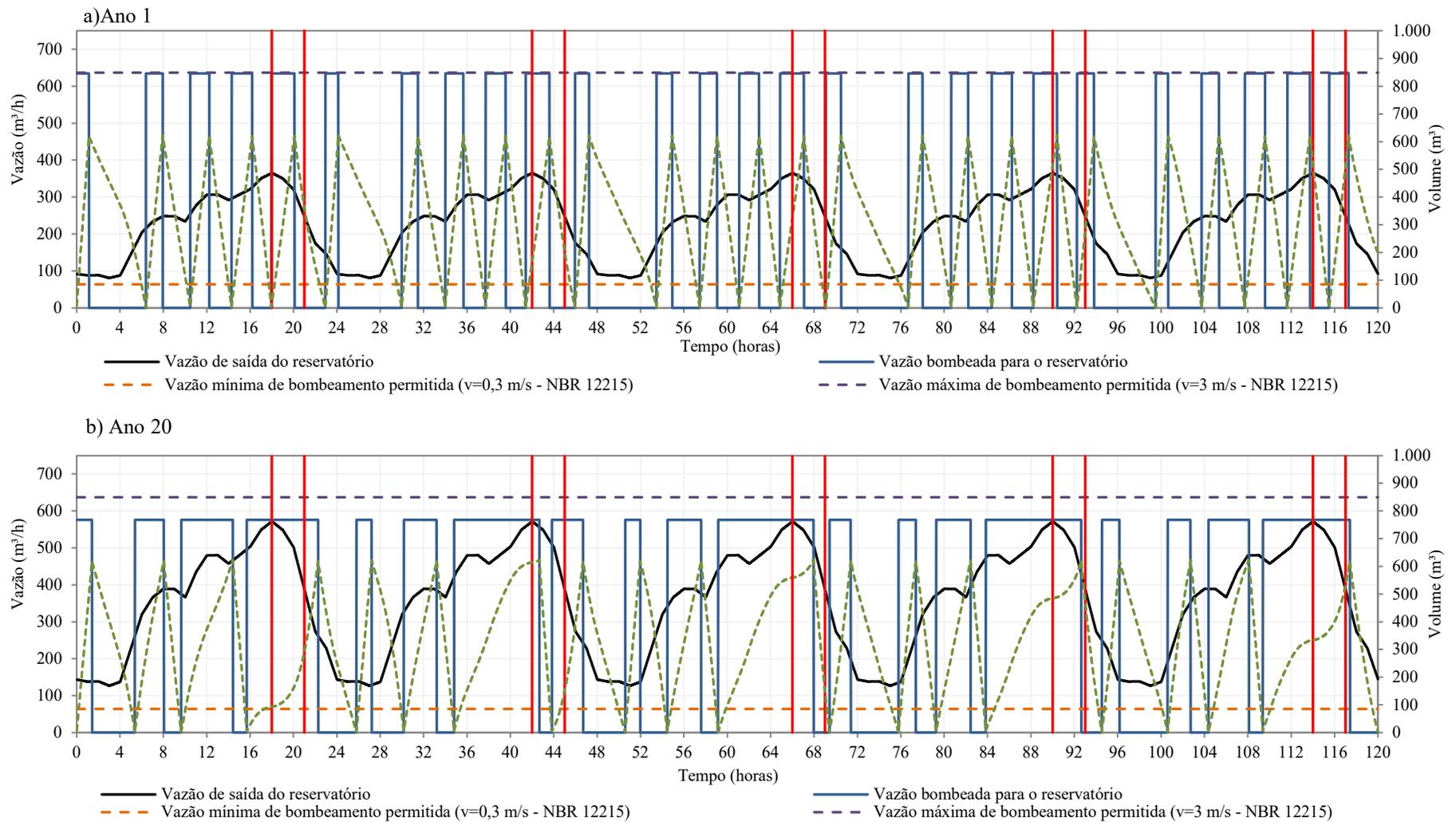


Figura 5.1 - Rotinas de bombeamento durante 5 dias (120 h) de operação geradas pelo SRC para a combinação $H_g = 75$ m / $L = 1000$ m / $D_i = 274$ mm, para suprir a curva de consumo do DMAE ($FD = 0,63$), no ano 1 e no ano 20.

Tabela 5.1 - Resumo dos principais dados gerados pelo SRC para o sistema da Figura 5.1.

1 - Dados de entrada no SRC (inseridos pelo usuário)					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Hg (m)	75	-	-	-	-
L(m)	1000	-	-	-	-
Di (mm)	274	-	-	-	-
C1	129,26	-	-	-	-
C20	105,69	-	-	-	-
2 - Informações da rotina operacional do sistema (valores gerados pelo SRC)					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Qb1 (m³/h)	635,01	tbp1 (h)*	7,47	Vbt1 (m³)*	27.771,29
Qb20 (m³/h)	576,01	tbp20 (h)*	12,47	Vbt20 (m³)*	43.191,29
Qb1/Qb20	1,102	tbfp1 (h)*	36,27	nap1*	2,00
v1(m/s)	2,99	tbfp20 (h)*	62,52	nap20*	1,00
v20(m/s)	2,71	tbt1 (h)*	43,73	nafp1*	24,00
Hf 1(m)	29,17	tbt20 (h)*	74,98	nafp20*	18,00
Hf20 (m)	35,35	Vbp1 (m³)*	4.741,44	nta1*	26,00
Hms1 (m)	104,2	Vbp20 (m³)*	7.180,95	nta20*	19,00
Hms20 (m)	110,35	Vbfp1 (m³)*	23.029,85	vur (m³)*	612,88
Hmb ano1 (m)	104,2	Vbfp20 (m³)*	36.010,34	-	-
3 - Parâmetros da chaminé de equilíbrio (valores gerados pelo SRC)					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Lc (m)	800,00	zd	0,90	Precisa Chaminé?*	1,00
ht (m)	23,34	YD (m)	24,68	-	-
At(m²)	0,06	yE (m)	1,00	-	-
Ac	0,06	yD (m)	1,00	-	-
ye (m)	27,47	YR	0,00	-	-
yd (m)	27,47	Hc (m)	40,80	-	-
k	0,85	Vc (m³)	2,33	-	-
Ze	0,51	L/Hms1	13,33	-	-
YE (m)	14,11	th1	2,93	-	-
4 - Custo de implantação ou Custo inicial (valores gerados pelo SRC)					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Cchamine (R\$)	41.533,40	-	-	-	-
Cres (R\$)	230.387,54	-	-	-	-
Cad (R\$)	413.049,20	-	-	-	-
Cbomb(R\$)	411.028,35	-	-	-	-
5 - Informações sobre a eficiência energética do sistema (valores gerados pelo SRC)					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
ηb1 (%)	81,25	Cp20 (kWh)/mês	16.327,40	CEEN1(kWh/m³/100m)	0,347
ηb20 (%)	82,22	Cfp1 (kWh)/mês	50.020,07	CEEN20(kWh/m³/100m)	0,343
nme20 (%)	96,52	Cfp20 (kWh)/mês	81.877,12	FC1	0,364
Pme1 (kW)	221,87	Ct1 (kWh)/mês	60.318,33	FC20	0,593
Pme20 (kW)	210,68	Ct20 (kWh)/mês	98.204,53	-	-
Pel1 (kW)	229,87	Dc (kW)	229,87	-	-
Pel20 (kW)	218,28	CEE_mes1(kWh/m³)	0,362	-	-
Cp1 (kWh)/mês	10.298,25	CEE_mes20(kWh/m³)	0,379	-	-
6 - Composição do CCV do sistema (valores gerados pelo SRC)					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
CI (R\$)	1.095.998,49	CM (R\$)	1.691.931,89	CCV (R\$)	16.919.318,93
CO (R\$)	13.962.195,36	CA (R\$)	169.193,19	-	-

*Para 5 dias de operação.**Vvalor binário: 1=sim, 0=não. **1 - Dados de entrada do SRC:** Hg-altura geométrica, L-comprimento, Di - diâmetro interno, C- coeficiente de rugosidade da tubulação. **2 - Informações da rotina operacional do sistema:** Qb - vazão de bombeamento, v - velocidade, Hf - perda de carga, Hms - altura manométrica do sistema, Hmb - altura manométrica da bomba, tbp - tempo de bombeamento na ponta; tbfp - tempo de bombeamento fora da ponta, tbt - tempo de bombeamento total, Vbp - volume bombeado na ponta, Vbfp - volume bombeado fora da ponta, Vbt - volume bombeado total, nap - número de acionamentos na ponta, nafp - número de acionamentos fora da ponta, nat - número total de acionamentos, vur - volume útil do reservatório elevado. **3 - Parâmetros da chaminé de equilíbrio:** Lc - comprimento da linha de adução entre a chaminé e o reservatório, ht -, At - área interna da seção transversal da adutora entre o reservatório e a chaminé, Ac - área interna da seção transversal da chaminé -, ye - elevação do N.A. sem considerar as perdas de carga, yd - depleção do N.A. sem considerar as perdas de carga, Jr - perda de carga relativa, Ze -, YE - elevação do N.A. considerando as perdas de carga hidráulica, zd - coeficiente, YD - depleção do N.A. considerando as perdas de carga, yE - Acréscimo de segurança, yD - acréscimo de segurança, YR - depleção máxima do nível do reservatório, Hc - altura da chaminé, Vc - volume da chaminé, th - tempo de desaceleração do escoamento. **4 - Custo de implantação ou custo inicial:** Cchamine - custo da chaminé de equilíbrio, Cres - custo do reservatório elevado, Cad - custo da adutora, Cbomb - custo do conjunto elevatório. **5 - Informações sobre eficiência energética do sistema:** ηb - rendimento da bomba, ηme - rendimento do motor, Pme - potência no eixo do motor, Pel - potência elétrica, Cp - consumo de energia na ponta, Cfp - consumo de energia fora da ponta, Ct - consumo total de energia, Dc - demanda contratada, CEE - consumo específico de energia, CEEN - consumo específico de energia normalizado, FC - fator de caga. **6 - Composição do CCV do sistema:** CI - custo de implantação, CO - custo de operação, CM - custo de manutenção, CA - custo ambiental, CCV - custo do ciclo de vida.

De acordo com Silva e Orrico (2015), a confiabilidade de um sistema de fornecimento de água é definida como o percentual de dias em que a demanda é plenamente atendida em um dado período de análise.

Para qualquer sistema de fornecimento de água, é desejável que o atendimento seja pleno, isto é, com 100% de confiabilidade no fornecimento de água.

Para esta pesquisa, foi determinado que a vazão mínima de bombeamento fosse igual ou superior à vazão máxima da curva de demanda. Essa condição permitiu ao SRC gerar rotina operacional que garante 100% de confiabilidade no fornecimento de água, já que para todas as curvas de demanda simuladas os volumes mínimos bombeados estiveram levemente acima do consumo diário, como pode ser observado na Tabela 5.2, por exemplo, para a curva do DMAE, na qual seu consumo diário foi de 5.514,5 m³/d, e o volume mínimo bombeado (Vb) foi de 5.518,28 m³/d.

Tabela 5.2 - Amplitude dos valores dos parâmetros operacionais e volume útil do reservatório para cada curva de consumo de água.

Curva	Ano	Consumo (m ³ /d)	Vb (m ³ /d)	Hg (m)	L (m)	Di (mm)	Qb (m ³ /h)	% tbp	% tbf p	% tbf p	Vur (m ³)
DMAE/RS	1	5.514,5	5.518,28 até 5.671,27	25 50 75	100 500 1000	274 326 378 429 480 532 635	576,11 até 765,02	21,78 até 55,78	28,67 até 40,75	30,46 até 40,75	288,11 até 992,69
	20	8.637,76	8.638,25 e 8.806,24	25 50 75	100 500 1000	274 326 378 429 480 532 635	572,76 até 762,67	58,00 até 100,00	44,95 até 60,78	47,43 até 63,69	

Hg – altura geométrica, L – comprimento, Di – diâmetro interno, Qb – vazão de bombeamento, tbp – tempo de bombeamento na ponta, tbf p – tempo de bombeamento fora de ponta. Vur – volume útil do reservatório elevado.

5.2 MANUTENÇÃO E VIDA ÚTIL DA BOMBA HIDRÁULICA

A bomba hidráulica é o componente central do sistema de bombeamento, por este motivo, requer atenção especial. Não sendo possível, neste estudo, diminuir o custo do ciclo de vida modelando os custos de manutenção para a bomba, a opção viável foi delimitar as faixas de trabalho do equipamento que resultem em maior confiabilidade. Neste contexto, entende-se por confiabilidade a capacidade da bomba operar nas condições especificadas, ao longo de um período. Quanto maior a confiabilidade, menores as chances de ocorrência de falhas, sendo que

a falha é a incapacidade da bomba de atingir o desempenho operacional previsto. Se menores as falhas, menor custo de manutenção e menor custo do ciclo de vida.

De acordo Bloch (2012), ao operarmos a bomba nas proximidades do ponto de máximo rendimento (PMR), isto é, entre 80% e 110 % do PMR, diminuimos as probabilidades de falha do equipamento, pois nesta faixa operacional, problemas no selo, vedação e rolamento são menores, assim como, a cavitação, que se prolongada pode gerar o desgaste do rotor, comprometendo a eficiência do sistema (ver item 4.4, Figura 4.7).

Na Figura 5.2 são observadas linhas de variação do adimensional Q_{b1}/Q_{b20} em relação ao adimensional L/Hg para cada diâmetro analisado na pesquisa. Para um mesmo diâmetro interno, na medida em que o valor de L/Hg aumenta, é observado que Q_{b1}/Q_{b20} fica mais próximo ou ultrapassa o valor de 1,10 (10% acima do PME). Para Q_{b1}/Q_{b20} maior que 1,10 a confiabilidade do equipamento cai de modo que este fica sujeito aos problemas citados e consequentemente, a mais manutenções e menor vida útil.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.2, que se referem a curva da UFPA, com consumo de $5.401 \text{ m}^3/\text{d}$ no ano 1 e $8.460,451 \text{ m}^3/\text{d}$ no ano 20, se L/Hg do sistema for maior que 13, o uso de $D_i=274 \text{ mm}$ não é recomendado, pois o sistema iniciaria sua operação fora da faixa de maior confiabilidade e, portanto, estaria sujeito a custos de manutenção mais elevados. Do mesmo modo, se o adimensional L/Hg do sistema for maior que 30, $D_i=326 \text{ mm}$ deve ser evitado.

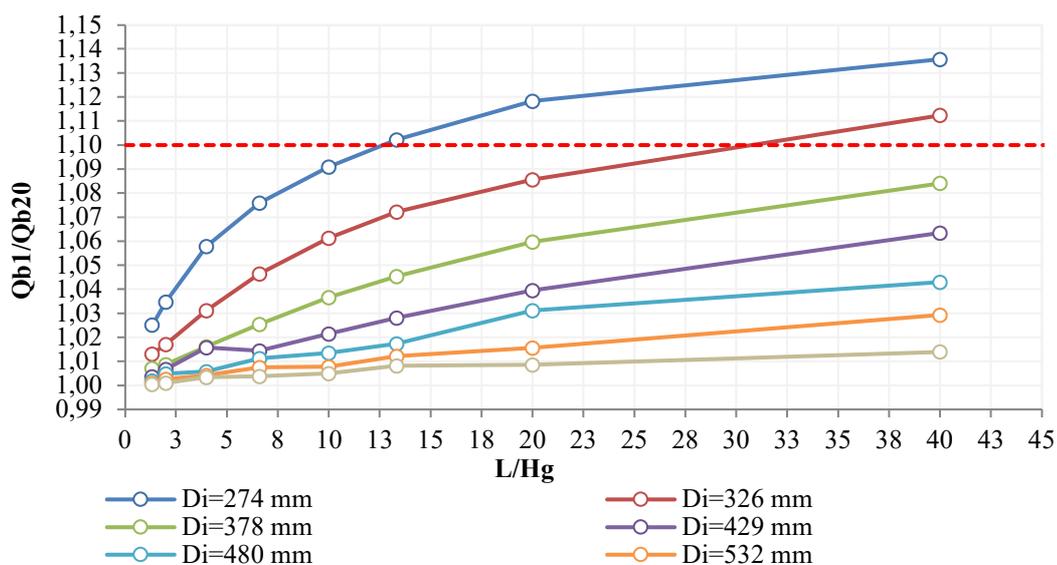


Figura 5.2 – Linhas de variação do adimensional Q_{b1}/Q_{b20} em relação ao adimensional L/Hg para cada D_i , com a curva da UFPA, tendo consumo de $5401,0 \text{ m}^3/\text{d}$ no ano 1 e $8460,451 \text{ m}^3/\text{d}$ no ano 20.

Os resultados da Figura 5.2 valem apenas para as combinações geométricas que tiveram sua regra de operação otimizada, para consumo de 5.401,0 m³/d no ano 1 e 8.460,45 m³/d no ano 20 para a curva da UFPA. Se o consumo diário for consideravelmente diferente, o **SRC** irá buscar novas operações otimizadas para as combinações geométricas. Caso estas operações resultem em Q_b maiores, considerando os mesmos diâmetros, as velocidades de escoamento iriam aumentar, de modo que a linha de variação de Q_{b1}/Q_{b20} em relação ao L/H_g para $D_i=274$ mm e para os outros diâmetros da Figura 5.2 iriam subir, tendendo a se aproximar ou ultrapassar a linha do limite de confiabilidade. Para o caso de $D_i=274$ mm, se a velocidade fosse maior, o limite de adimensional L/H_g recomendado, já não seria mais 13, e sim um valor menor, pois neste caso, a linha de variação de Q_{b1}/Q_{b20} para $D_i=274$ mm da Figura 5.2 teria subido, fazendo com que este diâmetro fique mais restrito para o uso de L/H_g dentro da faixa de confiabilidade da bomba.

Observa-se, desta forma que o parâmetro adequado para o projetista verificar se a bomba opera em faixa mais confiável, não é o diâmetro, mas sim a velocidade.

Na Figura 5.3 são observadas as linhas que descrevem a variação do adimensional Q_{b1}/Q_{b20} em relação à velocidade no primeiro ano de operação (v_1) para cada valor do adimensional L/H_g calculado neste estudo.

Em análise da Figura 5.3, é possível observar que se o sistema de bombeamento a ser projetado tiver L/H_g igual 20, deve-se evitar para esse sistema, diâmetros cuja velocidade de bombeamento no ano inicial resulte em valores maiores que 2,5 m/s.

Pelo gráfico da Figura 5.3, tem-se que, na medida em que as velocidades de bombeamento no ano 1 são menores, a faixa de uso do L/H é maior, isto quer dizer que se o projetista optar por operar dentro de uma faixa de trabalho “confortável” para a bomba, de modo a aumentar sua vida útil, este deve optar por velocidades sempre mais baixas, isto é, velocidades, sempre que possível, mais próximas do limite mínimo recomendado pela NBR 12215/2017, que é de 0,3 para água tratada. Utilizando-se velocidades mais baixas, o projetista tem uma faixa mais ampla de L/H_g para utilizar, como pode ser observado comparando-se $v_1=1$ m/s com $v_1=3$ m/s.

Para v_1 igual a 1 m/s, todos os valores de L/H_g da Figura 5.3, resultam em Q_{b1}/Q_{b20} menor que 1,1, dando maior opção de combinações geométricas para o projetista dimensionar a operação com maior confiabilidade. Por outro lado, para $v_1=3$ m/s, que é o limite máximo de velocidade recomendado pela NBR 12215/2017, todo L/H_g igual ou maior que 13,33 deve ser

evitado, restringindo dessa forma, as combinações geométricas que o projetista poderá usar para o sistema de bombeamento.

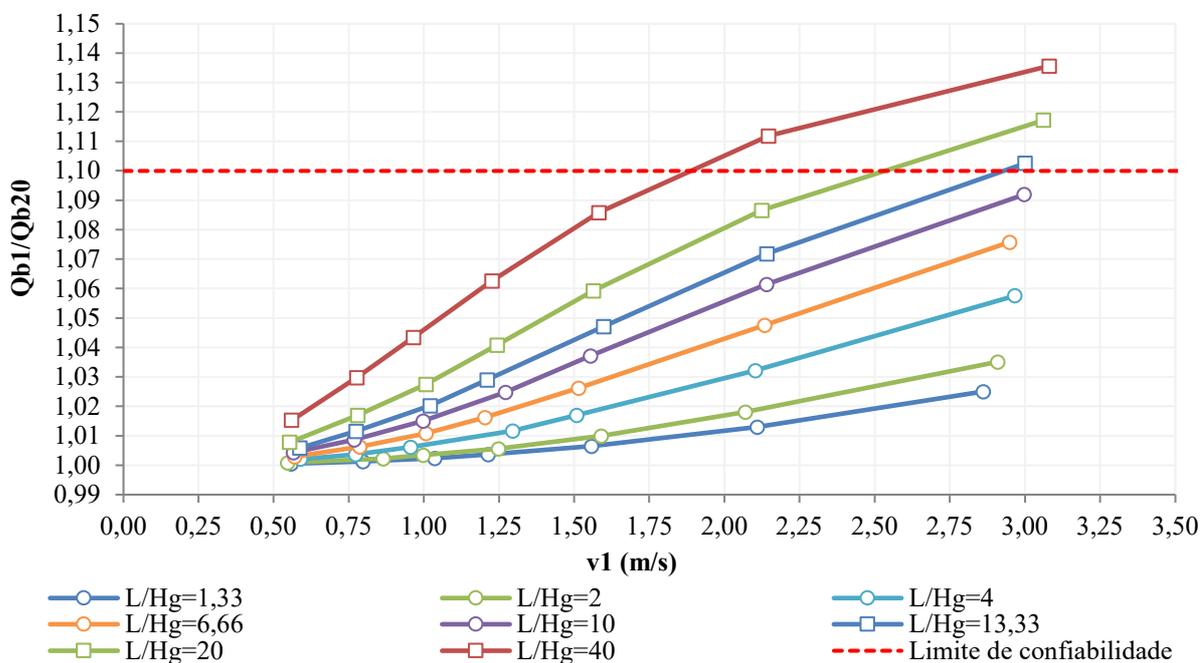


Figura 5.3 - Relação entre a velocidade (v_1), adimensional (L/Hg) e confiabilidade (Q_{b1}/Q_{b20}).

As linhas de variação de Q_{b1}/Q_{b20} em relação a v_1 da Figura 5.3 foram obtidas pela média dos valores gerados pelo **SRC** para as 63 combinações com cada uma das sete curvas utilizadas neste estudo. No total, foram 441 dados ($3H_g \times 3L \times 7D_i \times 7$ curvas) utilizados. Cada um dos 63 valores expressos na Figura 5.3 são uma média de sete valores otimizados pelo **SRC** relativos a cada uma das sete curvas de consumo.

Como as informações da Figura 5.3 foram apresentadas na forma de médias para elucidar o leitor sobre o comportamento dos parâmetros, foi desenvolvida adicionalmente uma equação a partir dos dados brutos gerados pelo **SRC** (isto é, a partir das 441 dados), que representam melhor o exposto na Figura 5.3, permitindo sua aplicação em projetos de estações de bombeamento de água.

Por se tratar de um problema envolvendo três parâmetros, isto é, Q_{b1}/Q_{b20} , L/Hg e v_1 , a equação foi desenvolvida por meio de regressão múltipla. Assim Q_{b1}/Q_{b20} foi selecionada para ser a variável dependente y , enquanto v_1 e L/Hg foram as variáveis independentes x_1 e x_2 , respectivamente.

A regressão foi realizada utilizando nível de confiança de 95%. Os resultados do ajuste são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Ajuste da equação aos dados 441 dados.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,935209572
R-Quadrado	0,874616943
R-quadrado ajustado	0,874044418
Erro padrão	0,012336029
Observações	441

De acordo com os dados da Tabela 5.3, ao menos 87,46 % da variação nos valores do adimensional Q_{b1}/Q_{b20} podem ser explicados pela velocidade de bombeamento no ano inicial de projeto e pelo adimensional L/Hg .

Por meio da análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 5.4, observa-se que o modelo proposto é útil para explicar a variável dependente, visto que o F de significação se manteve abaixo 0,05.

Tabela 5.4 – Análise de Variância (ANOVA).

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	0,464947526	0,232473763	1527,647481	3,2682E-198
Resíduo	438	0,066653799	0,000152178		
Total	440	0,531601325			

gl – graus de liberdade; SQ – soma dos quadrados dos desvios totais; MQ – quadrado médio; F/F de significação – Teste F.

O valor p apresentado na Tabela 5.5, por ser pequeno (menor que 0,05), indica que a equação de regressão múltipla, apresentada após a tabela, tem boa significância geral e é adequada para as predições.

Tabela 5.5 – Coeficientes da equação de regressão múltipla.

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
β_0	0,964365946	0,001400402	688,6350743	0
β_1 (v1)	0,033860723	0,000746306	45,37108061	1,2261E-167
β_2 (L/Hg)	0,001571887	5,05716E-05	31,08238828	7,3004E-113

Com os valores da Tabela 5.5 foi obtida equação (82), válida para sistemas de bombeamento de água com tubulação em ferro fundido, operantes por 20 anos, para os seguintes intervalos: $25 \text{ m} \leq Hg \leq 75 \text{ m}$, $100 \text{ m} \leq L \leq 1000 \text{ m}$.

$$\frac{Q_1}{Q_{b20}} = 0,9644 + 0,0339v_1 + 0,0016\frac{L}{H_g} \quad (82)$$

Onde Q_{b1}/Q_{b20} é a relação entre a vazão de bombeamento no ano 1 e a vazão de bombeamento no ano 20 (valor adimensional); v_1 é a velocidade de bombeamento no ano 1 (valor em m/s) e L/H_g é a relação entre o comprimento da tubulação e a altura geométrica do sistema (valor adimensional).

Diante disso, apresenta-se um exemplo prático de utilização da equação 91 para projetos de sistemas de bombeamento.

Um engenheiro elabora o projeto básico de um sistema de bombeamento com operação 1+1 (uma bomba operando e uma reserva), em ferro fundido com $D=250$ mm, $L=834,70$ m e $H_g=26,3$ m que irá operar por 20 anos bombeando vazão de 136,86 L/s. Este projetista gostaria de verificar se a bomba irá operar com alta confiabilidade em seus primeiros anos de operação e qual o valor da vazão de bombeamento prevista para o último ano de operação do sistema.

Resposta:

Para $D=250$ mm e $Q_{b1} = 136,86$ L/s, utilizando-se a equação da continuidade, tem-se $v_1=2,79$ m/s.

Substituindo o valor de v_1 , L e H_g na equação (82), se obtêm:

$$\frac{Q_1}{Q_{b20}} = 0,9644 + 0,0339 \times 2,79 + 0,0016 \times \frac{834,70}{26,3} \quad (83)$$

$$\frac{Q_1}{Q_{b20}} = 1,11$$

$$\frac{0,13686}{Q_{b20}} = 1,11$$

$$Q_{b20} = 123,28 \text{ L/s}$$

Obs: sempre utilizar no mínimo duas casas decimais após a vírgula para o valor de Q_{b1}/Q_{b20} . Caso este valor resulte abaixo de 1, este pode ser arredondado para 1.

Como Q_{b1}/Q_{b20} foi superior a 1,1 significa que a bomba irá trabalhar fora de uma faixa de operação “confortável” nos seus primeiros anos, estando sujeita a problemas de cavitação, desgaste do rotor, nos selos e vedações, o que pode elevar os custos de manutenção, reduzir a vida útil do equipamento e diminuir a eficiência energética do sistema.

Neste caso o projetista deve elevar o diâmetro da tubulação a fim de diminuir o valor de Q_{b1}/Q_{b20} .

Para $D=300$ mm e $Q_{b1} = 136,86$ L/s, aplicando-se a equação da continuidade, tem-se $v_1=1,93$ m/s.

$$\frac{Q_1}{Q_{b20}} = 0,9644 + 0,0339 \times 1,93 + 0,0016 \times \frac{834,70}{26,30} \quad (84)$$

$$\frac{Q_1}{Q_{b20}} = 1,08$$

$$\frac{0,13686}{Q_{b20}} = 1,08$$

$$Q_{b20} = 126,72 \text{ L/s}$$

A aplicação da equação neste pequeno exemplo permitiu considerar que, com diâmetro de 250 mm, a vazão de bombeamento no ano 1 seria 11 % maior que a vazão de bombeamento no ano 20 (que é o ano no qual o sistema chegará ao PMR) e o sistema irá operar com menor confiabilidade. Se o projetista modificar o diâmetro da tubulação de 250 mm para 300 m, a vazão de bombeamento no ano 1 será 8% maior que a vazão no ano 20 e a bomba irá operar com melhor confiabilidade, diminuindo os custos de manutenção.

É importante ressaltar que a elevação do diâmetro implica em maior custo de implantação da linha de recalque, no entanto, não significa que o custo do ciclo de vida do sistema será maior, já que um maior diâmetro resulta em menores perdas de carga hidráulica e energia elétrica consumida pelo sistema. O programa **SRC**, desenvolvido neste estudo, busca o menor custo para o sistema.

Outro ponto importante é que não há necessidade de buscar um valor de Q_{b1}/Q_{b20} cada vez mais distante de 1,1, pois com o passar dos anos e com o envelhecimento da tubulação a vazão de bombeamento irá diminuir de modo a se igualar à vazão de bombeamento do ano 20.

Assim, a partir do valor inicial encontrado para Q_{b1}/Q_{b20} , este valor irá automaticamente diminuindo, de modo a se afastar de 1,1 chegando cada vez mais próximo de 1 (ver Figura 4.9).

5.3 INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Todas as ações sejam administrativas, técnicas ou operacionais, que busquem a redução ou o melhor aproveitamento da energia são consideradas ações de eficiência energética. Neste tópico será analisado se as rotinas operacionais geradas pelo **SRC** apresentaram bom aproveitamento energético.

5.3.1 Energia elétrica consumida no mês

Determinar a energia elétrica consumida em um sistema de bombeamento é fundamental para a tomada de decisão em ações de redução do custo operacional. Não sendo possível medir este consumo com equipamentos apropriados, o que é a realidade de muitos sistemas brasileiros, a estimativa desse consumo pode ser a solução alternativa para um direcionamento sem custos adicionais.

Vale observar que, em geral, todos os grandes consumidores de energia elétrica têm certa dificuldade para realizar estudos de previsão da energia consumida, já que na prática, ocorrem desvios de consumo em relação ao acordado no contrato, o que pode resultar em multas (ALEKSEEV, 2019). Assim, toda e qualquer previsão do consumo de energia elétrica deve ser realizada com bom senso. Isto quer dizer que é razoável fazer este tipo de análise, considerando, por exemplo, a idade do sistema, as condições do motor elétrico (se é um equipamento reconhecido¹⁰), se o sistema opera no horário de ponta, se tem banco de capacitores e a qual sua modalidade tarifária.

Na Figura 5.4 são apresentados os valores do kWh mensais consumidos nas operações otimizadas no ano 1 e ano 20, para as sete curvas de consumo estudadas. Nesse conjunto de valores, é possível observar a influência da altura geométrica no consumo de energia elétrica. Essa característica já foi descrita por Kutitza (2017) em seu estudo com sistemas de bombeamento de água com rotação variável.

¹⁰ Rebobinado.

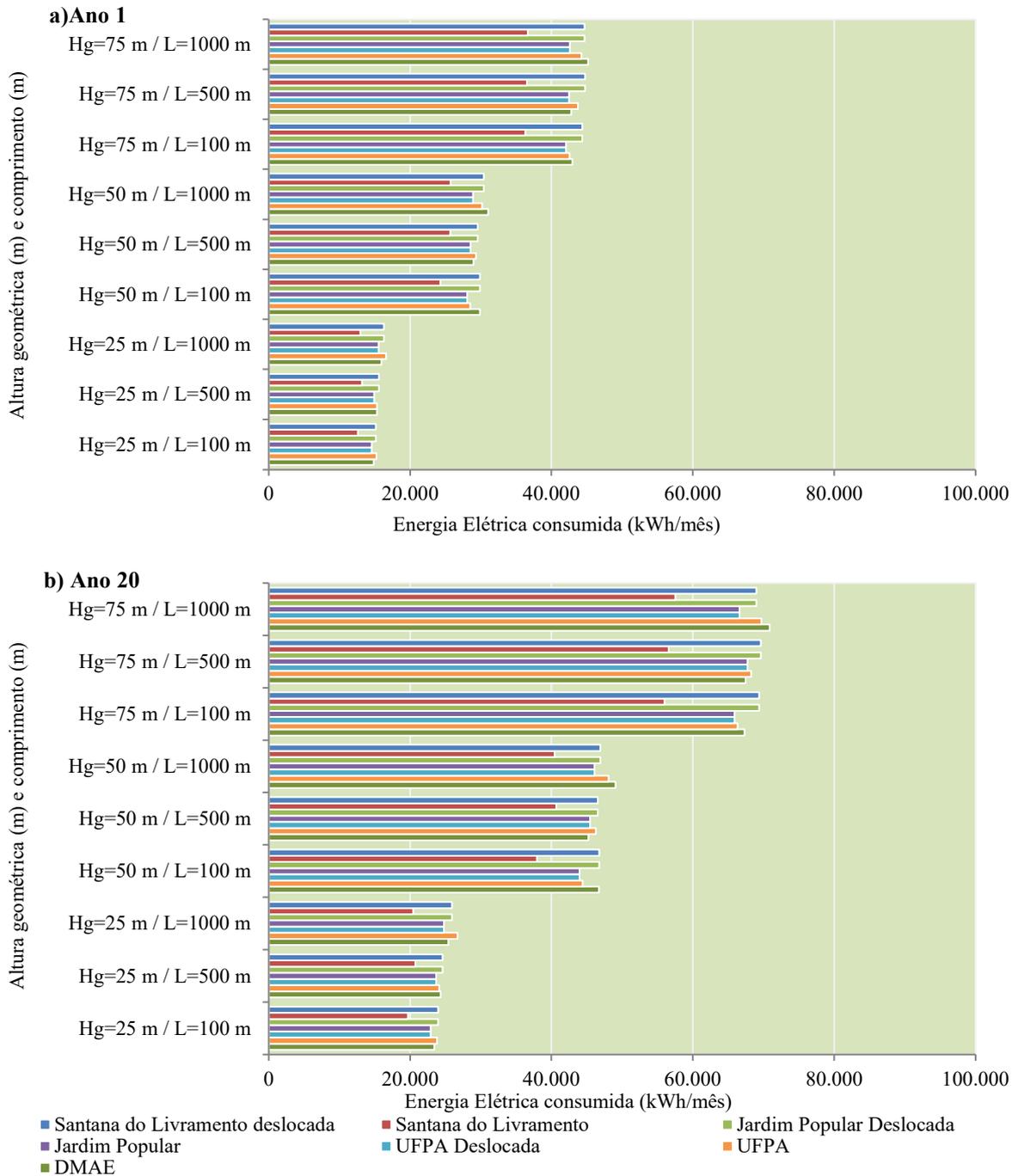


Figura 5.4 - Energia elétrica consumida mensalmente nas operações das combinações com diâmetros ótimos, no ano 1 e no ano 20.

O Crescimento médio do kWh consumido entre o ano 1 e 20 foi de 57,11 % ±1,49%.

5.3.2 Consumo Específico de Energia Elétrica (CEE)

É um dos indicadores mais relevantes para a medida de eficiência energética e relaciona o kWh consumido para bombear 1 m³ de água. Na Figura 5.5 é observado que a Hg teve maior influência nos valores do CEE.

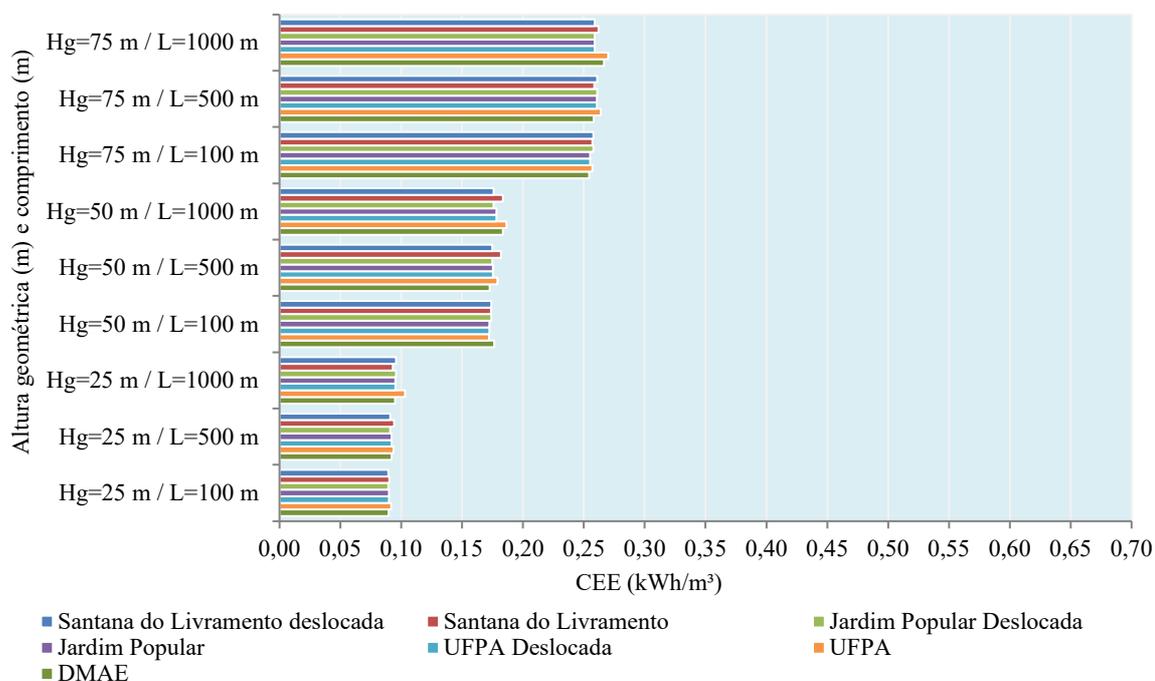


Figura 5.5 - CEE no ano 1 para os diâmetros ótimos de cada combinação de Hg e L

Não foi identificado na literatura classificação para valores do CEE. Assim, para se ter noção da escala dos valores da Figura 5.5 são citados estudos em sistemas reais, como o de Mamade *et al.* (2014) que obtiveram CEE de 0,266 kWh/m³ e 0,231 kWh/m³ para os seus sistemas analisados. Lopes *et al* (2020) obtiveram CEE de 0,29 kWh/m³ e 0,23 kWh/m³, enquanto Ferreira *et al* (2020), analisando diferentes estações de bombeamento de água, obtiveram os valores de CEE de 0,23 kWh/m³, 0,05 kWh/m³ e 0,13 kWh/m³.

O CEE também é utilizado para sistemas de tratamento de água e esgoto, podendo alcançar valores mais elevados. De acordo com Cheng (2002), em algumas cidades asiáticas, o CEE chegou a variar de 1,1 a 1,4 kWh/m³.

O CEE vale para a análise de um sistema isolado, não sendo possível a comparação entre sistemas diferentes, porque o consumo de energia de diferentes sistemas está vinculado a diferentes alturas manométricas, em variadas configurações hidráulicas, consumindo diferentes quantidades de energia, mesmo seus rendimentos sendo iguais (VILANOVA e BALESTIERI,

2015). No entanto, o CEE pode ser utilizado para determinar o consumo agregado de energia elétrica no m³ de água bombeado mais de uma vez (PEREIRA e CONDURÚ, 2014). A exemplo, podem ser consultados os estudos de Lopes *et al.* (2020) e Ferreira *et al.* (2020).

5.3.3 Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado (CEEN)

Esse indicador pode ser avaliado por períodos menores que um ano, mas é necessário cuidado na interpretação dos resultados quando usado para comparações internas ou externas (ALEGRE *et al.* 2016). A Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) de Portugal usa valores de referência como faixas de qualidade do serviço de bombeamento. De acordo com ERSAR (2016), se $0,27 \leq CEEN \leq 0,4$, a qualidade do serviço é boa. Caso $0,4 < CEEN \leq 0,54$, a qualidade é mediana. Se $0,54 < CEEN < 5$, a qualidade é insatisfatória.

Vale ressaltar que esses valores de referência são utilizados em estudos de auditoria energética como ferramenta para melhorar a eficiência dos serviços de sistemas de abastecimento de água (MAMADE *et al.* 2014). A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) também aplica esses valores em suas estações de bombeamento (SABESP, 2014).

Na Figura 5.6 é possível observar que as operações otimizadas pelo **SRC**, em termos de CEEN, foram boas, e apresentaram valores de CEEN muito próximos. Isso significa que, independentemente das configurações geométricas, as combinações da Figura 5.6, operando conforme definido pelo **SRC**, têm praticamente o mesmo aproveitamento de energia elétrica por m³ bombeado a cada 100 m. Esse resultado atesta a eficácia da ferramenta desenvolvida nesta pesquisa em termos consumo de energia.

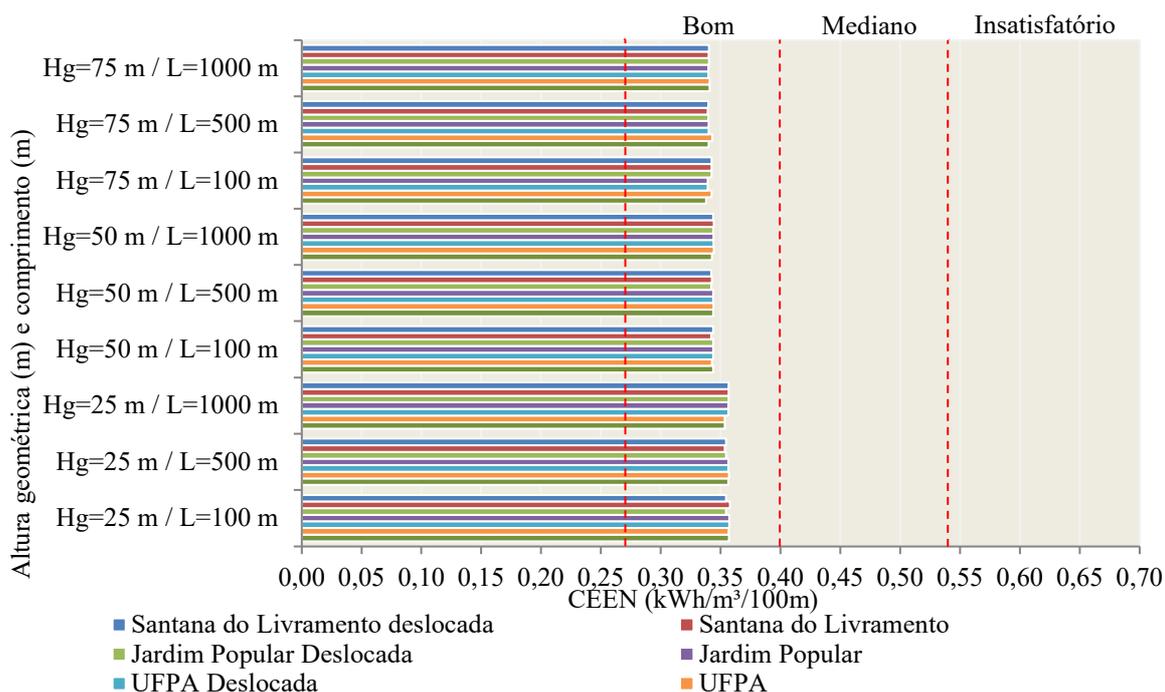


Figura 5.6 - CEEN no ano 1 para os diâmetros ótimos de cada combinação de Hg e L.

Também é importante citar que serviços de bombeamento com bom CEEN, tem rendimento do conjunto elevatório superior a 68% (SABESP, 2014) e que ERSAR (2016) não propõe ações de melhorias para sistemas com um bom serviço de bombeamento, o que pressupõe que estudos ou ações para sistemas de bombeamento com essa classificação, não compensem, dada a realidade das dificuldades operacionais diárias de um sistema de bombeamento.

5.3.4 Fator de Carga (FC)

No dimensionamento de sistemas de bombeamento de água, é recomendado na literatura que se usem folgas de potência e vazões, para garantir segurança do abastecimento. No entanto, vazões de bombeamento muito superior à de consumo caracterizam superdimensionamento do sistema, levando ao uso pouco racional da energia elétrica.

O FC é um indicador de uso racional da energia elétrica, que pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, melhor é o FC e, portanto, menor é o valor da demanda de potência faturável, expressa em kW, pois estará próxima do consumo de energia. Nos instantes em que a demanda de potência for excessivamente maior que o consumo, há desperdício de dinheiro na conta de energia elétrica (CAPELLI, 2013). O FC é classificado como péssimo se estiver entre

0 e 0,35, ruim se for de 0,35 a 0,55, regular, se for de 0,55 a 0,75, bom, caso esteja entre 0,75 e 0,90 e ótimo, caso ultrapasse 0,9 (TSUTIYA, 2006a).

Nesta pesquisa, conforme discutido no item 5.1, o **SRC** foi programado para que a vazão de bombeamento mínima de busca fosse igual ou superior à vazão máxima da curva de consumo, para minimizar os riscos de desabastecimento de água. Essa condição fez com que as potências nominais dos motores elétricos comerciais selecionados pelo **SRC**, também fossem maiores.

A fim de analisar o uso racional da energia elétrica nas operações otimizadas pelo **SRC**, a partir do indicador FC, foi desenvolvida a Figura 5.7 que mostra os resultados para o ano 1 e para o ano 20, para combinações com diâmetro ótimo. Foi observado que no ano 1 o FC transitou entre “péssimo” e “ruim”. Contudo, um FC baixo nos primeiros anos de operação é previsível, já que os sistemas, de modo geral, são projetados para atender populações futuras, onde a demanda por água é mais elevada. Tsutiya (2006a) observa que na ocasião da implantação, normalmente os conjuntos elevatórios estão superdimensionados e tem FC da ordem de 0,3 (péssimo), além disso, ressalta que pode permanecer baixo, se a previsão de vazão realizada pelo projetista falhar.

Tsutiya (2006a) recomenda ainda, para melhor gerenciamento do uso racional da energia elétrica, que o sistema de bombeamento seja implantado em etapas com intervalos de 5 anos, e que ao longo desses períodos, o índice de utilização mínima seja de 14 horas/dias, isto é, que o sistema tenha FC de aproximadamente 0,6 (regular).

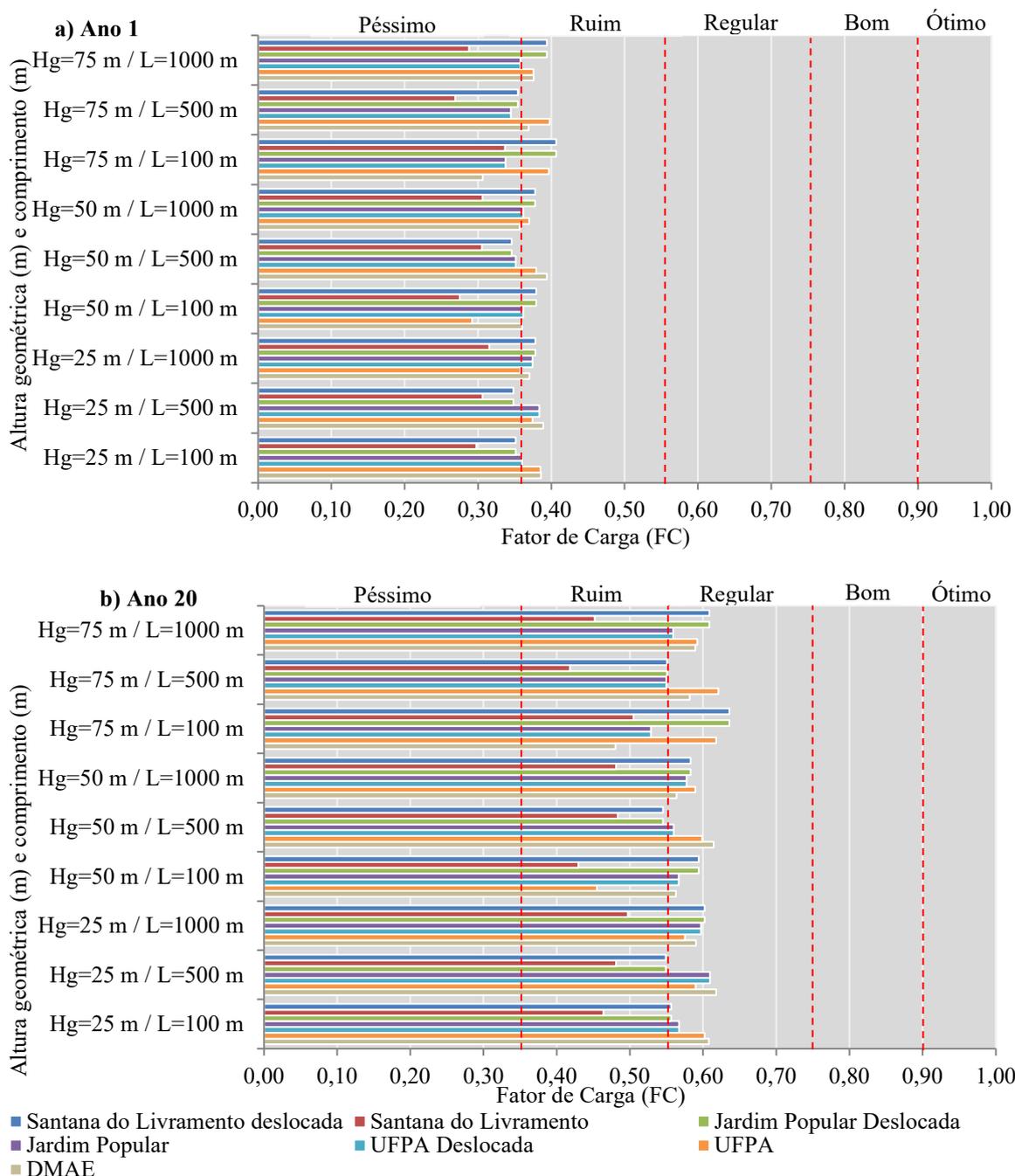


Figura 5.7 - Fator de carga no ano 1 (a) e no ano 20 (b) para os diâmetros ótimos de cada combinação de Hg e L.

O FC no ano 20 transitou entre ruim e regular, mostrando que, apesar de as rotinas operacionais serem otimizadas do ponto de vista financeiro, o FC manteve-se baixo, como previsto na literatura técnica. Dentre as causas está o uso de um único conjunto elevatório durante o horizonte de projeto, indo contra a recomendação de implantação em etapas.

Outros fatores que contribuíram para o baixo FC foi parametrizar o **SRC** para bombear sempre acima da vazão máxima de consumo da curva, e o volume do reservatório elevado que foi limitado a 1000 m³, obrigando o sistema a desligar até o esvaziamento do reservatório. Essas duas condições fizeram com que o tempo de bombeamento variasse entre 8 horas (FC ruim) e 18 horas (FC regular) para o último ano do horizonte de projeto.

Observa-se que, embora as regras operacionais tenham valores satisfatórios para os indicadores CEE e CEEN, isto não ocorreu para o FC. Em estudos realizados Mamade *et al* (2014) os autores mostraram que o CEE e o rendimento da bomba, por exemplo, não são indicadores suficientes para avaliar a eficiência energética de um determinado sistema. Deste modo, a análise da eficiência energética em sistemas de bombeamento deve ser feita utilizando um conjunto de indicadores e não apenas um único indicador.

5.3.5 Rendimento do conjunto motor e bomba

Os rendimentos máximos da bomba, no ano 20 para as combinações com diâmetros ótimos variaram de 82,84 % até 84,04 %, conforme observado na Figura 5.8.

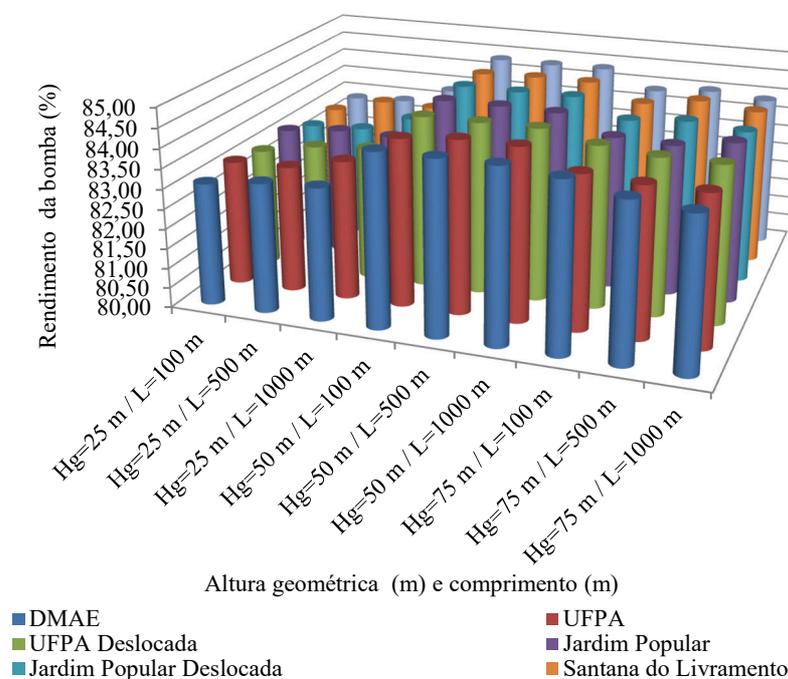


Figura 5.8 - Rendimento da bomba no ano 20 para os diâmetros ótimos de cada combinação de Hg e L.

Os valores da Figura 5.8, estão de acordo com o esperado, já que os rendimentos das bombas podem alcançar 85% a 90% (DURMUS KAYA *et. al.*, 2008), considerando-se as bombas de maior porte.

Os rendimentos máximos da bomba obtidos por Kuritza (2017) foram de 94%, sendo que em seu estudo foram utilizadas combinações com $H_g=100$ m e $L=5.000$ m, características geométricas que, em geral, requerem bombas de maior porte. De acordo com Gomes (2009a) bombas maiores tem o efeito de escala¹¹ elevando seus rendimentos. O atrito viscoso é menos importante em maiores dimensões principalmente no que diz respeito a seções de escoamento.

Os motores elétricos, responsáveis por fornecer energia mecânica à bomba, apresentam em geral, rendimentos maiores, estando acima de 90% (LU, 2016). Pela Figura 5.9 é possível observar os rendimentos determinados pelo SRC.

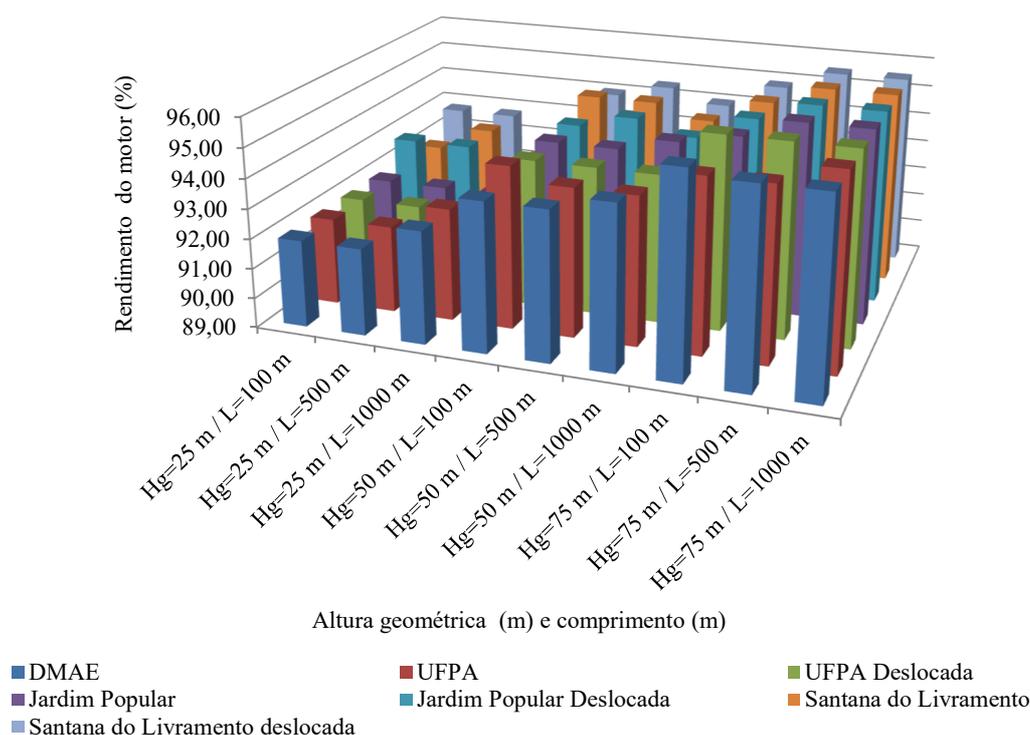


Figura 5.9 - Rendimento do motor elétrico no ano 20 para os diâmetros ótimos de cada combinação de H_g e L .

¹¹ O efeito de escala é uma indicação do desvio da lei de similaridade e varia dependendo da geometria de passagem do escoamento. O fator que produz esse efeito nas máquinas hidráulicas geométricas semelhantes é a variação da perda por atrito devido à diferença no número de Reynolds e a rugosidade relativa da superfície que delimita o escoamento (ALDAŞ e YAPICI, 2014).

Para manter elevado o rendimento do motor, é importante se evitar as folgas no dimensionamento (Oliveira Filho *et al.*, 2010), pois os motores que funcionam com carga parcial são operados com baixa eficiência. Essas eficiências podem variar de motor para motor. Por exemplo, a eficiência de um motor é 90% quando está totalmente carregado, sendo de 87% quando está meio carregado e de 80% quando está 1/4 carregado. A eficiência de outro motor pode ser 91% quando está totalmente carregado e de apenas 75% quando está 1/4 carregado (DURMUS KAYA *et al.*, 2008).

5.4 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA TRANSIENTES HIDRÁULICOS

Neste estudo foi utilizada a chaminé de equilíbrio (*standpipe*) de seção simples como dispositivo de proteção (ver o método analítico descrito no item 3.3.1.1), por ser robusto, de baixa manutenção e atender às situações de pressões extremas mínimas e máximas, contrariamente a dispositivos como o Tanque de Alimentação Unidirecional (TAU), que é utilizado unicamente para pressões extremas mínimas, ou o Tanque Hidropneumático (RHO), que demanda mais manutenção.

Inicialmente foi analisada a necessidade da chaminé de equilíbrio no sistema. O SRC calculou para as 441 situações (63 combinações x 7 curvas de consumo) a necessidade da chaminé pelos métodos L/Hg e th. Na Figura 5.10 é observado que o método L/Hg está a favor da segurança, pois indicou a necessidade de chaminé para 66,67% das situações, enquanto o th indicou esta necessidade apenas para 15,19 % das situações.

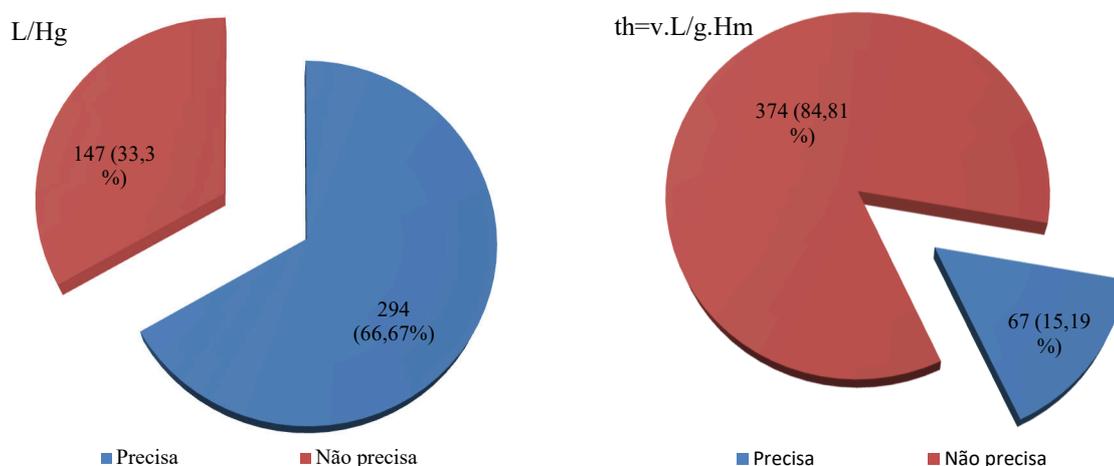


Figura 5.10 - Comparação entre os métodos de verificação de necessidade de chaminé de equilíbrio no sistema de bombeamento.

Como o L/Hg está a favor da segurança, não há necessidade de o projetista utilizar o th , já que L/Hg cobre as possibilidades de th , além de abranger mais casos. Assim L/Hg deve ser utilizado como principal método para o projetista verificar a necessidade de dispositivos de proteção contra transientes nas etapas de concepção do sistema.

Como mais de 50% das combinações analisadas necessitaram de chaminé, é importante que o custo deste dispositivo seja incrementado ao custo de implantação.

Conforme discutido no item 0, o custo da chaminé é estimado por seu volume, que por sua vez está relacionado, dentre outros fatores, ao seu posicionamento em relação ao reservatório superior. Quanto mais próxima do conjunto motor e bomba (isto é, mais distante do reservatório), maior sua eficácia e volume, tornando a chaminé mais cara para ser implantada (ver Figura 3.11).

A fim de analisar as variações do volume da chaminé, os dados de volume calculados pelo SRC para as 441 situações estão apresentados na Figura 5.11. Vale ressaltar que o SRC calcula os volumes da chaminé independentemente da situação necessitar ou não do dispositivo.

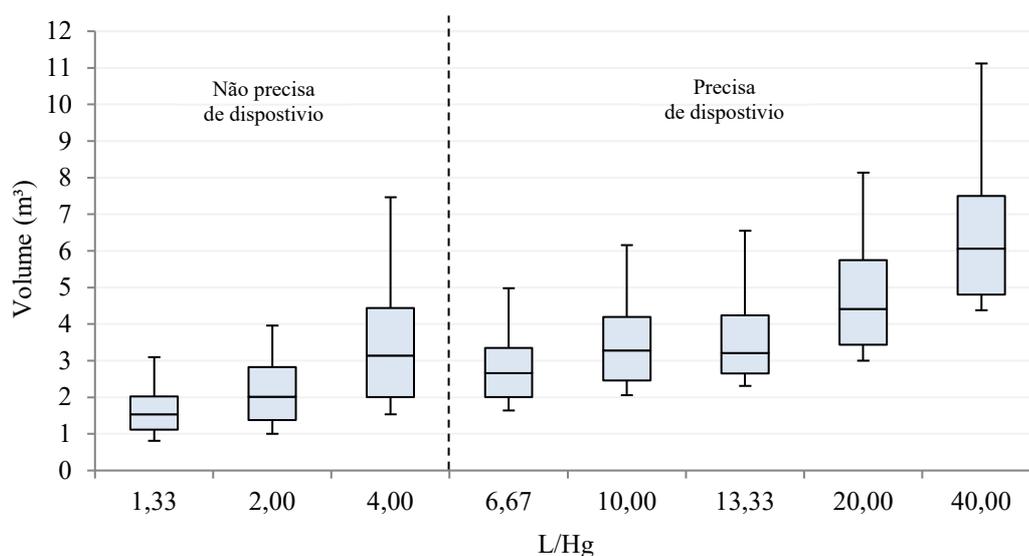


Figura 5.11 – Dispersão dos volumes da chaminé na posição $L_c = 4L/5$ em relação ao adimensional L/Hg .

A elevação no valor de L/Hg resulta em maior volume da chaminé de equilíbrio. Para $L/Hg=6,67$ (a partir do qual o dispositivo se torna necessário) ao menos 50% das combinações resultaram em volumes de até $2,66 \text{ m}^3$, enquanto para $L/Hg=40$, 50 % das combinações resultaram em volumes de até $6,06 \text{ m}^3$, o que indica que para maiores valores de L/Hg , as pressões extremas, durante a ocorrência do transiente, terão maior amplitude. Isto quer dizer

que a altura de elevação do nível de água será maior, assim como sua depleção, de modo que a chaminé necessitará de maiores dimensões (maior altura ou maior diâmetro) para conter as variações do nível de água, logo, seu custo será maior.

Os custos máximos estimados para as chaminés ocorreram nas combinações geométricas associadas à curva de consumo do município de Santana do Livramento (RS) e são observados na *Figura 5.12*.

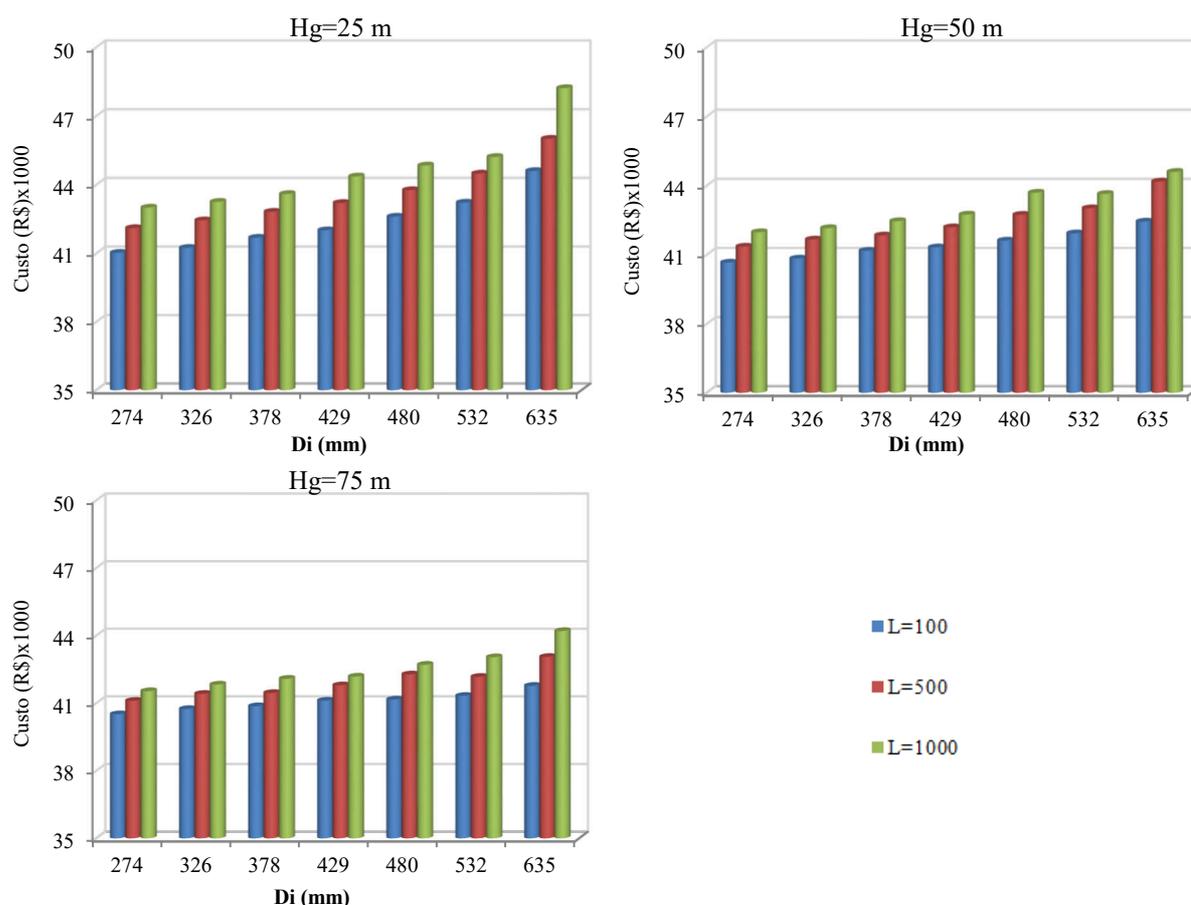


Figura 5.12 – Custos da chaminé de equilíbrio na posição $L_c = 4L/5$ para as combinações com a curva de consumo do município de Santana do Livramento – RS.

É importante destacar que a linha de recalque poderá necessitar de mais de um dispositivo de proteção. Isto poderá depender, dentre outros fatores, do perfil e do ancoramento da tubulação. No entanto estas informações geralmente não estão disponíveis na fase de concepção do sistema. Para este tipo de análise, o mais recomendado são os métodos numéricos, que não fazem parte do escopo deste estudo.

A fim de se estabelecer valores de referência de custo de implantação de dispositivos de proteção para sistema de bombeamento de água, foi determinado o percentual que o custo de uma chaminé de

seção simples poderá representar do custo total de implantação de um sistema. Esses dados foram sistematizados na Figura 5.13, onde pode ser observado que 50% das combinações com $L/Hg=4$ tiveram os custos de suas chaminés de equilíbrio equivalente a 11,13% do custo de implantação do sistema de bombeamento. No entanto, para este valor de L/Hg (resultante de $L=100$ m e $Hg=25$ m), o dispositivo não é necessário, e o baixo custo de implantação devido $L=100$ m fez com que o custo da chaminé fosse mais representativo para o valor de $L/Hg=4$.

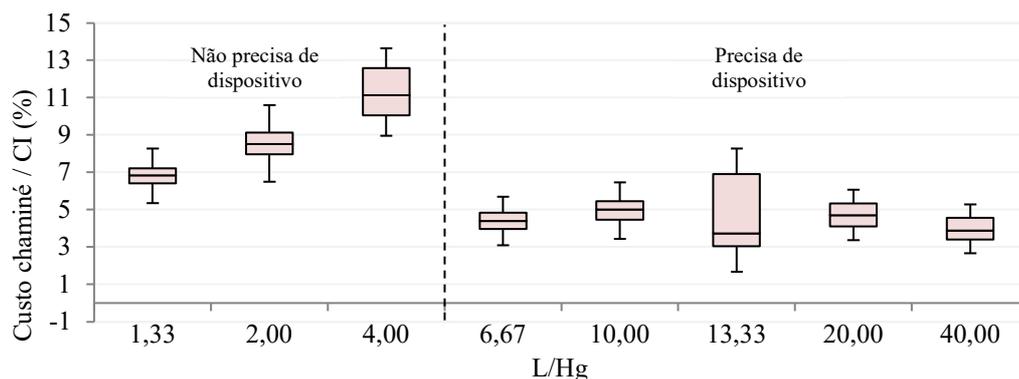


Figura 5.13 – Percentual que o custo da chaminé representa do custo de implantação do sistema

Por outro lado, ainda na Figura 5.13, o $L/Hg=13,33$ (resultante de $L=1000$ m e $Hg=75$ m) tem a menor mediana dentre as combinações que necessitaram do dispositivo de proteção, porém tem o maior dentre todos os terceiros quartis. Isto pode ter ocorrido devido $L=1000$ m resultar em maior custo de implantação, reduzindo em parte das combinações analisadas o percentual que o custo da chaminé representa do custo total de implantação do sistema.

Outro fator é que com maior valor de L e Hg , a altura manométrica é maior, aumentando também o custo operacional, que resulta em maior sensibilidade às mudanças de diâmetro, forçando o SRC na busca de velocidades de bombeamento mais dispersas para cada diâmetro, o que pode haver influenciado no volume e custo da chaminé. Esta característica pode ser observada na dispersão dos dados para o $L/Hg=13,33$, onde a amplitude interquartil foi de 3,87% e o maior valor não *outlier*¹² foi de 8,27 %. Para $L/Hg=20$, por exemplo, a amplitude interquartil foi de apenas 1,23% e seu maior valor não *outlier* foi de 6,07%.

É fato que os dados da Figura 5.13 necessitam de mais incrementos para diminuir sua dispersão em torno da mediana. No entanto, um valor preliminar e prático que pode ser utilizado como referência para o custo de uma chaminé de equilíbrio, até que estudos mais aprofundados sejam

¹² *Outlier* é um valor atípico encontrado em uma amostra de dados.

realizados, é o de 10% do custo de implantação total do sistema, considerando que o maior valor observado no estudo foi de 8,27%, que a distância da chaminé até o reservatório (L_c) adotada neste estudo foi de $4L/5$ e que o projetista pode aumentar as dimensões da chaminé para diminuir as pressões extremas.

Ainda, cabe ressaltar que O valor de 10% também serve para outros dispositivos de proteção, uma vez que a chaminé tende a ser o dispositivo de maior custo de implantação dentre todos.

5.5 CUSTO DO CICLO DE VIDA (CCV) E OUTROS INDICADORES

O CCV típico corresponde à soma do Custo de Operação (CO), Custo de Implantação ou Inicial (CI), Custo de Manutenção (CM) e outros custos.

Na Figura 5.14 pode ser observado o valor do CCV e dos custos que o compõe para os diâmetros ótimos das combinações com a curva do DMAE/RS.

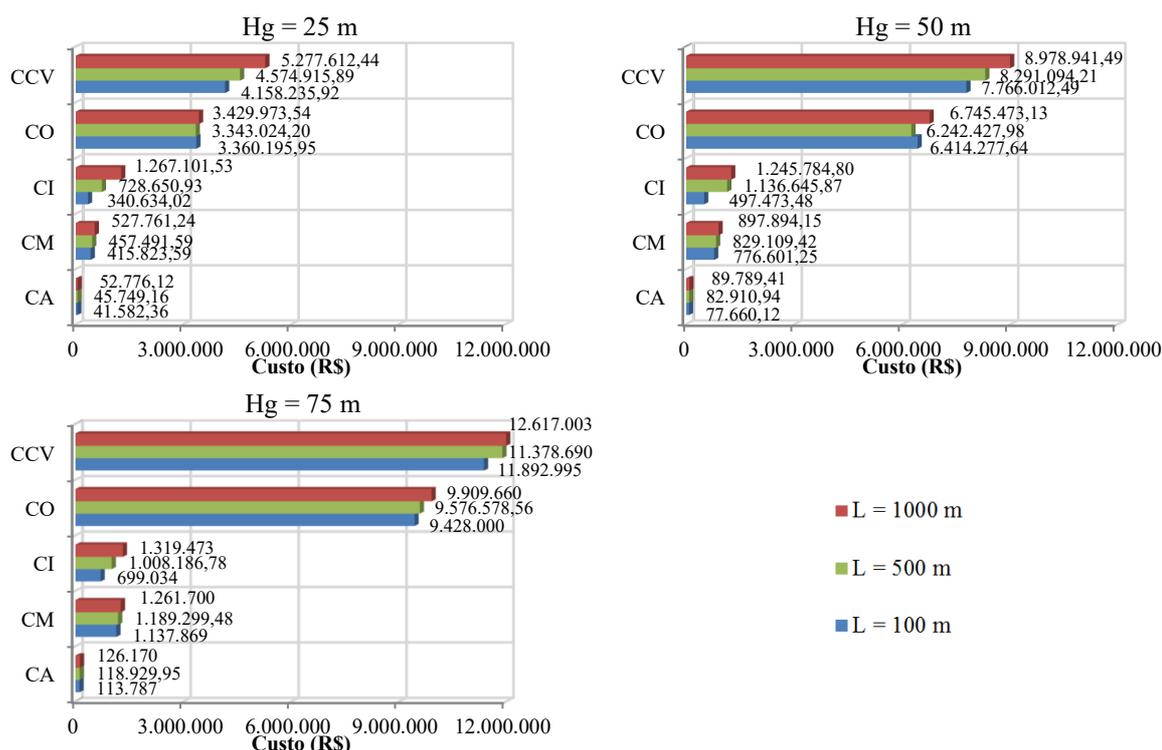


Figura 5.14 – Custos que compõem o CCV do sistema de bombeamento e valor final otimizado do CCV para as combinações geométricas com diâmetro ótimo, gerados pelo SRC com a curva do DMAE/RS.

O custo operacional é, claramente, o responsável pela maior parcela do CCV. Esta observação já foi realizada por outros autores, como SAHOO *et al*, 2009. No entanto é preciso destacar que

este é o motivo pelo qual as ações de eficiência energética e as técnicas de otimização são tão úteis, já que minimizando o consumo de energia elétrica e/ou maximizando seu aproveitamento, o CCV pode ser reduzido, não apenas pela diminuição do custo operacional, mas também pela redução do custo de manutenção, já que uma bomba operando em condições de máximo rendimento, também necessitará de menos manutenção, conforme discutido no item 5.2.

Os custos ambientais, no entanto, são uma parcela do CCV que precisa ser melhor estudada, já que a literatura técnica utilizada nesta pesquisa, e que data dos anos 2000, indica que o custo ambiental representa 1% do CCV, tornando esta parcela de custos praticamente inexpressiva, ao ponto de grandes fabricantes de bombas sugerirem que estes custos podem ser descartados da análise do CCV.

No entanto, a implantação de sistemas de bombeamento pode demandar a desapropriação de áreas/desmatamentos. São empreendimentos que precisam de licenças de operação e instalação, o que implica em série de custos que precisam ser previstos.

Com a evolução das leis ambientais, dos estudos de valoração ambiental e aumento da inflação, os custos ambientais, atualmente, podem ser maiores que 1% do CCV.

Na Figura 5.15 são observados os CCVs em função dos diâmetros de todas as combinações para a curva do DMAE/RS, incluindo as combinações da Figura 5.14.

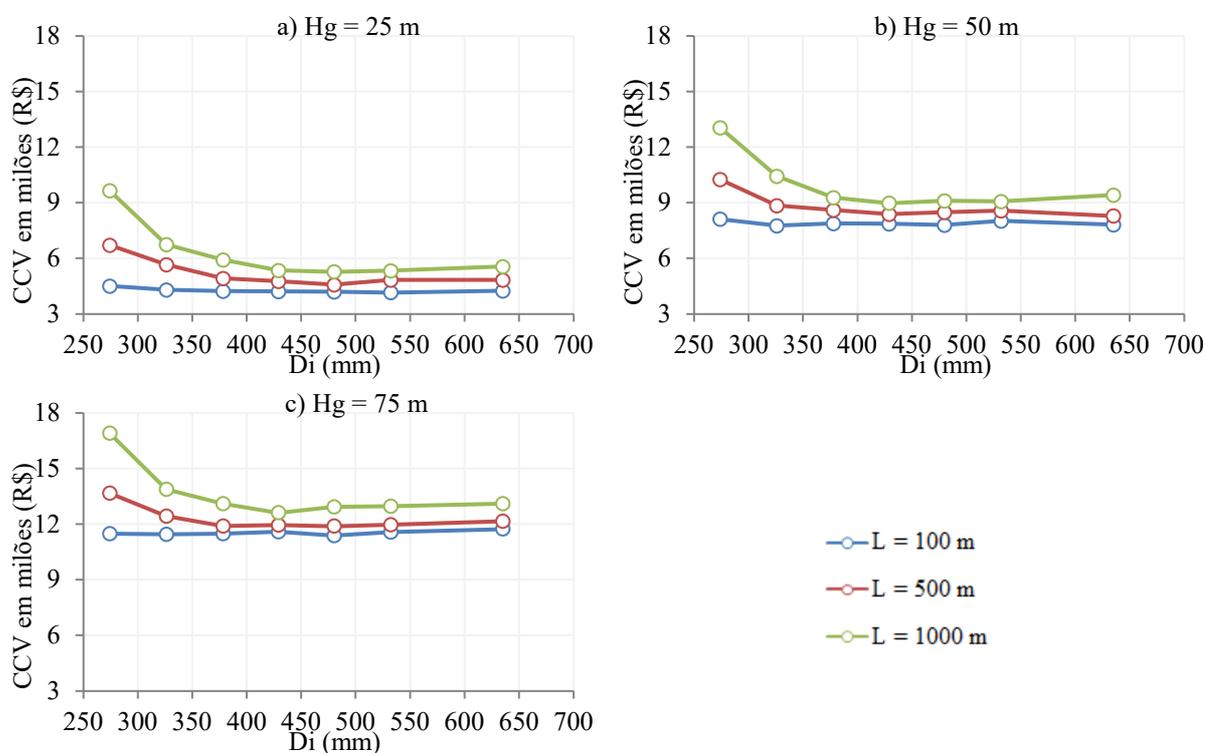


Figura 5.15 - CCV em relação aos diâmetros para cada valor de Hg e L com a curva do DMAE/RS.

A Figura 5.15 volta a mostrar, por meio dos diâmetros neste caso, a influência que a operação exerce no CCV, pois se menor for o diâmetro, maior a altura manométrica e assim a potência do equipamento eletromecânico, que consome mais energia e eleva o custo operacional. Como a operação ocorrerá por 20 anos, o custo dessa composição ultrapassa o custo de implantação. Assim, dentro do contexto do CCV de um sistema de bombeamento com rotação constante, o projetista, sempre que possível, deve evitar diâmetros que resultem em velocidades muito próximas dos 3 m/s, pois embora haja economia no custo de implantação devido a seleção de diâmetro menor, o custo operacional pode elevar de sobremaneira o CCV. Adicionalmente, conforme discutido no item 5.2, velocidades muito próximas de 3 m/s em sistemas com L/Hg em torno de 13 ou maior, iniciam a operação com baixa confiabilidade, deixando o sistema mais suscetível à manutenções, o que eleva ainda mais o CCV.

Ainda na Figura 5.15a, por exemplo, para $L=1000$ m, a partir do quarto menor diâmetro do grupo, isto é, $D_i=429$ mm, os CCVs variaram de apenas R\$ 5,34 milhões para 5,56 milhões. Estes custos foram apenas 1,1% e 5,3%, maiores, respectivamente, que o menor custo dentre todos os diâmetros do grupo, que foi de R\$ 5,28 milhões (para $D_i=480$ mm). Pode-se comparar essa variação com a margem de precisão dos orçamentos em obras públicas, que é de $\pm 30\%$ para estudos preliminares, $\pm 20\%$ para anteprojeto, $\pm 10\%$ para projeto básico e $\pm 5\%$ para projeto executivo (INSTITUTO BRASILEIRO DE OBRAS PÚBLICAS – IBRAOP, 2012). Desse modo, uma diferença em torno de 5% para os custos do CCV pode ser considerada pequena, já que equivale ao percentual de imprecisão do orçamento do projeto de uma obra pública com elevado grau de detalhamento. Isto significa que, para o caso da Figura 5.15a, a partir de $D_i=429$ mm, os CCV otimizados apresentam valores muito próximos (com diferença de no máximo 5,3 %), de modo que se pode considerar que o SRC gerou mais de uma solução ótima, isto é, encontrou mais de um diâmetro econômico para o grupo dos 7 diâmetros estudados nesta pesquisa.

Para melhor estudar os valores otimizados pelo SRC e apresentar diretrizes de projeto, foi utilizada, para o grupo dos 7 diâmetros, a combinação cujo diâmetro apresentou o menor CCV do grupo e as combinações cujo CCV foi até 10% maior que o menor CCV do grupo. Assim, todo diâmetro cujo CCV foi de no máximo 10% maior que o menor CCV do grupo, foi considerado solução ótima e entrou nas análises a seguir.

5.5.1 Custo de operação

O custo de operação (CO) é a maior parcela de custo do CCV, logo, sua estimativa é de grande valia, pois dará diretrizes aos gestores quanto à viabilidade de operação do sistema.

Na Figura 5.16 são apresentados os valores da razão CO/CCV em função do adimensional L/Hg. O valor da razão diminui com o aumento do L/Hg.

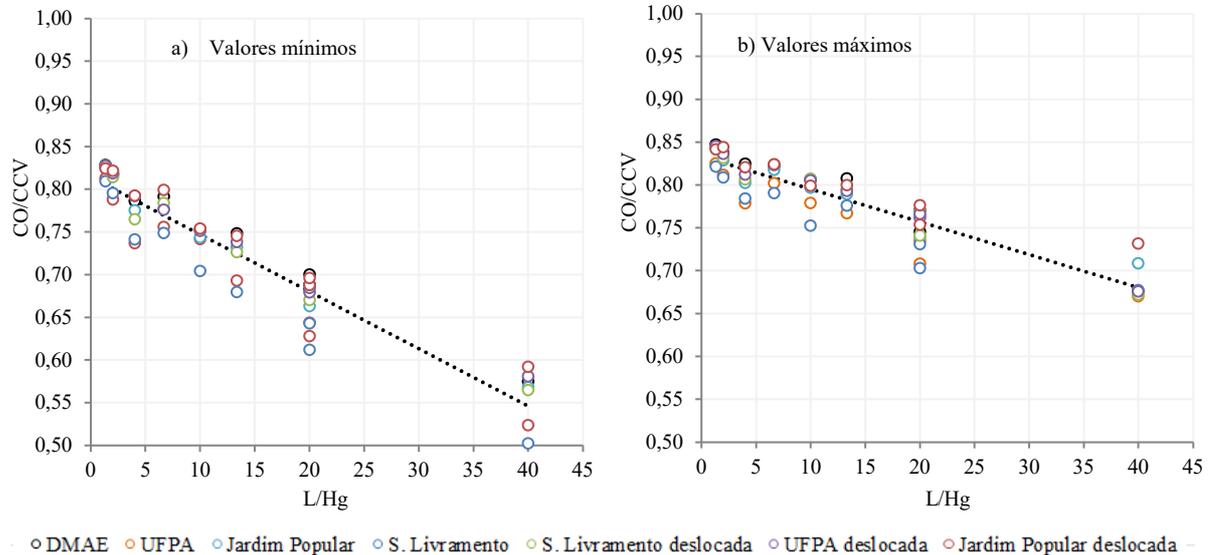


Figura 5.16 – Valores mínimos e máximos para razão CO/CCV em relação ao L/Hg dentro da faixa de valores ótimos cuja diferença do valor do CCV não foi superior a 10% .

Para estimar CO/CCV(%) mínimo foi ajustada, com $R^2=0,96$ a equação(85 a partir dos dados da Figura 5.16^a.

$$\frac{CO_{\min}}{CCV} (\%) = \left[0,8142 - 0,00671 \left(\frac{L}{Hg} \right) \right] 100 \quad (85)$$

O CO/CCV(%) máximo pode ser estimado pela equação (86, obtida a partir dos valores da Figura 5.16b, com $R^2=0,92$.

$$\frac{CO_{\max}}{CCV} (\%) = \left[0,8333 - 0,0038 \left(\frac{L}{Hg} \right) \right] 100 \quad (86)$$

Para um sistema com $L/Hg=40$, o percentual que o CO irá representar do CCV, conforme calculado pelas equações(85e (86 pode variar de 54% a 68,13%, respectivamente.

5.5.2 Custo de implantação

O custo de implantação (CI) está diretamente relacionado ao comprimento da tubulação e altura geométrica do sistema. Assim, a razão CI/CCV foi maior quanto maior foi o adimensional L/Hg, como pode ser observado na Figura 5.17.

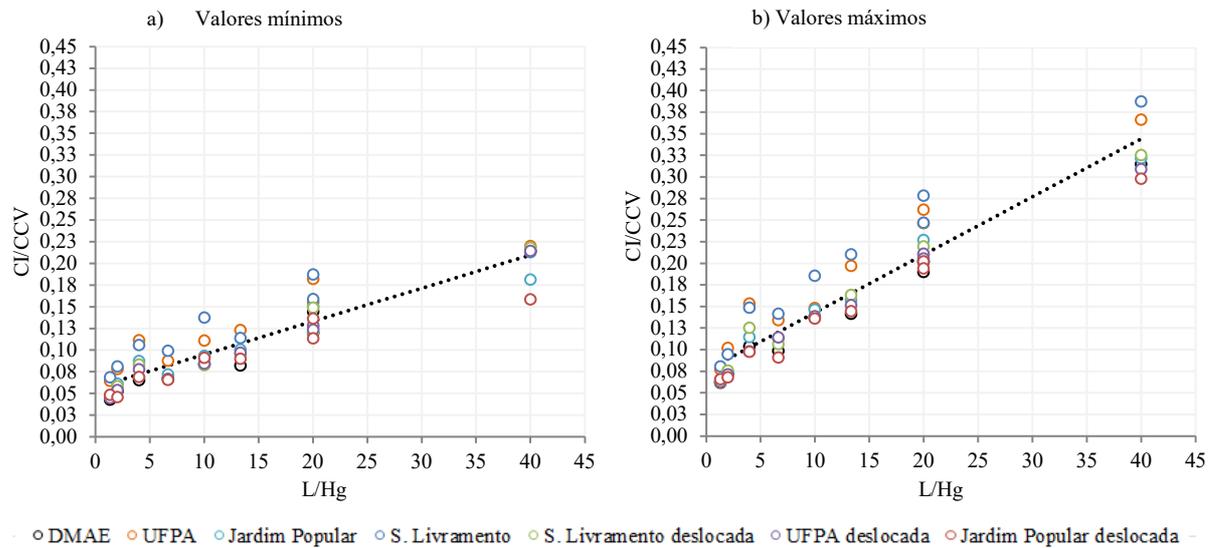


Figura 5.17 - Valores mínimos e máximos da razão CI/CCV.

Para estimar CI/CCV(%) mínimo foi ajustada, com $R^2=0,92$ a equação(85 a partir dos dados da Figura 5.17a.

$$\frac{CI_{\min}}{CCV} (\%) = \left[0,0567 + 0,0038 \left(\frac{L}{Hg} \right) \right] 100 \quad (87)$$

O CI/CCV(%) máximo pode ser estimado pela equação(88, obtida a partir dos valores da Figura 5.17b, com $R^2=0,96$.

$$\frac{CI_{\max}}{CCV} (\%) = \left[0,0758 + 0,0067 \left(\frac{L}{Hg} \right) \right] 100 \quad (88)$$

Para um sistema com $L/Hg=40$, o percentual que o CI irá representar do CCV, conforme calculado pelas equações (87 e (88) pode variar de 20,87% a 34,38%, respectivamente.

5.5.3 Velocidades

As velocidades médias, mínimas e máximas para os anos 1 e 20 são apresentadas na Figura 5.18.

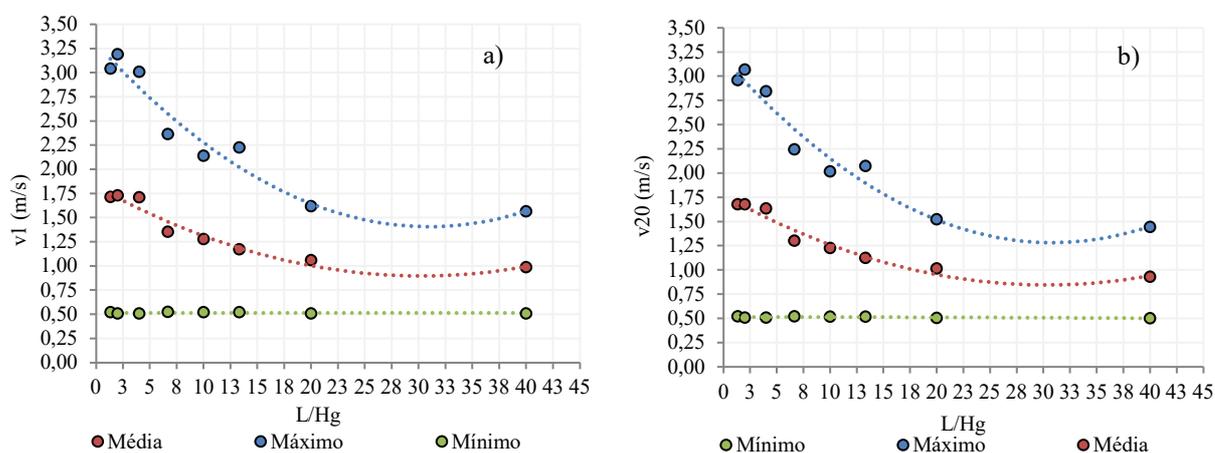


Figura 5.18 - Velocidades mínimas, médias e máximas para os anos 1 e 20.

As velocidades médias geradas no SCR estiveram entre 1,72 m/s e 0,93 m/s. Estes valores estão condizentes com as recomendações de autores clássicos, como Silvestre (1979) que já recomendava velocidades entre 0,55 m/s e 2,40 m/s para estações de bombeamento de água. Estudos mais recentes, como o realizado por Perroni *et al.* (2011) em um sistema de bombeamento de água com a mesma concepção adotada nesta pesquisa, foi obtido para tubulações de aço galvanizado velocidade econômica variando de 0,67 m/s a 1,63 m/s. Para PVC, os autores obtiveram velocidades econômicas que variaram entre 0,62 m/s e 1,97 m/s. Observa-se que os avanços tecnológicos relativos à computação, aos materiais das tubulações e outras infra estruturas, bem como a variação monetária têm ajudado a refinar a faixa de velocidade econômica, que além de estar variando com o material da tubulação, está ficando mais estreita.

Para se estimar v_1 máxima e v_1 média podem ser utilizadas as equações (89) e (90) cujo ajuste dos dados das Figura 5.18a e Figura 5.18b resultaram em $R^2=0,94$ e $R^2=0,95$, respectivamente.

$$v1_{max} = 0,002 \left(\frac{L}{Hg} \right)^2 - 0,1227 \left(\frac{L}{Hg} \right) + 3,3055 \quad (89)$$

$$v1_{média} = 0,001 \left(\frac{L}{Hg} \right)^2 - 0,0612 \left(\frac{L}{Hg} \right) + 1,8222 \quad (90)$$

A velocidade mínima média no ano 1 é de 0,54 m/s.

As estimativas de $v20$ máxima e $v20$ média podem ser realizadas pelas equações (91) e (92) cujo ajuste dos dados das Figura 5.18a e Figura 5.18b resultaram em $R^2=0,95$ e $R^2=0,96$, respectivamente.

$$v20_{max} = 0,002 \left(\frac{L}{Hg} \right)^2 - 0,1234 \left(\frac{L}{Hg} \right) + 3,1859 \quad (91)$$

$$v20_{média} = 0,001 \left(\frac{L}{Hg} \right)^2 - 0,0611 \left(\frac{L}{Hg} \right) + 1,7703 \quad (92)$$

A velocidade mínima média no ano 20 é de 0,51 m/s.

Para um sistema com $L/Hg=40$, as faixas de velocidades máximas estimadas são de 1,60 m/s e 1,45 m/s para os anos 1 e 20, respectivamente. Os valores médios de velocidade são de 0,97 m/s e 0,93 m/s para os anos 1 e 20, respectivamente.

5.5.4 Perda de carga

Por ser a energia perdida pelo atrito entre a tubulação e a água durante o escoamento, a perda de carga deve ser considerada no dimensionamento do sistema, já que se maior a perda de carga, maior será o custo operacional, que corresponde à maior parcela do CCV.

Na Figura 5.19 é apresentada a razão entre a perda de carga total (J_t) e a altura geométrica, para os anos 1 e 20, em relação ao adimensional L/Hg .

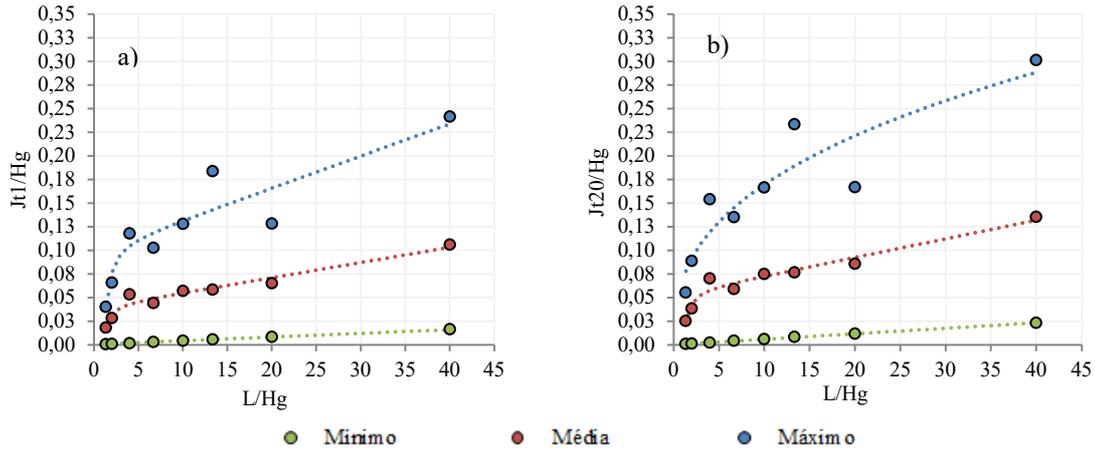


Figura 5.19 - Valores de Jt/Hg , para o ano 1 e 20 em relação ao L/Hg .

As equações de (93) a (98), obtidas a partir dos ajustes dos dados da Figura 5.19a e Figura 5.19b, estimam o percentual que as perdas de carga representam da altura geométrica do sistema. A qualidade dos ajustes para as equações de (93) a (98), foram de $R^2=0,93$; $R^2=0,98$, $R^2=0,99$, $R^2=0,91$, $R^2=0,98$ e $R^2=0,99$, respectivamente.

$$\frac{Jt_{1\max}}{Hg} (\%) = \left[0,0981 + 0,0034 \left(\frac{L}{Hg} \right) - 0,1165 \left(\frac{L}{Hg} \right)^{-2} \right] 100 \quad (93)$$

$$\frac{Jt_{20\max}}{Hg} (\%) = \left[0,0702 \left(\frac{L}{Hg} \right)^{0,3832} \right] 100 \quad (94)$$

$$\frac{Jt_{1\text{med}}}{Hg} (\%) = \left[0,0389 + 0,0016 \left(\frac{L}{Hg} \right) - 0,042 \left(\frac{L}{Hg} \right)^{-2} \right] 100 \quad (95)$$

$$\frac{Jt_{20\text{med}}}{Hg} (\%) = \left[0,0531 + 0,0197 \left(\frac{L}{Hg} \right) - 0,0563 \left(\frac{L}{Hg} \right)^{-2} \right] 100 \quad (96)$$

$$\frac{Jt_{1\min}}{Hg} (\%) = \left[0,00038 + 0,00039 \left(\frac{L}{Hg} \right) \right] 100 \quad (97)$$

$$\frac{Jt_{20\min}}{Hg} (\%) = \left[0,000084 + 0,00058 \left(\frac{L}{Hg} \right) \right] 100 \quad (98)$$

Para um sistema de bombeamento com $H_g=25$ m e $L/H_g=40$, o percentual máximo que a perda de carga representará da altura geométrica no ano 1, conforme calculado pela equação (93) será de 14,57%, o que equivale a 3,64 m. Para o ano 20, este percentual será de 28,86%, o que equivale a uma perda de carga de 7,22 m.

5.5.5 Volume do reservatório elevado

Estimar um volume útil para o reservatório elevado também é de grande utilidade, pois o custo desta estrutura pode tornar inviável a implantação do sistema.

Neste estudo, o volume máximo que poderia ser definido pelo **SRC** foi de 1000 m³, pois este é o valor máximo recomendado por Tsutiya (2006b), devido a problemas econômicos e estéticos.

Na Figura 5.20 pode ser observada a faixa de valores para a relação entre o volume útil do reservatório elevado e o volume diário de água consumida no ano 20.

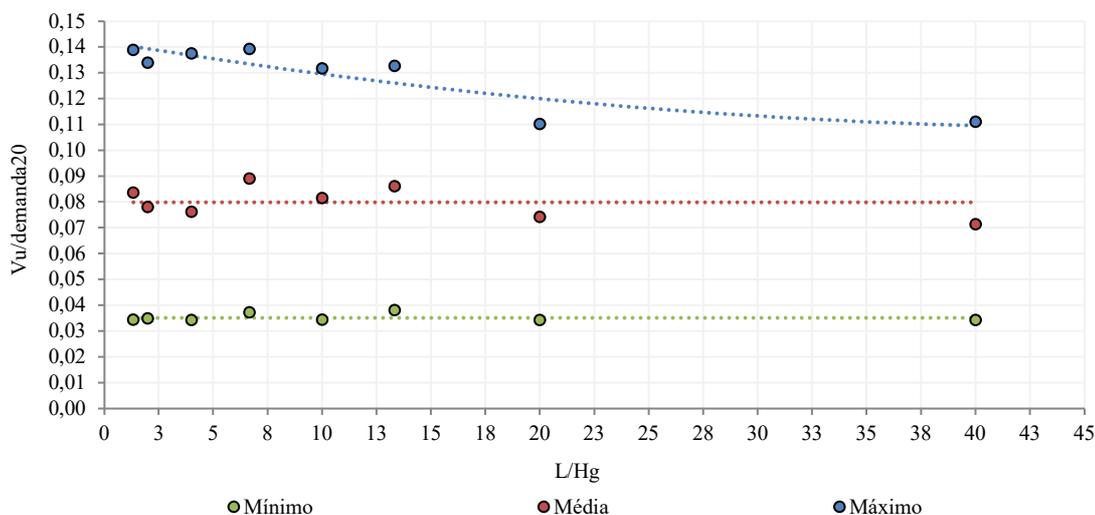


Figura 5.20 - Faixa de valores da razão $V_u/demanda_{20}$ em relação ao L/H_g .

Os valores máximos que o volume útil do reservatório representou da demanda diária de água no ano 20 variaram de 13,9 % a 11,1% apenas. O valor mínimo foi da média de 3,5 %, sendo que o médio foi de em torno de 8%.

5.5.6 Consumo máximo de água

Na Figura 5.21 pode ser observada a razão entre a vazão bombeada no ano 1 (Q_{b1}) e a vazão máxima de consumo no ano 20 (Q_{c20max}) em relação ao L/Hg .

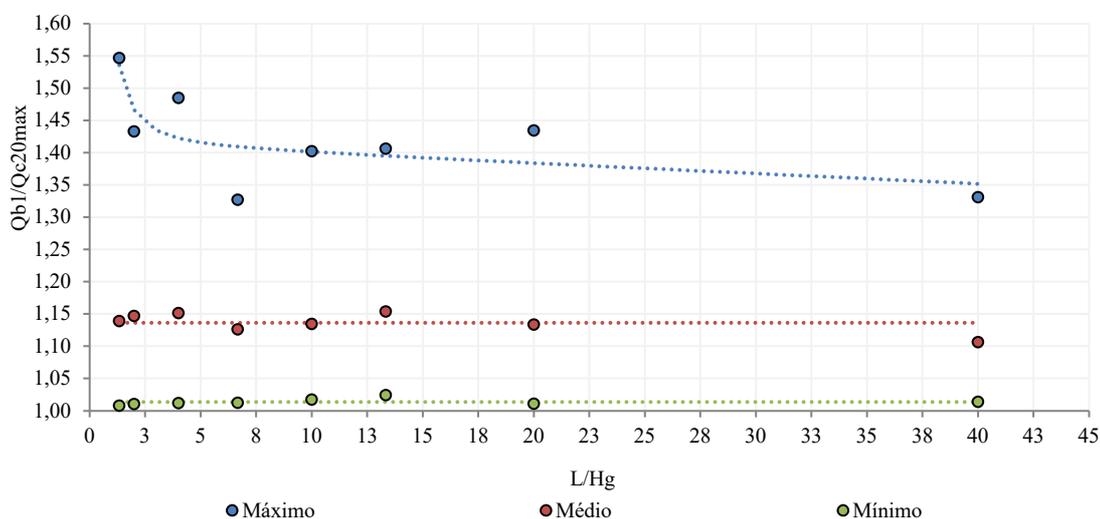


Figura 5.21. Relação entre a razão Q_{b1}/Q_{c20max} e L/Hg .

Para se estimar a vazão máxima consumida no ano 20 pode ser utilizada a equação (99) cujo ajuste dos dados da Figura 5.21 resultou em $R^2=0,76$.

$$\frac{Q_{b1}}{Q_{c20max}} (\%) = \left[1,42 - 0,0016 \left(\frac{L}{Hg} \right) + 0,218 \left(\frac{L}{Hg} \right)^{-2} \right] 100 \quad (99)$$

Um sistema com $L/Hg=40$ e $Q_{b1}=574 \text{ m}^3/\text{h}$, resultará em Q_{b1}/Q_{c20max} de 135,61 %. Isto significa que a vazão máxima de consumo no fim do horizonte de projeto será 35,61% acima de Q_{b1} , isto é, $778,40 \text{ m}^3/\text{h}$.

Os valores médio e mínimo para Q_{b1}/Q_{c20max} , de acordo com a Figura 5.21 foram constantes, e iguais a 1,137% e 1,014, respectivamente.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O programa desenvolvido nesta pesquisa, e que foi resultado do acoplamento de um modelo de simulação a um modelo de otimização, criada para representar o CCV de um sistema de bombeamento genérico, com velocidade rotacional constante, gerou informações para a análise do sistema de bombeamento. Dentre algumas dessas informações, podem ser citadas as velocidades e vazões de bombeamento, tempo de bombeamento dentro e fora do horário de ponta, demanda de consumo de água, potências e rendimentos da bomba e motor elétrico para o início e final do horizonte de projeto, potência instalada, volume útil do reservatório elevado, necessidade, volume e custo do dispositivo de proteção contra transientes hidráulicos, dentre outras importantes informações, como o custo de operação, custo de implantação, custo de manutenção, custo ambiental e o CCV.

Estas informações permitiram, por exemplo, a identificação de pontos operacionais nos quais a bomba poderá funcionar com menor desgaste, o que pode elevar a vida útil do equipamento e diminuir os custos de manutenção e reparo.

Foi possível avaliar também, as operações otimizadas pelo **SRC** no que diz respeito à qualidade do aproveitamento da energia elétrica, utilizando indicadores de eficiência energética e estabelecer valores de referência para uso em projetos e operações de estações de bombeamento com velocidade de rotação fixa.

Com base nas análises realizadas nesta pesquisa, foi observado que velocidades de bombeamento elevadas, isto é, próximas ou maiores que 3 m/s não só são anti econômicas do ponto de vista energético, conforme já mencionado por diversos autores da literatura técnica, como também são antieconômicas no contexto da manutenção, porque a bomba trabalhará com menor confiabilidade, isto quer dizer que a bomba irá operar fora da faixa de maior rendimento, e com maior desgaste, estando sujeita a problemas de cavitação e desgaste do rotor, bem como a problemas no selo de vedação.

No projeto de um sistema de bombeamento em ferro fundido, operando com uma bomba, se houver a necessidade de o sistema ser dimensionado para bombear água com velocidade igual ou próxima a 3 m/s. O sistema deverá ser dimensionado de modo que não poderá ter L/Hg superior a 13.

Sistemas de bombeamento com elevado valor de L/Hg, que nesta pesquisa foi limitado a 40, precisam operar com velocidades de bombeamento abaixo 2 m/s. Esta condição irá garantir que o sistema de bombeamento inicie o seu horizonte de projeto com vazão de

bombeamento no máximo 10% maior que a vazão de bombeamento no seu ponto de máximo rendimento. Essa condição é que garante que a bomba irá operar com menor desgaste.

Em relação à eficiência energética das rotinas operacionais otimizadas pelo **SRC**, foi observada a elevada influência que a altura geométrica exerceu no consumo mensal de energia elétrica. Quanto aos indicadores de desempenho, o CEE teve maiores valores nas combinações com $H_g=75$ m. O maior valor de CEE dentre as combinações com diâmetro ótimo foi de $0,27$ kWh/m³.

Todas as operações com diâmetro ótimo tiveram a melhor classificação possível para o CEEN, sendo consideradas boas, pois estiveram entre $0,27$ kWh/m³/100m e $0,4$ kWh/m³/100 m. Vale observar que independente da configuração geométrica, os sistemas com diâmetros ótimos tiveram mesmo aproveitamento energético.

Estas operações otimizadas, no entanto, não apresentaram resultados satisfatórios para o FC, que mede o uso racional da energia elétrica. Para este indicador, que em um sistema de bombeamento de água, tende a crescer ao longo dos anos, os melhores valores obtidos foram classificados com regular. Como um FC de conceito regular ao longo do horizonte de projeto é previsto na literatura técnica e considerado normal, devido ao superdimensionamento inicial do sistema, entende-se que esta condição não é uma falha do **SRC**, mas sim uma característica da concepção adotada para o sistema de bombeamento desta pesquisa, em que apenas um conjunto elevatório opera em todo horizonte de projeto, o que não é o recomendado na literatura. Devido a esta concepção, o **SRC** foi parametrizado de modo que as vazões de bombeamento otimizadas fossem sempre maiores que a vazão máxima da curva de consumo no ano 20, o que certamente elevou ainda mais as folgas e aumentou o superdimensionamento do sistema. Neste estudo foi observado que o FC é um parâmetro importante para nortear o projetista quanto ao ajuste do dimensionamento do sistema, evitando excessos.

Os outros parâmetros indicadores, como os rendimentos da bomba e do motor elétrico também estiveram nas faixas descritas na literatura técnica.

Em sistemas reais, caso os rendimentos do motor e da bomba estivessem baixos, isto poderia indicar que o motor sofreu uma queima e foi recondicionado (rebobinado), e que o rotor da bomba poderia estar desgastado.

Em geral, foi possível constatar, que a análise de eficiência energética de um sistema de bombeamento de água, para gerar resultados satisfatórios, deve ser realizada pelo conjunto de indicadores, devendo ser evitado o uso de único indicador isoladamente.

No que diz respeito ao dispositivo de proteção contra transientes hidráulicos, foi observado que mais de 50% das combinações analisadas neste estudo necessitaram do dispositivo. Assim, este autor recomenda que o custo do dispositivo de proteção seja sempre incorporado ao custo total de implantação do sistema. Após se calcular o custo de implantação do sistema, referente à soma dos custos do reservatório elevado, tubulação e conjunto elevatório, pode-se adicionar uma parcela de 10% deste custo, relativa ao dispositivo de proteção.

Também foi observado que há necessidade de mais estudos sobre o custo do ciclo de vida de estações de bombeamento. As análises de custo existentes são mais focadas na operação e implantação, que obviamente são as maiores composições do CCV. Porém, os custos de manutenção, ambientais e de descomissionamento, apesar de pouco explorados, também são importantes. O custo ambiental, por exemplo, foi estimado em estudo fora do Brasil, no ano 2000, em apenas 1% do CCV, e por conta disso, alguns fabricantes sugerem atualmente, que este custo não seja considerado no CCV, a menos que o bombeamento seja de líquidos perigosos. No entanto, a implantação de um sistema de bombeamento também demanda desapropriação e desmatamento de áreas. É um empreendimento que precisa de licenças para implantação e operação. No Brasil, as questões ambientais evoluíram bastante desde os anos 2000, e a inflação passou por elevadas mudanças.

Em relação aos demais indicadores obtidos na pesquisa, o percentual que o custo de operação representou do CCV variou entre 50% e 85%. Para o custo de implantação, esse percentual foi da faixa de 5% a aproximadamente 40%.

As velocidades econômicas médias variaram de 1,72 m/s a 0,93 m/s, condizentes com estudos disponíveis na literatura técnica. No entanto, a faixa aqui obtida, para o material ferro fundido, é mais restrita do que as faixas de velocidades econômicas obtidas para o aço galvanizado e para o PVC nos estudos publicados no ano de 2011. Além da questão do material da tubulação, é possível que o grau de detalhamento da função objetivo desenvolvida na metodologia desta pesquisa tenha resultado em faixa de velocidade econômica mais refinada.

Os percentuais médios que as perdas de carga geradas pelas vazões de bombeamento otimizadas pelo SRC representaram das alturas geométricas variaram de 1,8% a 13,5%, enquanto o volume útil médio do reservatório elevado foi de 8% do volume diário consumido no ano 20.

Como base na síntese realizada neste item pode-se concluir que o a metodologia desenvolvida atendeu os objetivos da pesquisa.

Para estudos futuros neste tema, recomenda-se:

- Buscar formas de se estimar a variação da forma da curva de consumo de água ao longo dos anos. O crescimento populacional durante o horizonte de projeto, modificação da economia e clima podem mudar a curva de consumo. Ferramentas de inteligência artificial para ajudar a modelar mudanças de comportamento no consumo de água podem ser utilizadas;
- Melhorar a estimativa dos custos dos dispositivos de proteção contra transientes utilizando métodos numéricos, ao invés dos métodos analíticos que foram utilizados nesta pesquisa;
- Testar número maior de valores para o adimensional L/Hg para ampliar a faixa de uso do gráfico da Figura 5.3 e melhorar a equação (82).
- Discretizar os custos operacionais em intervalos anuais para verificar o comportamento destes custos e melhorar as previsões do CCV;
- Realizar para determinar os custos ambientais necessários para a implantação de sistemas de bombeamento de água;
- Melhorar o modelo de simulação, de modo que a vazão de bombeamento seja modulada de acordo com a vazão consumida. Isto pode ser feito implantando conjuntos elevatórios de menor potência em etapas. Essa característica poderia elevar o valor do FC.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12216 – Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público-Procedimento. Rio de Janeiro, 1992b. 18 p.

_____. NBR 12214 – Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992c. 15 p.

_____. NBR 12215 – Projeto de adutora de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1991. 8 p.

_____. NBR 12218 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público — Procedimento. Rio de Janeiro, 2017. 23 p.

_____. NBR 12215 – Projeto de adutora de água Parte 1: conduto forçado. Rio de Janeiro, 2017. 16p.

ABUIZIAH, A.; OULHAJ, K.; SEBARI, D. OUAZAR. Sizing the Protection Devices to Control Water Hammer Damage. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. Vol. 7, nº. 11, 2013, p. 894-899.

ALDAŞ, K.; YAPICI, R. Investigation of Effects of Scale and Surface Roughness on Efficiency of Water Jet Pumps Using CFD. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. Vol. 8, nº. 1, 2014, p. 14–25.

ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J. M.; CABRERA, JR. E.; CUBILLO, F. DUARTE, P. HIRNER, W.; MERKEL, W. PARENA, R. Performance indicators for water supply services. Londres: IWA, 2016.

ANDRADE, P.N.; ARAÚJO, J.K. Aplicação do Tanque de Alimentação Unidirecional como dispositivo atenuador de golpe de aríete em adutoras. XXI Simpósio de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Novembro, 2015.

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDÉZ, M.F. Manual de Hidráulica. Coordenação: ARAÚJO, R.; Co-autores: FERNANDEZ, M.F.; ITO, A.E. 8ª ed. 7ª Reimpressão – São Paulo: Blucher, 1998 (2010).

AZEVEDO NETTO, J.M. Manual de Hidráulica. 9ª ed. São Paulo: Blucher, 2015. 632 p.

BASTOS, E.A. otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. 151 p.

BLOCH, H.P. Problem pumps: a thing of the past. *World Pumps*. Vol. 2012, n.10, October 2012, p.34-38.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº418 de 23 de novembro de 2010a. Retifica a Resolução Normativa ANEEL nº 414, de 2010. Disponível em:< <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010418.pdf>>. Acesso em 14 de abril de 2018.

_____. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa Nº 414 de 9 de setembro de 2010b. Estabelece condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em:< <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 05 de abril de 2018.

_____. Agência Nacional de Energia Elétrica. Bandeiras Tarifárias. 2019. Disponível em:< <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>>. Acesso em 10 de janeiro de 2020.

_____. Decreto Nº 7.891, de 23 de janeiro de 2013. Regulamenta a Lei nº 12.783, de 11 de janeiro de 2013, que dispõe sobre as concessões de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sobre a redução dos encargos setoriais e sobre a modicidade tarifária, e a Medida Provisória nº 605, de 23 de janeiro de 2013, que altera a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em 20 de fevereiro de 2021.

_____. LEI Nº 11.447 de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em : ><https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/alocacao-de-agua/oficina-escassez-hidrica/legislacao-sobre-escassez-hidrica/uniao/lei-no-11-445-2007-saneamento-basico/view>>. Acesso em 12 de outubro de 2020.

_____. Lei Nº 14.026 de 15 de julho de 2020. Disponível em:< <https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421#:~:text=%22Estabelece%20as%20diretrizes%20nacionais%20para,11%20de%20maio%20de%201978.%22>>. Acesso em 12 de outubro de 2020.

_____. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). Diagnóstico Anual dos Serviços de Água e Esgoto do Ano de 2013. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2013>>. Data do acesso: 10 de janeiro de 2020.

_____. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). Diagnóstico Anual dos Serviços de Água e Esgoto do Ano de 2014. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>>. Data do acesso: 10 de janeiro de 2020.

_____. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). Diagnóstico Anual dos Serviços de Água e Esgoto do Ano de 2015. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>>. Data do acesso: 10 de janeiro de 2020.

_____. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). Diagnóstico Anual dos Serviços de Água e Esgoto do Ano de 2018. Brasília, 2020. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2018>>. Data do acesso: 10 de janeiro de 2020.

_____. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). Diagnóstico Anual dos Serviços de Água e Esgoto do Ano de 2019. Brasília, 2021. Disponível em: <http://snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/Diagn%C3%B3stico%20SNIS%20AE_2019_Publicacao_04022021.pdf>. Data do acesso: 13 de março de 2021.

BEZERRA, S.T.M. “Sistema Fuzzy para controle piezométrico de sistemas de distribuição de água visando a economia de água e energia”. 164 p. Tese de D.Sc. Programa de Pós-graduação em engenharia mecânica – UFPB, João Pessoa, 2009.

BILLERBECK, C.; MELLO JUNIOR, A.V. Regras operativas ótimas do Sistema Cantareira para um período crítico de vazões. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol. 23, n.6, novembro-dezembro, 2018, p.1121-1130.

CAPELLI, A. Energia elétrica. Qualidade e eficiência para aplicações industriais. 1ª Ed. São Paulo: Érica, 2013.

CEEE-RS. Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul. Custos e Tarifas. 2019. Disponível em:

<http://www.cee.com.br/pportal/cee/Component/Controller.aspx?CC=1782>. Acesso em 21 de fevereiro de 2019.

CEE-RS. Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul. Custos e Tarifas. 2018. Disponível em: http://www.cee.com.br/pportal/cee/Archives/Upload/Tarifas_A-2018_35007.pdf. Acesso em 21 de fevereiro de 2019.

ÇENGEL, Y.A. CIMBALA, J.M. Mecânica dos Fluidos: fundamentos a aplicações. McGrawHill, 2007.

CHANG, L.C., HO, C.C.; CHEN, Y.W. Applying Multiobjective Genetic Algorithm to Analyze the Conflict among Different Water Use Sectors during Drought Period. *Journal Of Water Resources Planning And Management*. Vol.136, nº5, September-October 2010, p.539-546

CHAUDHRY, M.H. *Applied Hydraulic Transients*. 3ª Ed. New York: Springer, 2014.591p.

CHENG, C.L. Study of the inter-relationship between water use and energy conservation for a building. *Energy and Buildings*. Vol. 34, nº 3, March 2002, p. 261-266.

COSTA, L.H.M.; CASTRO, M.A.H.; RAMOS, H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. *Engenharia Sanitária Ambiental*. Vol.15, n.2, abril-junho, 2010, p.187-196.

COURA, S. P. *A Conta de Energia Elétrica no Saneamento*. Guias Práticos: Técnicas de Operação em Sistemas de Abastecimento de Água. Organização, Airton Sampaio Gomes, v. 5. Brasília: SNSA, 2007.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V.K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*. Vol.28, n.4, 1992, p.1015-1031.

DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., AND GUPTA, V. K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*. Vol. 158, n. 3, 1994, p.265–284.

DUAN, Q., GUPTA, V. K., AND SOROOSHIAN, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*. Vol. 76, n. 3, 1993, p.501–521.

ELETROBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras. *Manual de minicentrals hidrelétricas*. Rio de Janeiro: DNAEE, 1985.

ELETROBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras. *Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento*. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

ERSAR. Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos. Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal|2016: caracterização do setor de águas e resíduos. Vol. 1, 2016. Disponível em: http://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/sitenoticias/Documents/RASARP2016_Volume_1.pdf. Acesso em: 11 de fevereiro de 2020.

FERREIRA, J.F.H.; LOPES, R.M.; PEREIRA, J.A.R. Impacto do desempenho hidroenergético de sistema de abastecimento de água no consumo de energia elétrica em campus universitário. *Revista DAE*. Vol. 68, n. 222, Março, 2020. p.104-120.

FIALHO, A.B. *Automação Hidráulica: projeto, dimensionamento e análise de circuitos*. 4ª Ed. São Paulo: Érica, 2006.

FREDERICE, A.; BRANDÃO, J.L.B. Efeito do Sistema Cantareira sobre o regime de vazões na bacia do rio Piracicaba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 21, n. 4, outubro-dezembro, 2016, p. 797-810.

GAD, A.A. M.; MOHAMMED, H. I. Impact of pipes networks simplification on water hammer phenomenon. *Sadhana*. Vol. 39, n.5, 2014, p. 1227-1244.

GALVÃO, C.O.; VALENÇA, M.J.S. *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos e sistemas ambientais*. Porto Alegre: Editora: Universidade/UFRGS/ABRH,1999.

GHIDAOU, M.S.; ZHAO, M. MCLNNIS, D.A.; AXWORTHY, D.H. A Review of Water Hammer Theory and Practice. *Applied Mechanics Reviews*. Vol. 58, January, 2005, Vol. 58. p. 49-75.

GOLDBERG, D.E. *Genetic algorithm is search optimization and machine learning*. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co.,Inc., 1989.

GOMES, H. P. *Sistemas de bombeamento: eficiência energética*. 1ª Ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009a. 460p.

GOMES, H. P. *Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes Elevatórias*. 3ª Ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009b. 277p.

GOMES, P.H. G. Geometria de dutos de escape otimizada para aplicação na cogeração da produção de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação). Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC). Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiás, 2017. 118 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Tabela 2010-2060 - Projeção da População (revisão 2018). 2018. Disponível em: < [Agência - Detalhe de Mídia | Agência de Notícias | IBGE](#)>. Acesso em 09 de março de 2021

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Tabela 1162 – População residente e taxa média geométrica de crescimento anual da população residente. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1162#resultado>> acesso em março de 2021.

IBRAOP. Instituto Brasileiro de Obras Públicas. OT-IBR 004/2012. Precisão de Orçamento de Obras Públicas (2012). Disponível em:<https://www.ibraop.org.br/wp-content/uploads/2013/04/OT_IBR0042012.pdf>. Acesso em 16 de outubro de 2020.

DURMUS KAYA A, E. ALPTEKIN YAGMUR A , K. SULEYMAN YIGIT B , FATMA CANKA KILIC C , A. SALIH EREN B , CENK CELIK B. Energy efficiency in pumps. *Energy Conversion and Management*. nº 49, 2008, p.1662–1673.

KELLNER, E.; AKUTSU, J.; REIS; L.F.R.; Avaliação da rugosidade relativa dos tubos de PVC com vistas ao dimensionamento das redes de distribuição de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol. 21, n.2, abril/junho, 2016, 347-355 p.

KERAMAT, A. TIJSSELING, A.S.; HOU, Q.; AHMADI, A. Fluid–structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Fluids and Structures*. Vol. 28, n.12. 2012, p.434-455.

KUREK, W.; OSTFELD, A. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems. *Journal of Environmental Management*. Vol. 115, n.30, 2013, p.189-197.

KURITZA, J. C.; CAMPONOGARA, G.; MARQUES, M. G.; SANAGIOTTO, D.; BATTISTON, C. Dimensionless curves of centrifugal pumps for water supply systems: development and case study. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 22, 2017.

KURITZA, J.C. Metodologia para avaliação da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água com velocidade de rotação variável. (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017. 160 p.

LEE, S.; KANG, T. Analysis of Constrained Optimization Problems by the SCE-UA with an Adaptive Penalty Function. *Journal of Computing in Civil Engineering*. Vol.30, n.3, May 2016.

LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos*. 3ª edição. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda. 2012.

LOMBARDI, F.; SILVAGNI, G.; SIRINI, P.; SPAGNUOLO, R.; VOLPI, F. Daily water demand. *Revista Ambiente & Água*. vol. 13 n. 5, 2018.

LOPES, R.M.; ALVES, A.C.F.; FERREIRA, J.F.H.; MARQUES, M.G.; PEREIRA, J.A.R. Determinação da despesa com energia elétrica na lavagem de filtro rápido de estação de tratamento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol.25, n.1. Jan/fev 2020, p.145-155.

LU, S.M. A review of high-efficiency motors: Specification, policy, and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 59, 2016, p.1–12

MACEDO, J.P. Avaliação do funcionamento e dimensionamento hidráulico de chaminés de equilíbrio em aproveitamentos hidroelétricos. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica. Universidade do Porto, 2012.

MACINTYRE, A.J. *Bombas e instalações de bombeamento*. 2ª Ed. Ver.[Reimpr] – Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MACINTYRE, A. J. *Manual de Instalações Hidráulicas e Sanitárias*. 1ª Ed. [Reimpr] – Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MAMBRETTI, S. ;ORSI, E. Optimizing Pump Operations in Water Supply Networks Through Genetic Algorithms. *Journal - American Water Works Association*. Vol.108, n.2, February, 2016. p.E119-E125.

MAMADE. A.; LOUREIROA D.; COVASB, D., ALEGRE H. Energy Auditing As a Tool for Improving Service Efficiency of Water Supply Systems. *Procedia Engineering*. Vol. 89, 2014.p. 557-564.

MANZI, D.; GOULART, T. D. C.; BRENTAN, B.M. LIMA, G. M.; LUVIZOTTO JUNIOR, E. Dimensionamento ótimo de redes de distribuição de água com uso de métodos de otimização inspirados na natureza. *DAE*, Vol. 66, n.2012, 2018, p.16-31.

Daniel Manzi*/ Thaisa Dias de Castro /Bruno Melo /Gustavo Meirelles Lima/ Edevar Luvizotto Junior

MÁQUINAS HIDRÁULICAS – Bombas. Apostila, 2011.

MARIANI, L.; GUARENCHI, M. M.; MITO, J.Y.L.; CAVALIERO, C.K. N.; GALVÃO, R.R.A. Análise de oportunidades e desafios para o Nexo Água-Energia. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*. Vol. 37, maio 2016, p. 9-30.

MARQUES, TMP. Apresentando o modelo life cycle cost (custo de propriedade) aplicado a sistemas de bombas. *Revista Sanare. SANEPAR*. Vol. 16 n.16:42 – 48. Julho a Dezembro, 2001.

MARQUES,M.G. **Custo da bomba e taxa de crescimento de energia**. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <raynnerlopes.ufpa@gmail.com> em 4 de junho de 2020.

MARTIM, A. L. S. S.; PERINI L. B. SODEK, D. B.; TASCAS, E. S. A.; DALFRÉ FILHO, J.G. Renovação de adutoras: uma abordagem do ponto de vista da eficiência energética. *Revista DAE*. Vol. 68, n 226, outubro/dezembro, 2020, p. 213-225.

MEDEIROS, G.F.; KRIPKA, M. Algumas aplicações de métodos heurísticos na otimização de estruturas. *Revista de Ciências Exatas Aplicadas e Tecnológicas da Universidade de Passo Fundo*. Vol. 4, n.1, 2012, p.19-32.

MELLO, G.A.; SAMPAIO, L.P.; ALVES, M.G.; OLIVEIRA, R.A.N.; SILVA, J..R.F.; CANESIN, C.A. Erros em medidores eletrônicos de energia elétrica, Considerando-se geração distribuída. *Eletrônica de Potência*. Vol. 21, n.3, 2016, p.190-199.

MONACHESI, M.G.; MONTEIRO, M.A.G. *Manual Prático PROCEL: Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento*. Eletrobrás. Não datado. Disponível em: < <https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/ManualBombeamento.pdf>>. Data do acesso: 15 de janeiro de 2018.

MOREIRA, F.N.C.; REGO, A.G.; PEREIRA, J.A. Avaliação da importância do volume útil de reservatório elevado para a distribuição de água para área urbana. *AIDIS*. Vol.12, n.3, dezembro, 2019, p.536-551.

MOTTA, A.C.S. Estacoes Elevatórias de Esgoto. *Revista DAE*. Ed.73, n. 795,1982.

OLIVEIRA FILHO, D.; RIBEIRO, M.C.; MANTOVANI, E.C.; SOARES, A. A.; FERNANTES, H.C. Dimensionamento de Motores para o Bombeamento de Água. *Engenharia Agrícola*. Vol. 30, n. 6, novembro/dezembro, 2010, p. 1012-1022.

PEREIRA, J.A.R.; CONDURÚ, M.T. *Abastecimento de Água: informação para a eficiência hidroenergética*. João Pessoa. Editora Universitária – UFPB, 2014.

PERRONI, B.L.T.; CARVALHO, J.A.; FARIA, L.C. velocidade econômica de escoamento e custos de energia de bombeamento. *Engenharia Agrícola*. Vol.31, n.3, maio/jun. 2011, p.487-496.

RAMOS, J.S.; RAMOS, H.M. Sustainable application of renewable sources in water pumping systems: Optimized energy system configuration. *Energy Policy*. Vol. 37, n.2, February, 2009, p. 633-643.

REGO, A.G.; PEREIRA, J.A.R.; SANTOS, A.C.P. Development of models for assessing hydro-energetic losses in water supply systems. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v.13, n.2, 2019, p.209-218.

REHMAN, S.; SAHIN, A.Z. Wind power utilization for water pumping using small wind turbines in Saudi Arabia: A techno-economical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 16, n.7, september 2012, p.4470-4478.

SÁ, J.H.M. Análise do volume ideal do Reservatório Elevado (RE) do Sistema de Abastecimento de Água do Setor Básico da Cidade Universitária Professor José da Silveira

Netto – Belém (PA). (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém. 2012. 74 p.

SABESP (2014). “Eficiência Energética e Gestão de Energia na Sabesp”. <www2.fiescnet.com.br/web/recursos/VUVSR05EZzRNQT09> Acesso em 23 de junho de 2017.

SAHOO, TRINATH ; GUHARROY, AMITABH. Energy cost savings with centrifugal pumps. *Word Pumps*. 2009, p.35-p. 37.

SAINT GOBAIN. Catálogo Saint-Gobain canalização. 2015. Disponível em: <https://www.sgpam.com.br/downloads/115/catalogos>. Acesso em 5 de janeiro de 2019.

SIDDIQI, A.; ANADON, L.D. The water–energy nexusin Middle Eastand North Africa. *Energy Policy*. Vol.39, n.8, 2011, p.4529-4540.

SILVA, C.S. Previsão multivariada da demanda de água em sistemas urbanos de abastecimento. (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2003. 278 p.

SILVA, E.H.B.C.; ORRICO, S.R.M. a confiabilidade do volume das cisternas da zona rural para Reservar água de chuva. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)*. Vol.3, n.2, 2015, p.91-99.

SILVESTRE, PASCHOAL. *Hidráulica Geral*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.

SINISUKA, N. NUGRAHA, H. Life cycle cost analysis on the operation of power generation. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* Vol. 19 No. 1, 2013 p. 5-24.

SORIANO, E.; LONDE, L.R.; GREGORIO, L.T.;COUTINHO, M.P.; SANTOS, L.B.L. Water crisis in São Paulo evaluated under the disaster’s point of view. *Ambiente & Sociedade*. Vol. 19, n. 1, janeiro-março, 2016, p. 21-42.

SOUZA, L.A.P. Comparação entre métodos de otimização aplicados aos ajustes de relés direcionais de sobrecorrente. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2019. 131 p.

STEFFENS, D.R.; SILVA, E.S.; ROCHA, L.A. de O.; WANDER, P.R. Análise tarifária de estações elevatórias de água – cenários para mitigação do impacto econômico das faturas de energia elétrica. *Scientia Plena*. Vol.15, n.4, 2019, p.1-12.

TANG, Y.; ZHENG, G.; ZHANG, S. Optimal control approaches of pumping stations to achieve energy efficiency and load shifting. *Electrical Power and Energy Systems*. Vol. 55, 2014, p.572-580.

TASSINARI, L.C.S. Transientes Hidráulicos em Sistemas de Bombeamento: influência do material do conduto e dispositivo de proteção. (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017. 183 p.

TELES, M.L.; GOMES, H. M. Comparação de algoritmos genéticos e programação quadrática seqüencial para otimização de problemas em engenharia. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n.15, Abril, 2010, p.29-39.

TOMAZ, P. *Golpe de Ariete em casas de bombas*. São Paulo: Navegar editora, 2010.

TRIKI, A. Water-hammer control in pressurized-pipe flow using an in-line polymeric shortsection. *Acta Mechanica*. Vol. 227, n.3, 2016, p. 777-793.

TRIOLA, M.F. *Introdução à estatística*. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

TSUTIYA, M.T.; ALÉM SOBRINHO, P. *Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário*. 3ª Ed. Rio de Janeiro: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011.548 p.

TSUTIYA, M.T. *Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água*. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006a. 185 p.

TSUTIYA, M.T. *Sistema de Abastecimento de Água*. 4ª Ed. São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006b. 643 p.

United States Regulatory Commission (USNRC). **Capacity Factor**. Glossary. August, 2020. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/capacity-factor.html>>. Acesso em março de 2021.

VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J.A.P. Modeling of hydraulic and energy efficiency indicators for water supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol 48, 2015, p540-557.

VITOR, A. Uma proposta de algoritmo genético híbrido para o Problema do caixeiro viajante. Projeto de tese apresentado ao Curso de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015. Disponível em: ><https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/41345/R%20-%20T%20-%20ADRIANO%20VITOR.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>.

VON SPERLING, M.V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WEG. *Motores elétricos*. 2020. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/c/BR_MT. Acesso em: 09 de julho de 2020.

WU, W.; SIMPSON, A.R.; MAIER, H.R.; MARCHI, A. Incorporation of Variable-Speed Pumping in Multiobjective Genetic Algorithm Optimization of the Design of Water Transmission Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 138, n.5, september, 2011, pp.543-552.

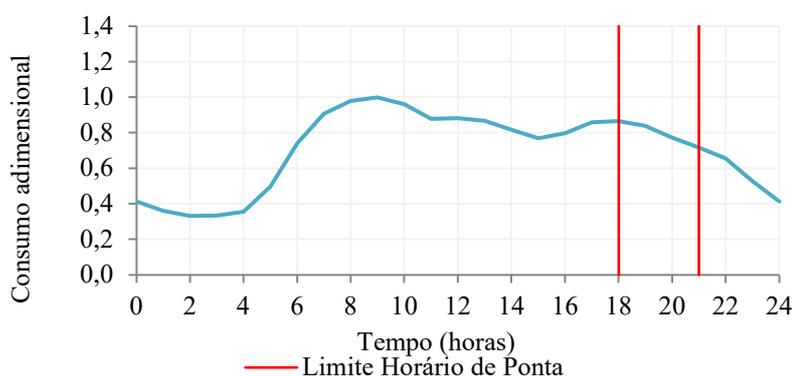
XIE, X. SCHLUENDER, D. MATTIACCI, T.; WANG, Z. Simulation of Wastewater Hydraulics in Force Main with Local Highest Point. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol.143, 2017.

ZHUAN, X.; ZHANG, L.; LI, W.; YANG, F. Efficient operation of the fourth Huaian pumping station in east route of South-to-North Water Diversion Project. *Electrical Power and Energy Systems*. v.98, 2018, p.399-408.

8 APÊNDICE

APÊNDICE A – ESTUDO DE CASO

Para mostrar a aproximação dos os resultados gerados pelo **SR** à realidade, foi criado estudo de caso com a curva adimensional da figura abaixo, monitorada no município de Assunção, capital do Paraguai.

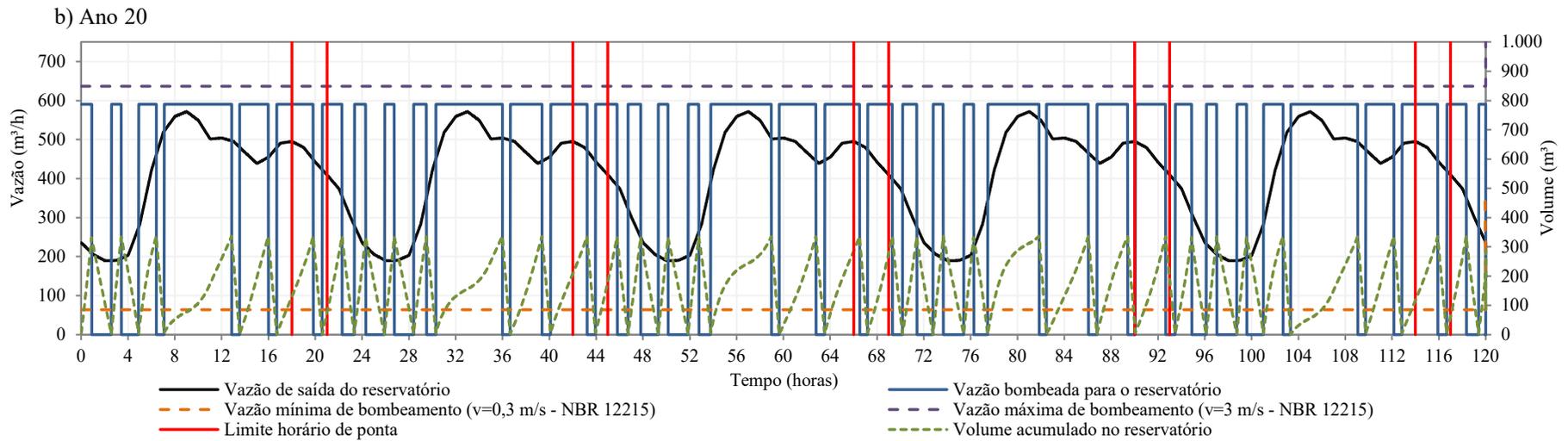
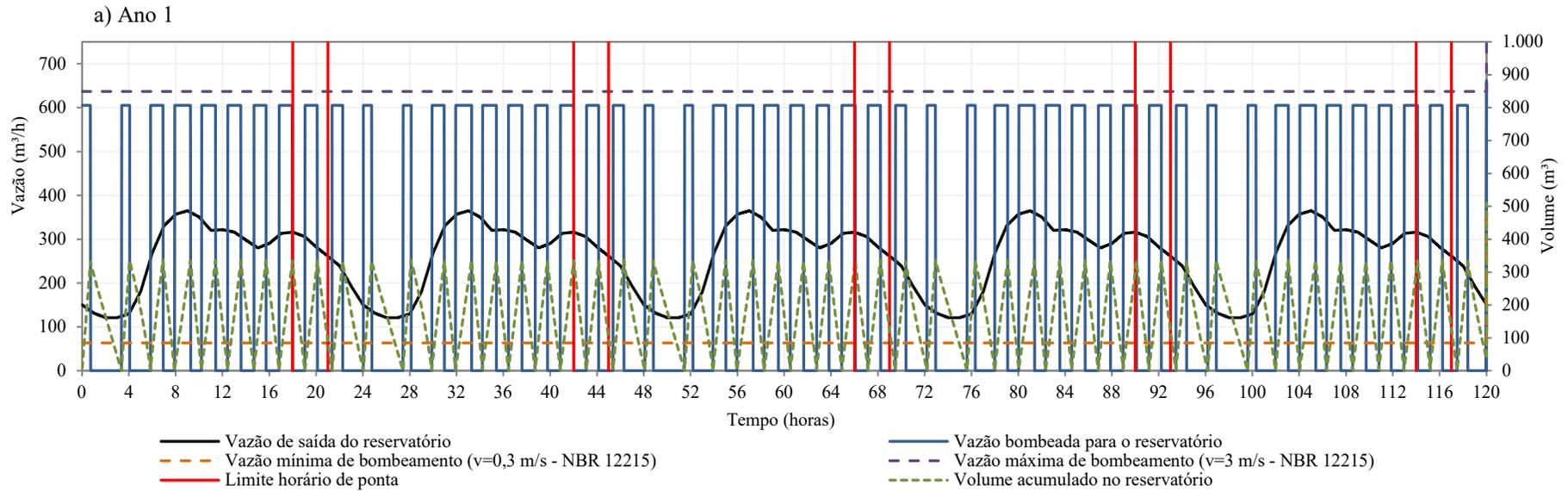


Curva de consumo adimensional do município de Assunção/Paraguai. FD=0,71

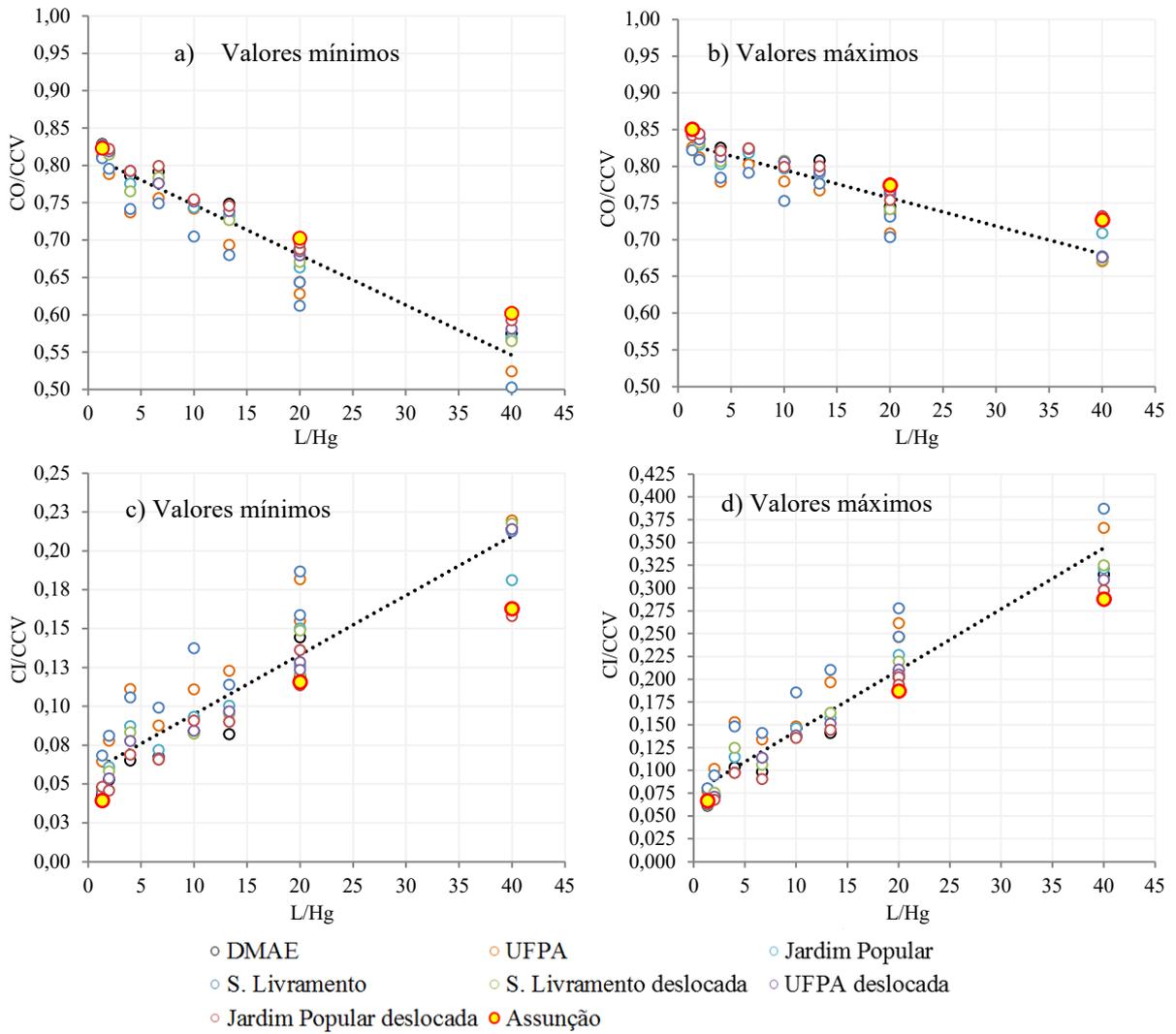
Para o estudo de caso, foram otimizadas no **SCR**, 21 regras de operação das combinações geométricas. Estas combinações foram selecionadas de modo que seus adimensionais L/Hg resultassem em 1,33, 20 e 40, respectivamente, para que pudessem cobrir a amplitude dos valores deste parâmetro utilizados nas equações. Assim, as combinações selecionadas são descritas na tabela abaixo.

Descrição das 27 combinações utilizadas no estudo de caso.

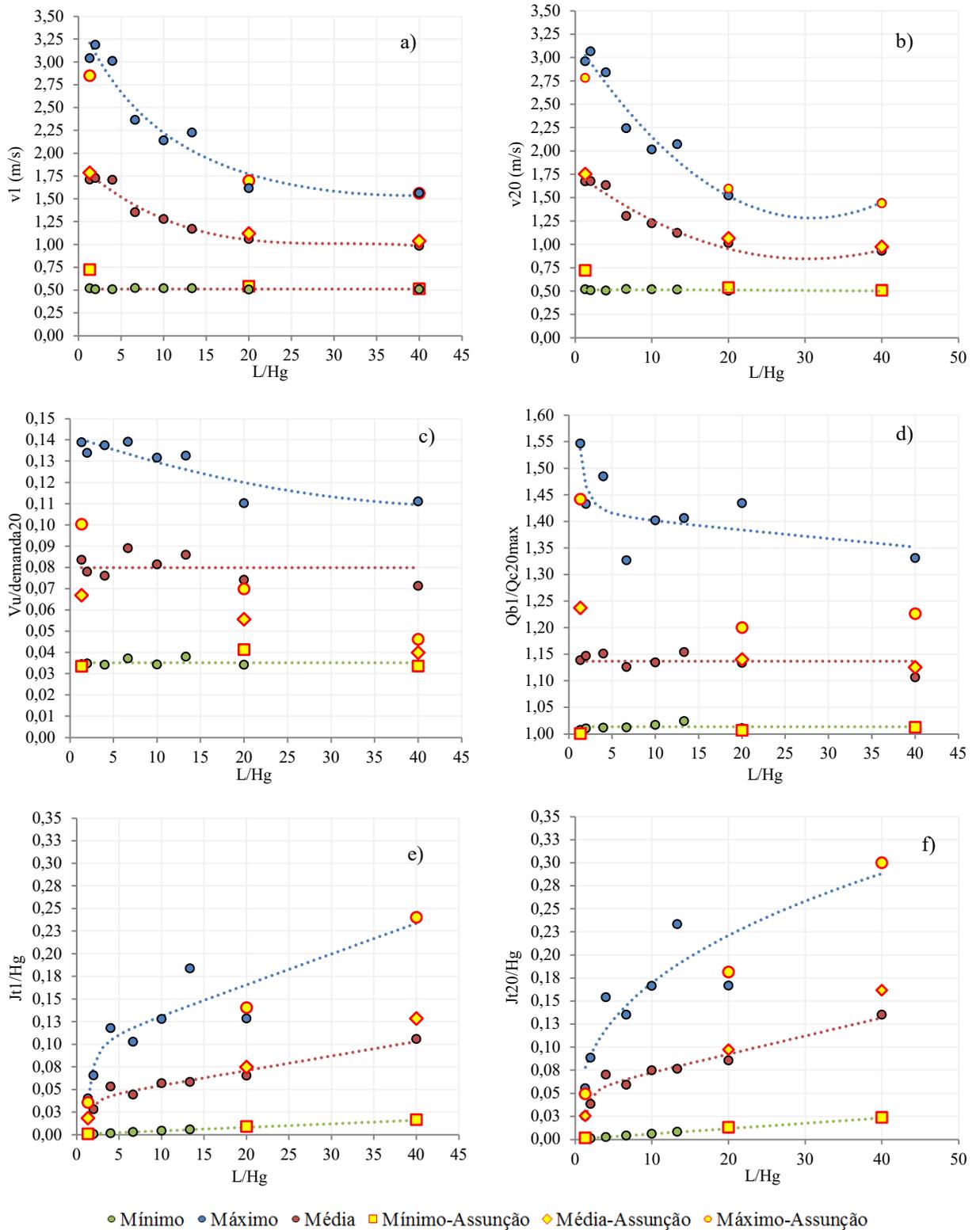
Nº Comb.	1	2	3	4	5	6	7
Hg	25	25	25	25	25	25	25
L	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
L/Hg	40	40	40	40	40	40	40
Di (mm)	274	326	378	429	480	532	635
Nº Comb.	8	9	10	11	12	13	14
Hg	50	50	50	50	50	50	50
L	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
L/Hg	20	20	20	20	20	20	20
Di (mm)	274	326	378	429	480	532	635
Nº Comb.	15	16	17	18	19	20	21
Hg	75	75	75	75	75	75	75
L	100	100	100	100	100	100	100
L/Hg	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
Di (mm)	274	326	378	429	480	532	635



Rotinas de bombeamento durante 5 dias (120 h) de operação geradas pelo SRC para a combinação $H_g = 75$ m / $L = 1000$ m / $D_i = 274$ mm, para suprir a curva de consumo do município de Assunção/Paraguai ($FD = 0,71$), no ano 1 e no ano 20.

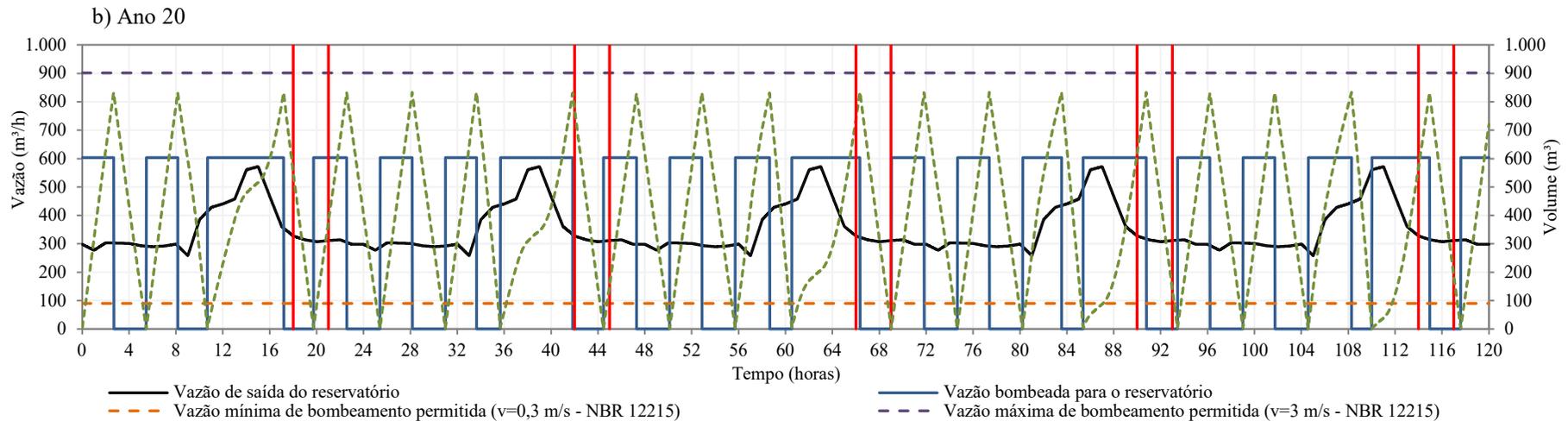
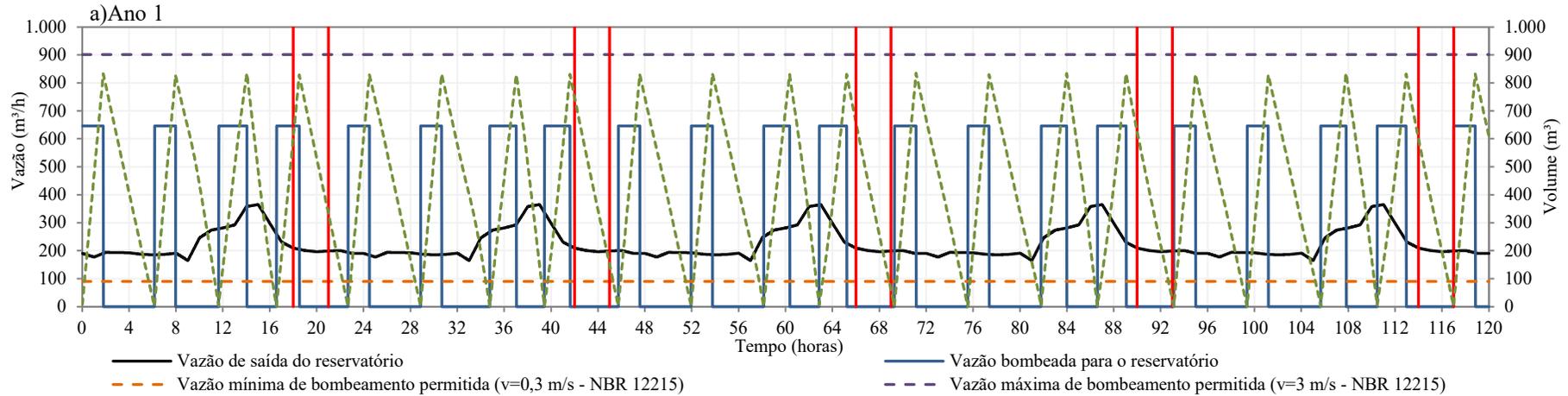


Comparação entre os valores de CO/CCV e CI/CCV para a Curva de Assunção e para as curvas utilizadas no desenvolvimento das equações.

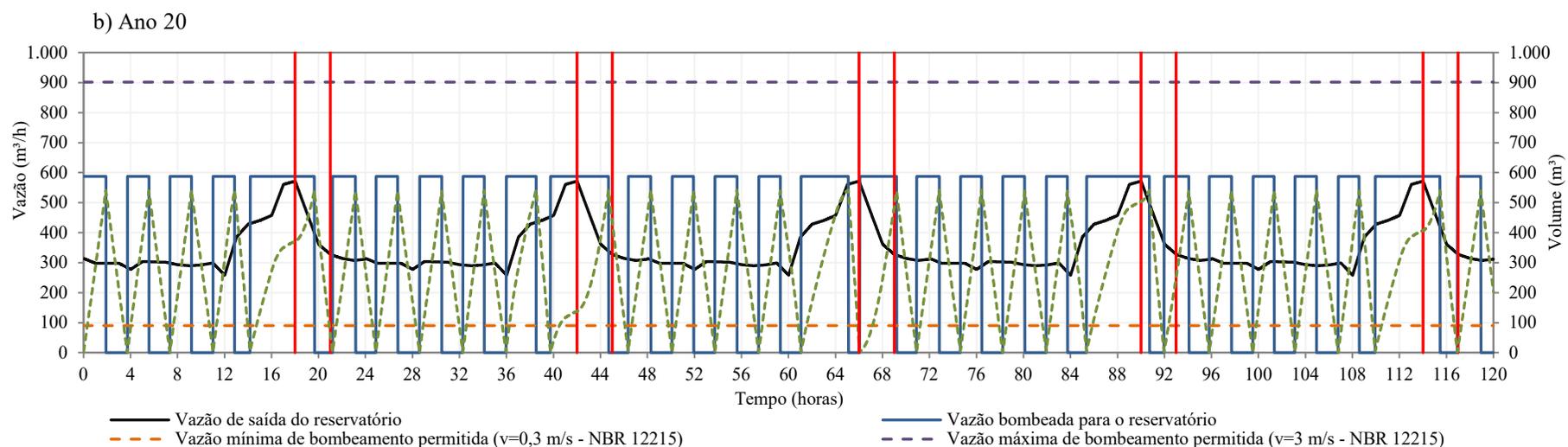
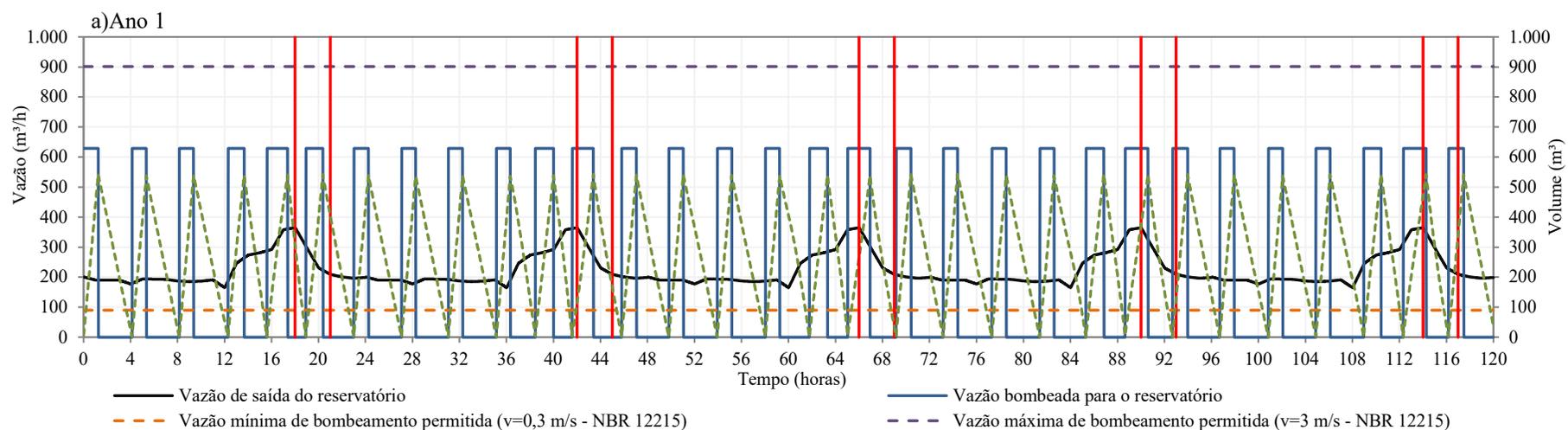


Comparação entre os valores de v_1 , v_{20} , $V_u/demanda_{20}$, Q_{b1}/Q_{c20max} , J_{t1}/H_g e J_{t20}/H_g para a Curva de Assunção e para as curvas utilizadas no desenvolvimento das equações.

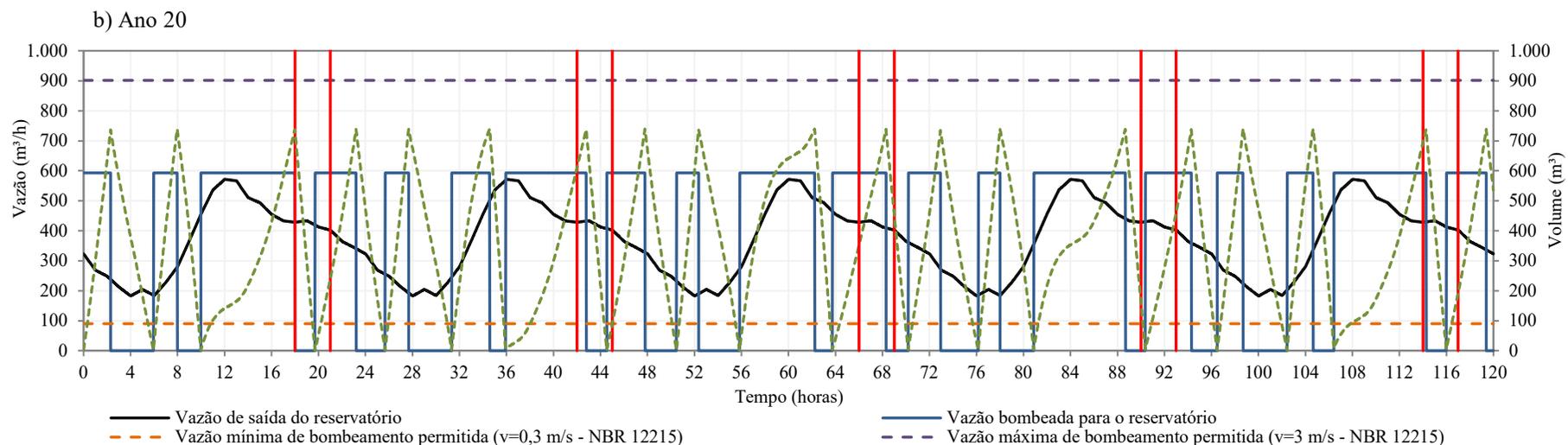
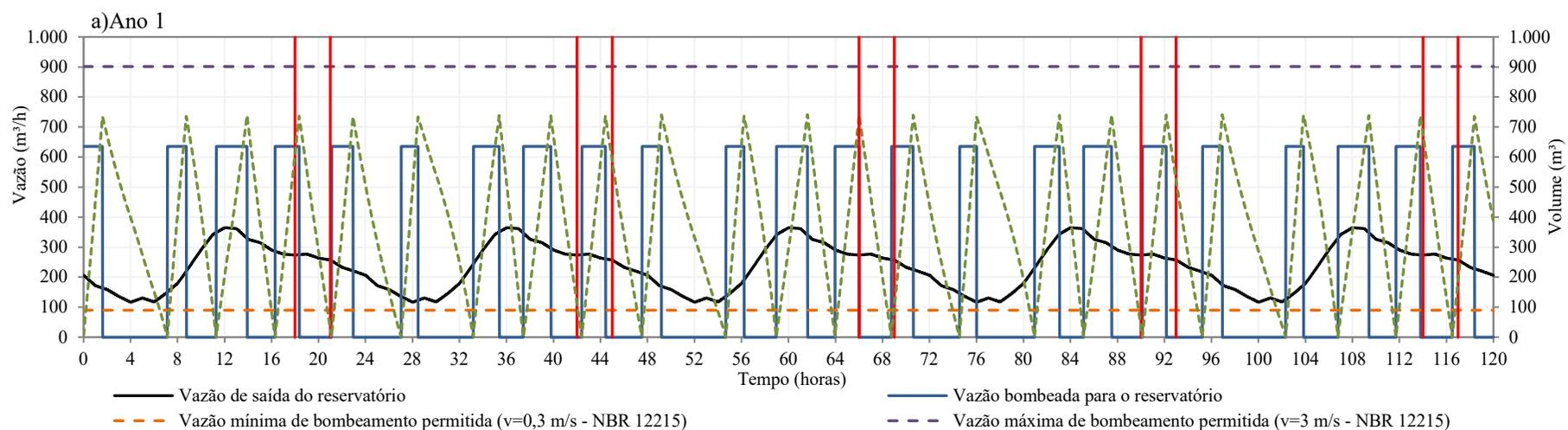
APÊNDICE B – EXEMPLOS DE ROTINAS OPERACIONAIS PARA AS DEMAIS CURVAS DE CONSUMO ANALISADAS NA PESQUISA



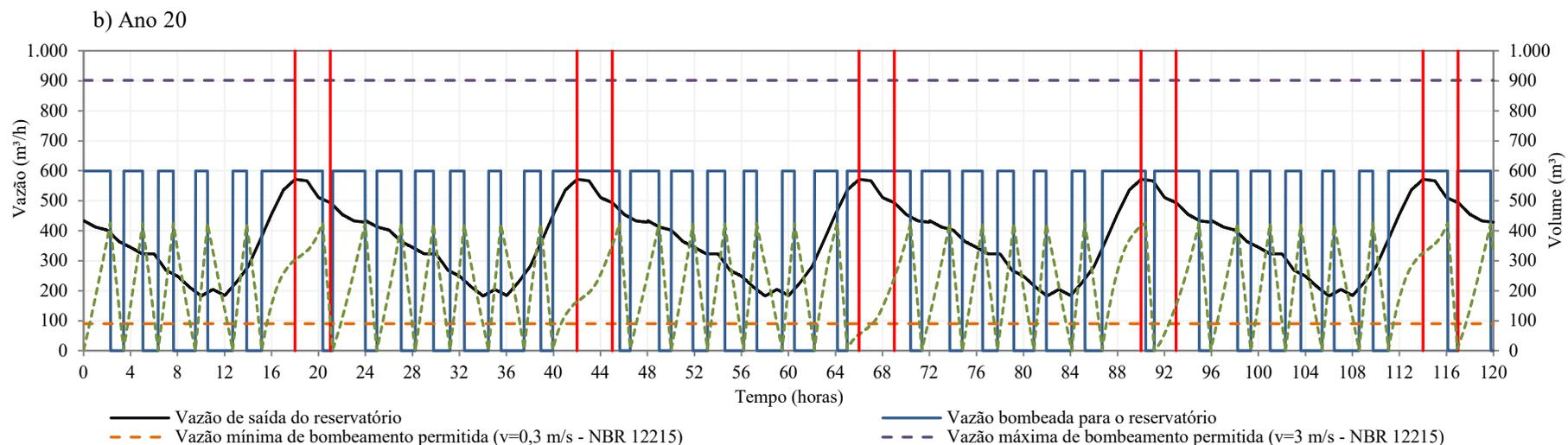
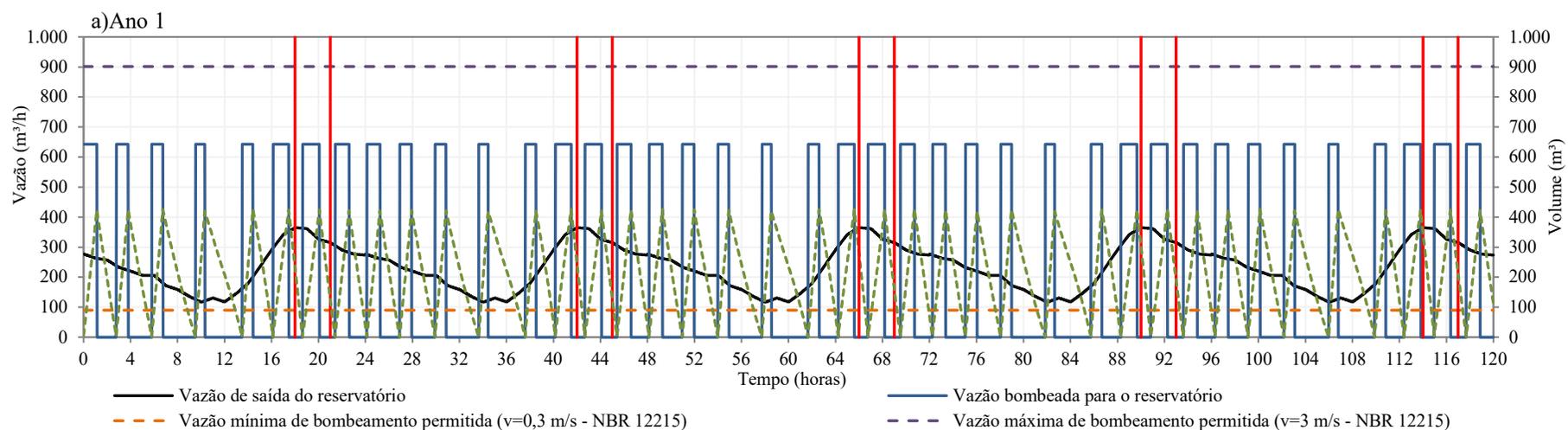
Rotinas de bombeamento durante 5 dias (120 h) de operação geradas pelo SRC para a combinação $H_g = 75$ m / $L = 1000$ m / $D_i = 326$ mm, para suprir a curva de consumo da UFPA – Belém/PA ($FD = 0,62$), no ano 1 e no ano 20.



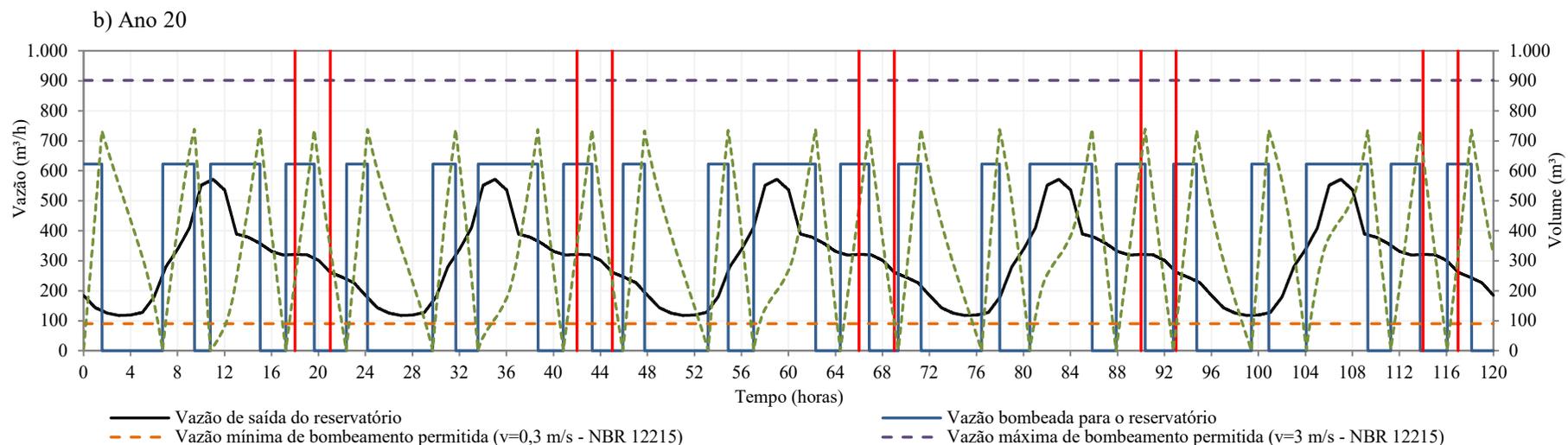
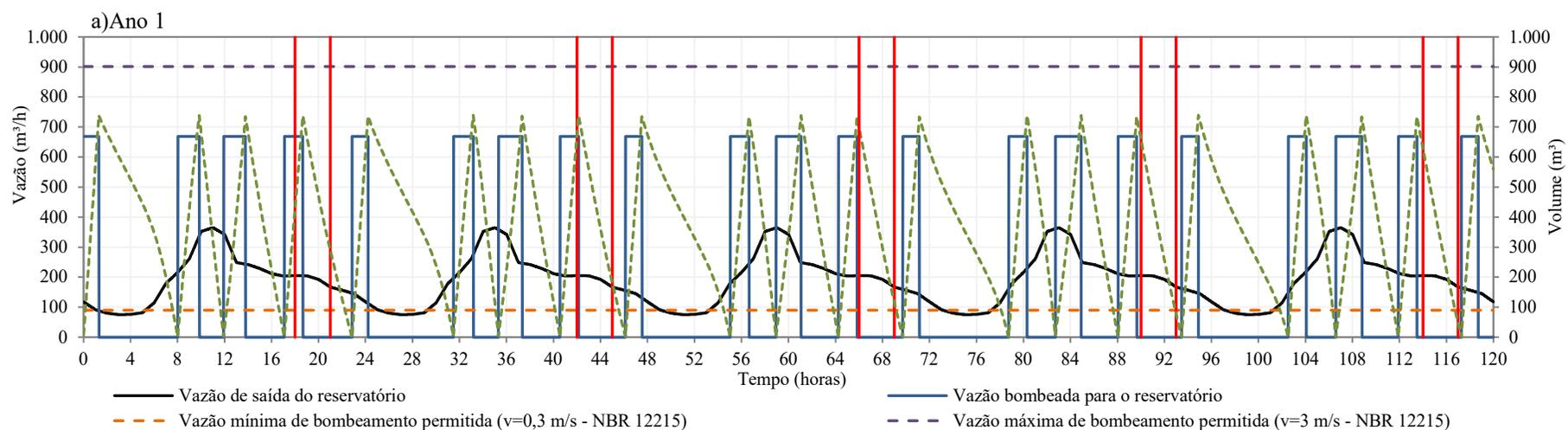
Rotinas de bombeamento durante 5 dias (120 h) de operação geradas pelo SRC para a combinação $H_g = 75$ m / $L = 1000$ m / $Di = 326$ mm, para suprir a curva **Deslocada** de consumo da UFPA – Belém/PA ($FD = 0,62$), no ano 1 e no ano 20.



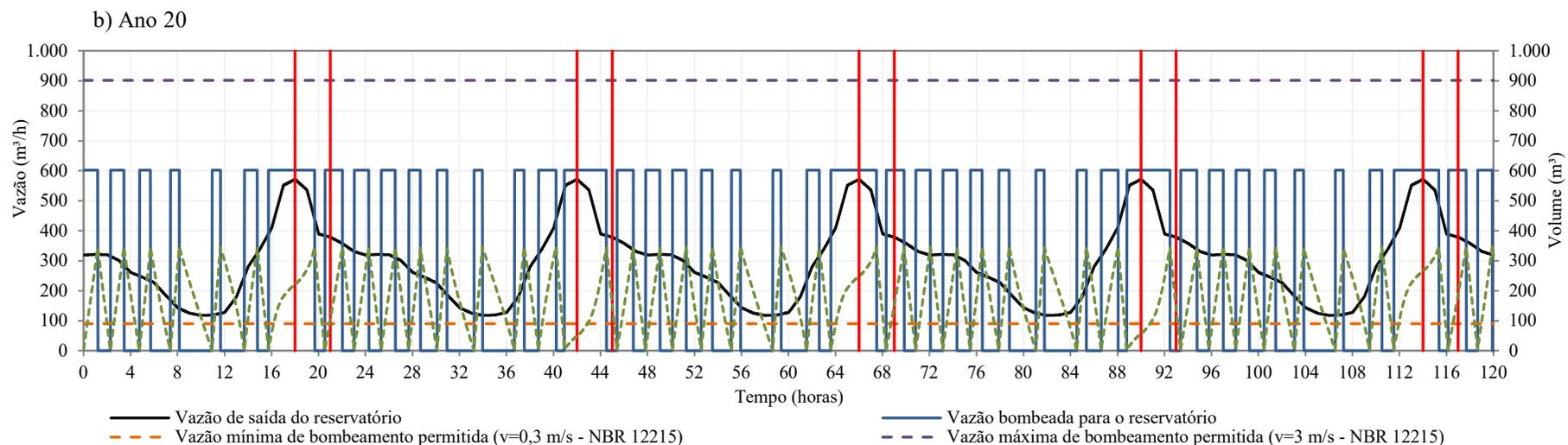
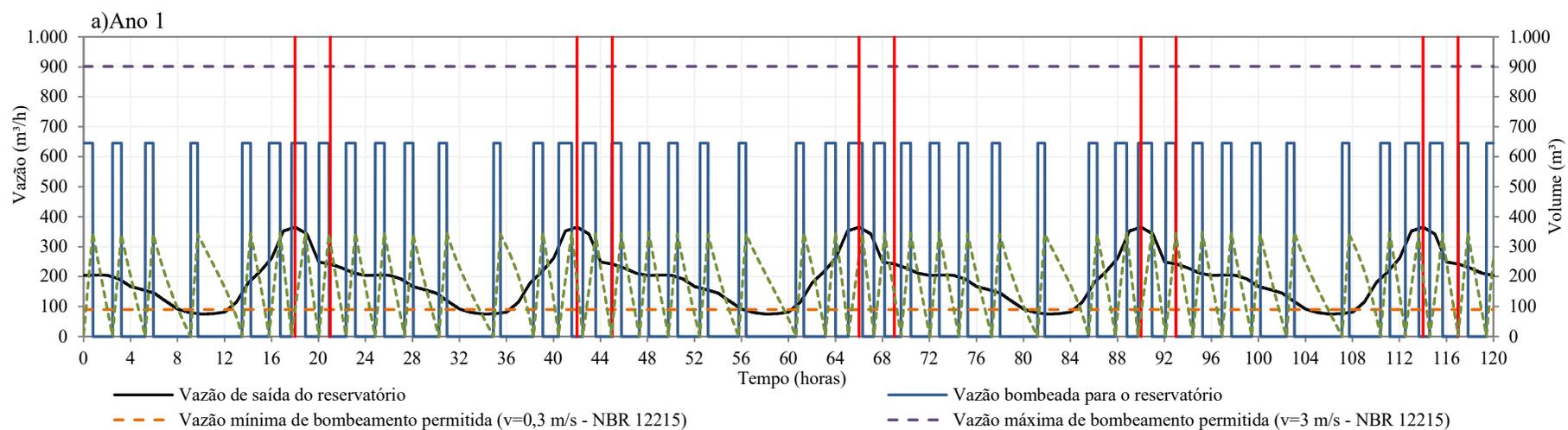
Rotinas de bombeamento durante 5 dias (120 h) de operação geradas pelo SRC para a combinação $H_g = 75 \text{ m} / L = 1000 \text{ m} / D_i = 326 \text{ mm}$, para suprir a curva de consumo do Jardim Popular - RMSP ($FD = 0,65$), no ano 1 e no ano 20.



Rotinas de bombeamento durante 5 dias (120 h) de operação geradas pelo SRC para a combinação $H_g = 75 \text{ m} / L = 1000 \text{ m} / D_i = 326 \text{ mm}$, para suprir a curva deslocada de consumo do Jardim Popular - RMSP ($FD = 0,65$), no ano 1 e no ano 20.



Rotinas de bombeamento durante 5 dias (120 h) de operação geradas pelo SRC para a combinação $H_g = 75 \text{ m} / L = 1000 \text{ m} / D_i = 326 \text{ mm}$, para suprir a curva de consumo do município de Santana do Livramento - RS ($FCA = 0,52$), no ano 1 e no ano 20.



Rotinas de bombeamento durante 5 dias (120 h) de operação geradas pelo **SRC** para a combinação $H_g = 75 \text{ m} / L = 1000 \text{ m} / D_i = 326 \text{ mm}$, para suprir a curva deslocada de consumo do município de Santana do Livramento - RS ($FD = 0,52$), no ano 1 e no ano 20.

9 ANEXOS

ANEXO I – MÉTODOS DE PROJEÇÃO POPULACIONAL

Para o projeto de sistemas de abastecimento de água, de modo geral, é necessário o conhecimento da população de final de plano, bem como da sua evolução ao longo do tempo. Essa população pode ser estimada utilizando métodos de projeção populacional. Autores da literatura de saneamento, como Tsutiya e Além Sobrinho (2011), Gomes (2009b), Tsutiya (2006b) e Von Sperling (2005) citam os métodos listados abaixo:

- Método componentes demográficos
- Método aritmético
- Método geométrico
- Crescimento logístico
- Taxa decrescente de crescimento
- Comparação gráfica
- Razão e correlação
- Modelo baseado no ajuste linear
- Modelo baseado na equação da curva de potência
- Modelo baseado na equação exponencial
- Modelo baseado na equação logarítmica
- Previsão de empregos e serviços de utilidade

A seguir, serão discutidos os métodos de projeção aritmética, projeção geométrica, e crescimento logístico, utilizados neste estudo.

a) Método Aritmético

É um método que pressupõe taxa de crescimento constante para os anos que se seguem, a partir dos dados conhecidos, por exemplo, a população do último censo (TSUTIYA e ALÉM SOBRINHO, 2011). Este método pode ser utilizado para estimativas de menor prazo (TSUTIYA, 2006b) e seu ajuste pode ser realizado por análise de regressão (VON SPERLING, 2005).

Matematicamente, pode ser representado da equação 1.

$$P = P_2 + ka(t - t_2) \quad 1$$

O valor de ka, que é uma constante, pode ser obtido pela equação 2

$$ka = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad 2$$

Onde P1 é a população do penúltimo censo (ano t1), P2 é a população do último censo (ano t2) e P é a população futura (ano t), a qual se quer determinar.

b) Método Geométrico

Este método pressupõe que o crescimento da população é proporcional a população existente em um determinado ano (TSUTIYA e ALÉM SOBRINHO, 2011). Este método pode

ser utilizado para estimativas de menor prazo e seu ajuste pode ser realizado por análise de regressão (VON SPERLING, 2005).

A sua formulação matemática pode ser apresentada pela equação 3

$$P = P_2 e^{kg(t-t_2)} \quad 3$$

O valor de kg representa a taxa de crescimento geométrico, e pode ser obtido pela equação 4.

$$kg = \frac{\ln(P_2) - \ln(P_1)}{t_2 - t_1} \quad 4$$

Onde P1 é a população do penúltimo censo (ano t1), P2 é a população do último censo (ano t2) e P é a população futura (ano t), a qual se quer determinar.

c) Método do crescimento logístico (curva logística)

Neste método, admite-se que o crescimento da população obedece a uma relação matemática do tipo curva logística (figura 1), nos quais a população cresce assintoticamente em função do tempo para um valor limite de saturação (TSUTIYA e ALÉM SOBRINHO, 2011; TSUTIYA, 2006b). Os Parâmetros podem ser também estimados por regressão linear (VON SPERLING, 2005).

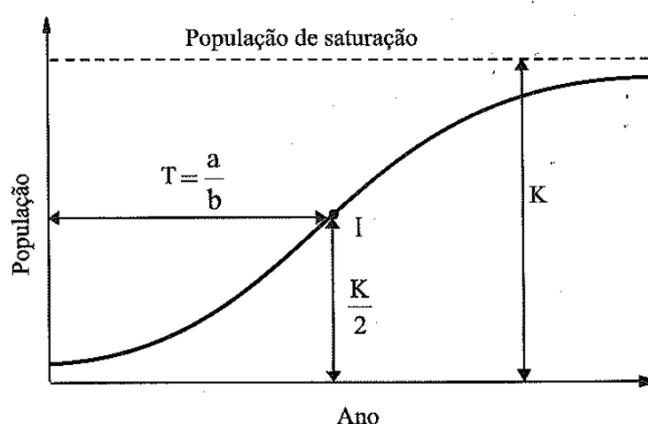


Figura 1 – Curva logística.
Fonte: Tsutiya (2006b)

A população pode ser determinada pela equação 5.

$$P = \frac{K}{1 + e^{a-bT}} \quad 5$$

O valor de K, que representa o limite de saturação, pode ser determinado pela equação 6.

$$K = \frac{2P_0P_1P_2 - (P_1)^2(P_0 + P_2)}{P_0P_2 - (P_1)^2} \quad 6$$

Pela equação 7 pode ser determinado o valor de a, que é um valor tal que, para $T=a/b$, há uma inflexão (mudança no sentido da curvatura) na curva.

$$a = -\frac{1}{0,4343} \log \frac{K - P_0}{P_0} \quad 7$$

O valor de b, que é a razão de crescimento da população, pode ser obtido pela equação 8.

$$b = -\frac{1}{0,4343d} \log \frac{P_0(K + P_1)}{P_1(K + P_0)} \quad 8$$

O valor de T representa o intervalo de tempo entre o ano da projeção e t_0 . Esses parâmetros são determinados a partir de três pontos conhecidos da curva $P_0(t_0)$, $P_1(t_1)$ e $P_2(t_2)$ igualmente espaçados no tempo, isto é, $t_1 - t_0 = t_2 - t_1$. Os pontos P_0 , P_1 e P_2 , que correspondem às populações do antepenúltimo, penúltimo e último Censo, respectivamente, devem ser tais que $P_0 < P_1 < P_2$ e $P_0 P_2 < P_1^2$. O valor de d, é o intervalo constante entre os anos t_0, t_1 e t_2 .

ANEXO II – %PIS E %COFINS FORNECIDO PELA CEEE, DO ANO DE 2006 A2019.

fev/19	1,15	5,10	6,25	mai/16	1,01	4,65	5,66	mar/13	0,66	3,06	3,73	set/10	0,85	3,92	4,77	mar/08	1,07	4,93	6,00
jan/19	0,92	4,21	5,13	abr/16	1,06	6,45	7,51	fev/13	0,47	2,19	2,66	ago/10	0,77	3,54	4,31	fev/08	1,03	4,75	5,78
dez/18	0,47	2,15	2,62	fev/16	1,06	4,90	5,96	jan/13	0,78	3,60	4,39	jul/10	0,80	3,67	4,46	jan/08	1,00	4,57	5,57
nov/18	0,75	3,45	4,20	dez/15	0,70	3,22	3,92	dez/12	0,84	3,88	4,72	jun/10	0,85	3,93	4,78	dez/07	0,89	4,08	4,97
out/18	0,74	3,41	4,15	nov/15	0,58	2,63	3,20	nov/12	0,82	3,78	4,60	mai/10	1,02	4,72	5,74	nov/07	0,85	4,10	4,95
set/18	0,95	4,40	5,35	out/15	0,84	3,87	4,71	out/12	0,91	4,21	5,13	abr/10	0,99	4,55	5,54	out/07	0,91	4,22	5,13
ago/18	0,53	2,38	2,90	set/15	1,35	3,19	4,54	set/12	0,97	4,46	5,43	mar/10	0,98	4,49	5,47	set/07	0,91	4,03	4,94
jul/18	0,80	3,57	4,37	jul/15	0,23	3,04	3,27	ago/12	0,71	3,25	3,96	fev/10	0,86	3,98	4,85	ago/07	0,99	3,73	4,72
jun/18	0,85	3,04	3,89	jun/15	1,11	2,21	3,32	jul/12	0,66	3,08	3,74	jan/10	0,88	4,06	4,94	jul/07	0,86	3,50	4,36
mai/18	0,33	2,09	2,42	mai/15	0,75	3,45	4,20	jun/12	0,80	3,72	4,52	dez/09	0,85	3,91	4,76	jun/07	0,77	3,55	4,32
abr/18	0,81	4,73	5,54	mar/15	1,23	5,66	6,89	mai/12	1,10	5,15	6,25	nov/09	0,86	3,95	4,81	mai/07	0,72	3,43	4,15
mar/18	0,78	3,63	4,41	fev/15	0,63	2,90	3,53	abr/12	1,03	5,04	6,07	out/09	0,89	4,08	4,97	abr/07	0,78	3,69	4,48
fev/18	0,99	4,57	5,56	jan/15	0,54	2,50	3,05	mar/12	0,96	4,40	5,36	set/09	0,81	3,72	4,53	mar/07	0,75	3,91	4,66
jan/18	0,62	2,85	3,46	dez/14	0,59	2,74	3,33	fev/12	0,96	4,40	5,36	ago/09	0,90	4,12	5,02	fev/07	0,84	3,82	4,66
dez/17	0,68	3,18	3,86	nov/14	0,20	0,90	1,10	jan/12	0,86	3,97	4,83	jul/09	0,96	4,41	5,37	jan/07	1,27	3,38	4,65
nov/17	0,60	2,74	3,34	out/14	0,43	2,01	2,44	dez/11	0,82	3,78	4,61	jun/09	0,87	4,03	4,90	dez/06	0,90	3,89	4,78
out/17	0,52	2,38	2,90	set/14	0,19	0,89	1,09	nov/11	0,81	3,75	4,56	mai/09	0,88	4,04	4,92	nov/06	0,06	4,73	4,78
set/17	0,53	2,42	2,95	ago/14	0,20	0,91	1,11	out/11	0,96	4,42	5,38	abr/09	0,80	3,68	4,48	out/06	1,04	4,81	5,85
ago/17	1,20	5,31	6,51	jul/14	0,22	1,04	1,26	set/11	0,99	4,56	5,55	mar/09	0,86	3,96	4,82	set/06	1,03	4,72	5,75
jul/17	1,11	5,12	6,23	jun/14	0,26	1,20	1,46	ago/11	0,79	3,64	4,43	fev/09	0,83	3,83	4,66	ago/06	1,07	4,91	5,98
jun/17	1,25	5,76	7,01	mai/14	0,34	1,59	1,93	jul/11	0,94	4,34	5,29	jan/09	0,70	3,22	3,92	jul/06	0,97	4,47	5,44
mai/17	1,07	4,94	6,02	abr/14	0,64	2,95	3,59	jun/11	0,93	4,26	5,19	dez/08	0,79	3,64	4,44	jun/06	1,07	4,92	5,99
abr/17	0,61	2,83	3,44	jan/14	0,85	3,91	4,75	mai/11	0,86	3,98	4,84	nov/08	0,98	4,52	5,50	mai/06	1,05	4,85	5,91
mar/17	0,53	2,42	2,95	nov/13	0,53	2,44	2,97	abr/11	1,19	5,50	6,69	out/08	0,74	3,43	4,18	abr/06	1,17	5,37	6,54
dez/16	0,60	2,79	3,40	out/13	0,52	2,42	2,94	mar/11	0,96	4,40	5,36	set/08	0,95	4,37	5,31	mar/06	1,16	5,34	6,50
nov/16	0,61	2,81	3,42	set/13	0,47	2,15	2,61	fev/11	0,92	4,23	5,15	ago/08	1,03	4,74	5,77	fev/06	1,11	5,13	6,24
out/16	0,58	3,35	3,93	jul/13	0,19	0,87	1,06	jan/11	0,87	4,02	4,89	jul/08	0,81	3,74	4,55	jan/06	1,11	5,09	6,20
set/16	1,02	4,68	5,70	jun/13	0,24	1,09	1,33	dez/10	0,67	3,08	3,75	jun/08	0,95	4,37	5,32	dez/05	0,99	4,56	5,55
ago/16	0,75	3,44	4,19	mai/13	0,25	1,13	1,37	nov/10	0,75	3,43	4,18	mai/08	0,87	4,02	4,90	nov/05	0,99	4,57	5,56
jul/16	0,99	4,56	5,55	abr/13	0,79	3,62	4,41	out/10	0,90	4,14	5,03	abr/08	0,99	4,53	5,52	out/05	1,00	4,58	5,58

Mês/Ano

% PIS

%COFINS

% (PIS+COFINS)

Fonte: CEEE, 2019.

ANEXO III – FOLDER TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA PARA O GRUPO A - CEEE/RS

Tabela de Tarifas - Grupo A



Vigentes a partir de 22/11/2019, conforme Resolução Homologatória ANEEL Nº 2.640/2019.

Valores dos adicionais das bandeiras tarifárias alterados pela REH ANEEL Nº 2.628/2019.

Tarifas de Energia Elétrica aplicáveis ao Grupo A - Em R\$ sem impostos

			A2 (138 kV)	A3 (69 kV)	A4 (13,8/25 kV)	A5 (220/217 V)
Modalidade Tarifária Horária Azul	Demanda Ponta	R\$/kW	14,82	15,45	41,79	54,97
	Demanda Fora Ponta	R\$/kW	11,84	9,47	18,89	14,50
	Energia Ponta	R\$/kWh	0,482940	0,483550	0,497540	0,519130
	Energia Fora Ponta	R\$/kWh	0,310390	0,311000	0,324990	0,346580

			A4 (13,8/25 kV)	A5 (220/217 V)
Modalidade Tarifária Horária Verde	Demanda	R\$/kW	18,89	14,50
	Energia Ponta	R\$/kWh	1,515010	1,857710
	Energia Fora Ponta	R\$/kWh	0,324990	0,346580

Adicionais Sistema de Bandeiras Tarifárias

Adicional Bandeira Amarela	0,01343 R\$/kWh
Adicional Bandeira Vermelha - Patamar 1	0,04169 R\$/kWh
Adicional Bandeira Vermelha - Patamar 2	0,06243 R\$/kWh

V _{REDE} - Valor de referência faturamento da energia reativa excedente por unidade registrada. Art. 96 e 97 da REN ANEEL 414/2010	0,266840
---	----------

Descontos Percentuais Aplicáveis ao Grupo A

Classe	Demanda (kW)	Energia (kWh)
Rural	8%	8%
Serviço Público - Água, Esgoto e Saneamento	12%	12%
Irrigante e Aquicultor em horário especial (art. 107 REN 414/2010)	-	70%

Obs.: Não incidem descontos sobre os adicionais de Bandeiras Tarifárias, exceto Art. 107 da 414/2010.

Composição do Preço a ser Aplicado

Preço Final =	$\frac{\text{Preço Homologado}}{(1 - \text{PIS}(\%) - \text{COFINS}(\%) - \text{ICMS}(\%))}$
---------------	---

Alíquotas de ICMS

30%	Residencial (acima de 50 kWh), Comercial, Poderes Públicos, Serviços Públicos, Rural (sem CPR)
18%	Industrial (reconhecido pela SEFAZ)
12%	Residencial (até 50 kWh) Rural com CPR (sobre 100 kWh + difernimento)

Observações

O acionamento das Bandeiras Tarifárias é realizado dentro do mês civil de acordo com a divulgação da ANEEL a partir de janeiro 2015.

O adicional de bandeira é aplicado sobre a quantidade de consumo de energia elétrica medido (kWh) nos dias de vigência de cada bandeira tarifária, com base na data de início e fim do ciclo de faturamento. Valores alterados pela REH 2.628 a partir de 01/11/2019.

Os preços dispostos na tabela acima apresentam os valores da TUSD e TE somados.

Eventual ultrapassagem na Demanda Contratada incide em faturamento complementar correspondente ao valor da ultrapassagem, com aplicação de tarifa igual a duas vezes o preço da demanda regular, sem incidência de descontos, conforme Art. 93 da REN 414.

As alíquotas de PIS e COFINS têm variação mensal. Estas podem ser consultadas no site www.ccee.com.br.

Fonte: CEEE, 2019.

ANEXO IV – ESTIMATIVA DO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

A composição dos custos para o sistema bombeamento foi realizada a partir equações propostas por Kuritza (2017) e de equações desenvolvidas neste trabalho a partir de dados disponibilizados por Tassinari (2017). Vale ressaltar que o uso de equações e dados de trabalhos anteriores, não é o ideal, pois podem apresentar certa defasagem nos valores. No entanto, a dificuldade na obtenção de cotações, junto a fabricantes de produtos tão específicos, como motores elétricos de alta potência, bombas de alta potência, reservatórios de elevado volume de armazenamento e variadas alturas, bem como dispositivos de proteção contra transientes hidráulicos, com variados volumes, motivou o uso de equações já existentes. Os custos desses equipamentos não estão disponíveis em sites ou catálogos técnicos. Alguns desses produtos, como os motores elétricos com potência acima de 500 cv, costumam ser fabricados por encomenda (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ, 2015). Neste caso, é preciso disponibilidade dos fabricantes para estudar o produto solicitado, antes de realizar a cotação.

a) Custos de implantação da linha de adução

Para realizar a previsão custos de implantação de linhas de adução, Kuritza (2017) utilizou o preço da tubulação em ferro fundido dúctil da classe K7, com junta JGS, acrescido do preço do assentamento da tubulação, para desenvolver a equação 1.

$$C_{Adu\text{tora}} = 0,0023 \cdot D^2 + 0,5306 \cdot D + 94,999 \quad 1$$

Onde $C_{Adu\text{tora}}$ é o custo de implantação da tubulação, em R\$/m, e D é o diâmetro da tubulação, em mm.

b) Custos de implantação do Conjunto Motor e Bomba (CMB)

Para a previsão deste custo, foram utilizadas duas equações que correlacionam esse custo com a potência instalada. A primeira, sendo a equação 2, é válida para potências instaladas de até 103 kW (Kuritza, 2017).

$$C_{CMB} = 3,1688 \cdot P_{inst}^2 + 388,55 \cdot P_{inst} + 9022,1 \quad 2$$

Onde C_{CMB} é o custo de implantação do CMB em R\$, e P_{inst} é a potência instalada em kW.

Caso a potência instalada selecionada pelo programa fosse superior a 103 kW, o custo do CMB seria calculado pela equação 3, determinada a partir do ajustes potencial ($R^2=0,99$) dos valores do gráfico da figura 1.

$$C_{CMB} = 387,4 * P_{inst}^{1,1538} \quad 3$$

Onde C_{CMB} é o custo de implantação do CMB em R\$, e P_{inst} é a potência instalada em kW.

Os valores da Figura 1 são uma projeção de custos realizada, a partir da equação 2.

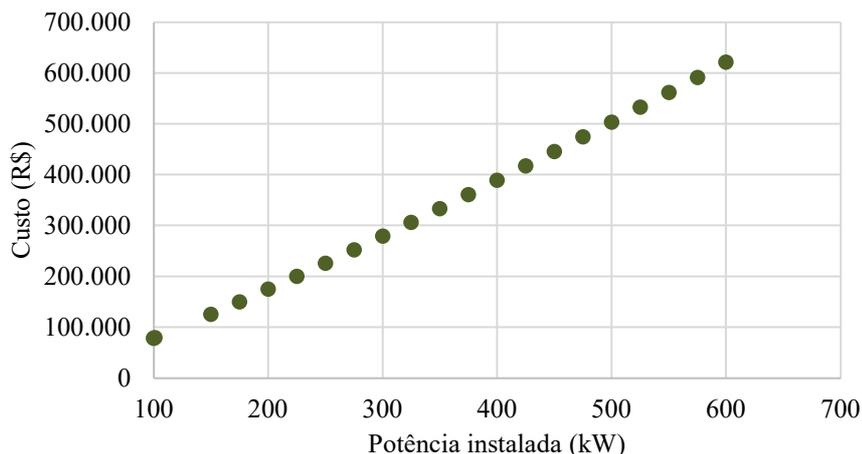


Figura 1 – Custo de implantação para CMBs com potências acima de 103 kW.
Fonte: MARQUES, 2020.

c) Custos de implantação do reservatório

A equação de previsão dos custos de implantação de reservatórios foi obtida a partir de dados propostos por Gomes (2016) *apud* Kuritza (2017). Pela correlação entre volume total do reservatório e o custo de implantação, foi obtida a equação 4.

$$C_{\text{Reservatório}} = -0,1202 \cdot V_u^2 + 345,94 \cdot V_u + 63443 \quad 4$$

Onde $C_{\text{Reservatório}}$ é o custo de implantação do reservatório em R\$, e V_u útil do reservatório em m^3 .

d) Custos de implantação dos dispositivos de proteção contra transientes

Para a verificação da necessidade de dispositivos de proteção, (ver item 3.3.1.1) usa-se a relação entre L e H_m conforme a equação 5.

$$\frac{L}{H_m} \leq 5 \quad 5.$$

Onde L é o comprimento total da linha de adução e H_m é a altura manométrica.

Para aumentar a segurança na verificação da necessidade do dispositivo, H_m foi substituído por sua componente H_g , que resultou na 6

$$\frac{L}{H_g} \leq 5 \quad 6$$

Onde H_g é a altura geométrica (em m).

Nos casos em que o comprimento da adutora sobrepor cinco vezes H_g , haverá a necessidade de se prever um dispositivo de proteção.

O critério do tempo de desaceleração do escoamento, equação 7, também foi utilizado. Por este método, caso o valor de t_h for interior a 3 s, não haverá necessidade de dispositivo.

Existem casos de não se necessitar de dispositivo para valores até 6 s para t_h . Acima de 6 s, a presença do dispositivo é obrigatória.

$$t_h = \frac{vL}{gH_m} \quad 7$$

Onde t_h é o tempo de desaceleração do escoamento em segundos, L é o comprimento da tubulação, v é a velocidade de escoamento em m/s e H_m é a altura manométrica em m.c.a.

Nas combinações de parâmetros geométricos em que um dispositivo de proteção foi necessário, foi adotada a chaminé de equilíbrio (*standpipe*) de seção simples, que embora possa ter custo geralmente mais elevado que outros dispositivos, a chaminé de equilíbrio é uma solução robusta para o amortecimento de pressões máximas e mínimas, tendo elevada confiabilidade por apresentar maior simplicidade operacional e de manutenção. Assim, devido a chaminé de equilíbrio atender a todas as condições extremas de pressões que podem ocorrer em uma linha pressurizada, este dispositivo será o único utilizado nesta pesquisa, pois dessa forma também será diminuída a complexidade do estudo e conseqüentemente, o esforço computacional demandado.

Para a previsão de custos de uma chaminé de equilíbrio, foi utilizada a Figura 2, que relaciona o custo da chaminé com o seu volume. Os valores da Figura 2 foram obtidos a partir do orçamento de chaminés de equilíbrio em concreto, com diâmetro de 3,5 m e altura variável, obtendo-se diferentes volumes para cada dispositivo (TASSINARI, 2017).

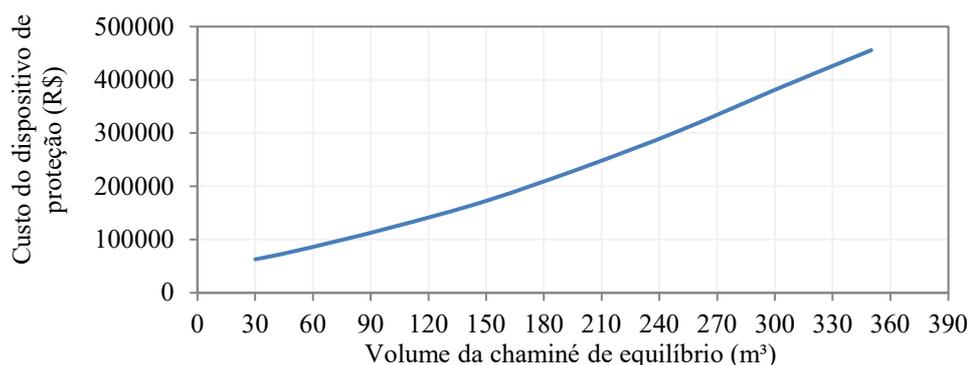


Figura 2 - Custo da chaminé de equilíbrio em função do volume

Fonte: Tassinari, 2017.

A partir do gráfico da figura 2, foram extraídos os valores exibidos na tabela 1.

Tabela 1 - Valores de custo da chaminé de equilíbrio em relação ao seu volume.

Volume (m³)	Custo (R\$)
30	63108,30
50	77907,50
100	122022,50
150	172925,80
200	235181,60
250	304100,10
300	381267,9
350	456107,2

Para esses dados emparelhados, representados pela na tabela 1, foi desenvolvida a equação 8, obtida a partir de um ajuste polinomial utilizando o *software* Microsoft Excel, versão 2016.

$$C_{\text{Chaminé}} = 1,4685 \cdot (V_{\text{Chaminé}})^2 + 683,81 \cdot (V_{\text{Chaminé}}) + 39933 \quad 8$$

Onde $C_{\text{Chaminé}}$ é o custo da chaminé de equilíbrio em R\$, V_c é o volume do dispositivo em m^3 .