

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE  
SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA COM VELOCIDADE DE  
ROTAÇÃO VARIÁVEL**

JÓICE CRISTINI KURITZA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

Co-Orientador: Prof. Dr. Juan Martin Bravo

Banca Examinadora

Prof. Dr. Fernando Das Graças Braga Da Silva – UNIFEI

Prof. Dr. Daniel Costa Dos Santos – UFPR

Prof. Dr. Dieter Wartchow – UFRGS

Porto Alegre, outubro de 2017.

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e co-orientado pelo Prof. Dr. Juan Martin Bravo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dedico aos meus pais, Jairo e Eliane, por acreditarem em mim e me apoiarem em tudo, e ao meu amor, Diego, pela eterna paciência em me ouvir.

## AGRADECIMENTOS

A realização desta pesquisa só foi possível graças ao apoio e auxílio que recebi ao longo de toda a caminhada, logo, não seria possível encerrar este ciclo sem dedicar um agradecimento especial...

A Deus, por me conceder o dom da vida e por ser minha principal fonte de força e coragem.

Aos meus pais, Jairo Cesar Kuritza e Eliane Schmitt Osório, por terem me ensinado não só com palavras, mas principalmente com exemplos, que é preciso ter fé e trabalhar muito para chegar onde se quer.

Ao meu amor, Diego Swenar Gasparetto, por compartilhar sua vida comigo e por ter me incentivado e encorajado a prosseguir mesmo quando eu achava que não conseguiria mais.

Ao professor Marcelo Giulian Marques, pela orientação e pelas oportunidades de aprendizado ao longo dos anos de convivência e ao professor Juan Martin Bravo, pela orientação e incrível paciência durante o desenvolvimento e aprimoramento da pesquisa.

Ao querido casal, Rodrigo Scapinello e Mariane Kempka, meus fiéis companheiros da vida Porto Alegre, por terem dividido muitos momentos comigo, sempre com tanto carinho. É preciso, contudo, que eu dedique um agradecimento especial à Mari por ter vivido junto a mim essa aventura, pelas noites na biblioteca, pelos finais de semana de estudo, pelos planos, projetos e sonhos idealizados sempre com tanta esperança e alegria.

À amiga Luiza Kerber, por termos compartilhado um lar, e não apenas um teto.

À minha eterna equipe de apoio: Heloisa, Ludmila, Caciane, Dariana, Larissa, Leticia, Débora, Bárbara e Laís, por estarem sempre presentes e perto do coração, ainda que estivessem tão longe fisicamente.

Aos amigos do Laboratório de Obras Hidráulicas, pelos momentos de descontração e convívio. Ao bolsista de iniciação científica, futuro engenheiro mecânico, Giovani Camponogara, por toda ajuda dedicada a mim e ao meu trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos durante o período de março de 2013 a outubro de 2015

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS – Campus Sertão) pela concessão do afastamento das atividades docentes no período de março a novembro de 2017.

E finalmente, ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por todas as oportunidades de aprendizado oferecidas.

## RESUMO

O consumo de energia dispendido pelos sistemas de bombeamento apresenta valores elevados e que podem onerar a operação dos sistemas de abastecimento de água realizada pelas companhias de saneamento. Assim, esta pesquisa está centrada no desenvolvimento de uma metodologia para análise da eficiência energética desses sistemas. O procedimento metodológico foi desenvolvido para uma tipologia genérica de sistema composta de dois reservatórios, inferior e superior, um conjunto motobomba e uma adutora, responsável pelo transporte de água entre eles. Foram avaliadas 96 possibilidades geométricas para esse sistema, formadas a partir da combinação de diferentes alturas geométricas, comprimentos e diâmetros da linha adutora. Ainda, foram estudados três formatos de curva, com quatro volumes de consumo diário distintos, em duas situações, início e fim de projeto. O algoritmo *Shuffled Complex Evolution* – SCE-UA foi empregado para obter a regra de operação otimizada do sistema de bombeamento e a função-objetivo foi formulada para representar os custos de energia para 20 anos de operação somado aos custos de instalação do sistema de bombeamento (adutora, reservatório superior e conjunto motobomba). Além disso, foram calculados índices e indicadores para facilitar o entendimento e a avaliação da eficiência energética de sistemas de bombeamento. A partir da análise dos resultados dos sistemas cuja operação foi otimizada, e dos resultados dos índices e indicadores, foram estabelecidos critérios e equações que podem ser utilizados para análise da operação, dimensionamento e eficiência energética de sistemas de bombeamento de água. Também, foi desenvolvida uma metodologia para a estimativa da energia mínima que um sistema de bombeamento pode consumir se todos os critérios de eficiência energética forem satisfeitos, ou seja, quando todas as grandezas que compõem o cálculo da energia forem determinadas a partir de critérios otimizados. Essa metodologia foi aplicada em dois cenários: projetos de sistemas de bombeamento de água e diagnóstico de sistemas de bombeamento de água existentes. Na primeira abordagem, o indicador se mostrou útil para inferir sobre consumo de energia e, inclusive, definir o diâmetro ótimo da linha adutora com maior ponderação. Já na segunda abordagem, o indicador tem potencial para ser utilizado na definição da linha de base do sistema e pode auxiliar a tomada de decisão e gestão hidroenergética desses sistemas.

**Palavras-chave:** Eficiência energética, Sistemas de bombeamento, Indicadores, Energia mínima.

## ABSTRACT

The energy consumed by the pumping systems has high values and can overload the operation of the water supply systems carried out by the sanitation companies. Thus, this research is focused on the development of a methodology to analyze the energy efficiency of these systems. The methodological procedure was developed for a generic system composed of two reservoirs, upper and lower, pumping system and a pipeline, responsible for transporting water between the reservoirs. It was evaluated 96 geometric possibilities for this system, formed from the combination of different static heights, lengths and diameters of the pipeline. Also, three curve formats were studied, with four distinct daily consumption volumes, in two situations, beginning and end of the project. The Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) algorithm was employed to obtain the optimal operating rule for the pumping system and the objective function was formulated to represent the energy costs for 20 years of operation plus the pumping system installation costs (pipeline, upper reservoir and pumping system). In addition, indexes and indicators were calculated to facilitate the understanding and evaluation of the energy efficiency of pumping systems. Based on the analysis of the results of the systems whose operation was optimized, and the results of indexes and indicators, criteria and equations were established that can be used to analyze the operation, design and energy efficiency of water pumping systems. Also, a methodology was developed to estimate the minimum energy that a pumping system can consume if all the energy efficiency criteria are met, that is, when all the quantities that compose the energy calculation are determined from optimized criteria. This methodology was applied in two scenarios: projects of water pumping systems and diagnosis of existing water pumping systems. In the first approach, the indicator was useful to infer about energy consumption and, even, to define the optimum diameter of the most heavily weighted pipeline. In the second approach, the indicator has the potential to be used in the definition of the baseline of the system and may help decision making and hydropower management of these systems.

**Keywords:** Energy efficiency, Pump system, Indicators, Minimal energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1. Curva padrão da demanda de água característica dos sistemas de abastecimento de cidades brasileiras.....	28
Figura 3.2. Parâmetros hidráulicos em uma instalação elevatória. ....	29
Figura 3.3. Variação do custo total em função do diâmetro da adutora.....	34
Figura 3.4. Interseção da curva do sistema com a curva característica da bomba. ....	41
Figura 3.5. Matriz do balanço hídrico. ....	44
Figura 4.1. Sistema genérico utilizado no estudo de otimização. ....	58
Figura 4.2. Fluxograma geral de metodologia da tese.....	60
Figura 4.3. Exemplo de arquivo com as combinações de altura geométrica, comprimento e diâmetro inserido como arquivo de entrada no algoritmo SCE-UA. ....	63
Figura 4.4. Curva de consumo 1 – adimensional; FC = 0,63, obtida junto ao DMAE. ....	65
Figura 4.5. Curva de consumo 2 – adimensional, FC = 0,80, obtida por meio de medições realizadas em Ananindeua (Pará). ....	65
Figura 4.6. Curva de consumo 3 – adimensional; FC = 0,43, obtida por meio de medições realizadas no Campus do Vale, UFRGS.....	66
Figura 4.7. Frequência acumulada da população dos municípios brasileiros. ....	68
Figura 4.8. Rendimento expresso em função da velocidade de rotação específica.....	71
Figura 4.9. Curva de ajuste da variação do rendimento do motor com a potência.....	72
Figura 4.10. Custo da tubulação e da tubulação com assentamento. ....	75
Figura 4.11. Custo de implantação do reservatório. ....	77
Figura 4.12. Custo de implantação do conjunto motobomba.....	78
Figura 4.13. Função-objetivo em relação ao número de geração para determinar o critério de convergência do algoritmo SCE-UA.....	80
Figura 4.14. Fluxograma para cálculo da função-objetivo.....	81
Figura 4.15. Fluxograma detalhado de metodologia da tese. ....	86
Figura 5.1. Curva de consumo 1 (FC = 0,63) com consumo máximo de 50 m <sup>3</sup> /h e 81,5 m <sup>3</sup> /h (a), 100 m <sup>3</sup> /h e 163 m <sup>3</sup> /h (b), 250 m <sup>3</sup> /h e 407,5 m <sup>3</sup> /h (c) e de 500 m <sup>3</sup> /h e 815 m <sup>3</sup> /h (d), para os anos 0 e 20, respectivamente. ....	88
Figura 5.2. Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 1 (755 e 1.231 m <sup>3</sup> /d) inserida no algoritmo SCE-UA (Hg = 10 m; L = 100 m; D = 100 mm;). ....	89
Figura 5.3. Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 1 (1.511 e 2.463 m <sup>3</sup> /d) inserida no algoritmo SCE-UA (Hg = 10 m; L = 100 m; D = 100 mm;). ....	90

Figura 5.4. Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 1 (3.777 e 6.157 m <sup>3</sup> /d) inserida no algoritmo SCE-UA (Hg = 10 m; L = 100 m; D = 150 mm);	91
Figura 5.5. Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 1 (7.555 e 12.315 m <sup>3</sup> /d) inserida no algoritmo SCE-UA (Hg = 10 m; L = 100 m; D = 250 mm);	91
Figura 5.6. Avaliação do bombeamento no período de ponta em função do indicador Hm/Hg para curva 1.	94
Figura 5.7. Curva de consumo 2 (FC = 0,80) com consumo máximo de 39,2 m <sup>3</sup> /h e 63,9 m <sup>3</sup> /h (a), 78,5 m <sup>3</sup> /h e 127,9 m <sup>3</sup> /h (b), 196,1 m <sup>3</sup> /h e 319,6 m <sup>3</sup> /h (c) e 392,3 m <sup>3</sup> /h e 639,4 m <sup>3</sup> /h (d), para os anos 0 e 20, respectivamente.	95
Figura 5.8. Avaliação do bombeamento no período de ponta em função do indicador Hm/Hg para curva 2.	97
Figura 5.9. Curva de consumo 3 (FC = 0,43) com consumo máximo de 74 m <sup>3</sup> /h e 120,6 m <sup>3</sup> /h (a), 148 m <sup>3</sup> /h e 241,2 m <sup>3</sup> /h (b), 370 m <sup>3</sup> /h e 603,1 m <sup>3</sup> /h (c) e 740 m <sup>3</sup> /h e 1.206,2 m <sup>3</sup> /h (d), para os anos 0 e 20, respectivamente.	98
Figura 5.10. Avaliação do bombeamento no período de ponta em função do indicador Hm/Hg para curva 3.	100
Figura 5.11. Comparação entre os custos de implantação da estação elevatória obtidos com a Maquimotor (2016), com os propostos por Costa (2003) e com os valores desse autor, atualizado pelo IGP-M.	102
Figura 5.12. Comparação entre os custos de implantação de reservatórios obtidos com Gomes (2016), com os propostos por Costa (2003) e com os valores desse autor, atualizado pelo IGP-M.	103
Figura 5.13. Comparação entre os custos de implantação da linha adutora obtidos com DMAE (2016), com os propostos por Costa (2003) e com os valores desse autor, atualizado pelo IGP-M.	103
Figura 5.14. Composição do custo total pelos custos de operação e instalação para curva 1 (FC = 0,63), com consumo de 755m <sup>3</sup> /d e altura geométrica de 10 metros.	104
Figura 5.15. Composição do custo total pelos custos de operação e instalação para curva 1 (FC = 0,63), com consumo de 755m <sup>3</sup> /d e altura geométrica de 25 metros.	105
Figura 5.16. Composição do custo total pelos custos de operação e instalação para curva 1 (FC = 0,63), com consumo de 755m <sup>3</sup> /d e altura geométrica de 50 metros.	105
Figura 5.17. Composição do custo total pelos custos de operação e instalação para curva 1 (FC = 0,63), com consumo de 755m <sup>3</sup> /d e altura geométrica de 100 metros.	105



Figura 5.18. Representação da composição do custo total pelos custos de instalação e operação, em percentual, para curva 1, com volume de 755m <sup>3</sup> /d, altura geométrica de 100 m e comprimento de 5.000m. ....	106
Figura 5.19. Representação dos custos de operação, instalação e total, para curva 1, com volume de 755m <sup>3</sup> /d, altura geométrica de 100 m e comprimento de 5.000m. ....	107
Figura 5.20. Custo total para sistemas com adutora de 5.000 metros, em diferentes alturas geométricas e diâmetros, para curva 1, com volume de 755m <sup>3</sup> /d. ....	107
Figura 5.21. Variação do volume do reservatório (m <sup>3</sup> ) em função do volume consumido (m <sup>3</sup> /d) para as curvas 1, 2 e 3. ....	109
Figura 5.22. Razão entre o volume do reservatório (VR) e o volume consumido (VC) para as curvas 1, 2 e 3 em função do fator de consumo. ....	110
Figura 5.23. Consumo de energia médio (kWh/mês) para as curvas 1, 2 e 3, com volumes de 755 (início) e 1.231 (fim) m <sup>3</sup> /d (a) e 1.511 (início) e 2.463 (fim) m <sup>3</sup> /d (b), para situações com diâmetro ótimo. ....	112
Figura 5.24. Consumo de energia médio (kWh/mês) para as curvas 1, 2 e 3, com volumes de 3.777 (início) e 6.157 (fim) m <sup>3</sup> /d (a) e 7.555 (início) e 12.315 (fim) m <sup>3</sup> /d (b), para situações com diâmetro ótimo. ....	113
Figura 5.25. Variação entre o consumo de energia mensal para os cenários de início e fim de projeto nas diferentes alturas geométricas e comprimentos avaliados. ....	114
Figura 5.26. Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> ) para as situações de início de projeto. ....	115
Figura 5.27. Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> ) para as situações de final de projeto. ....	115
Figura 5.28. Consumo específico normalizado (kWh/m <sup>3</sup> /100m) para as situações de início de projeto. ....	116
Figura 5.29. Consumo específico normalizado (kWh/m <sup>3</sup> /100m) para as situações de final de projeto. ....	116
Figura 5.30. Vazão de início e fim de projeto junto a vazão nominal. ....	118
Figura 5.31. Rendimentos da bomba, estimados a partir da metodologia desenvolvida nesta pesquisa. ....	119
Figura 5.32. Rendimentos do motor, estimados a partir da metodologia desenvolvida nesta pesquisa. ....	120
Figura 5.33. Velocidade máxima e mínima em função do adimensional L/Hg. ....	121
Figura 5.34. Coeficiente K de Bresse calculado para os diâmetros ótimos adotados na pesquisa. ....	122

Figura 5.35. Velocidade máxima e mínima com seu respectivo coeficiente K, de Bresse, em função do adimensional L/Hg.....	123
Figura 5.36. Velocidade mínima e máxima e seus respectivos diâmetros para uma vazão de bombeamento de 250 m <sup>3</sup> /h. ....	124
Figura 5.37. Perda de carga como percentual da altura geométrica em função do adimensional L/Hg.....	126
Figura 5.38. Avaliação do bombeamento no período de ponta em função do indicador Hm/Hg para os casos otimizados das três curvas. ....	127
Figura 5.39. Operação do bombeamento no período de ponta em função do adimensional L/Hg. ....	128
Figura 6.1. Fluxograma para cálculo da energia mínima de um sistema de bombeamento qualquer. ....	131
Figura 6.2. Fluxograma de exemplo para cálculo da energia mínima para o sistema hipotético da Tabela 6.1.....	134
Figura 6.3. Fluxograma de exemplo do cálculo da energia mínima para a EBAT Bordini. ..	138
Figura 6.4. Resultado do consumo específico normalizado para as EBAT's analisadas.....	141
Figura 6.5. Resultado do indicador $E_{\text{real}}/E_{\text{min}}$ para as EBAT's analisadas. ....	141
Figura 6.6. Resultado do indicador $E_{\text{real}}-E_{\text{min}}$ para as EBAT's analisadas. ....	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Velocidade máxima na tubulação de sucção. ....	28
Tabela 3.2. Valor do coeficiente "C" sugerido para a fórmula de Hazen-Williams.....	31
Tabela 3.3. Coeficiente de perdas "k" para válvulas e acessórios. ....	32
Tabela 3.4. Ações corretivas em função da origem do desequilíbrio de tensão.....	40
Tabela 4.1. Variação de dimensionamento do sistema genérico utilizado na pesquisa. ....	61
Tabela 4.2. Diâmetros adotados para cada valor de consumo diário. ....	62
Tabela 4.3. Características das curvas de consumo utilizadas na pesquisa, vazão máxima e volume de consumo diário no ano 0.....	67
Tabela 4.4. Características das curvas de consumo utilizadas na pesquisa, vazão máxima e volume de consumo diário no ano 20.....	69
Tabela 4.5. Tarifas de consumo de energia, demanda na modalidade horo-sazonal verde e alíquota ICMS. ....	73
Tabela 4.6. Custos por metro de tubulação em ferro dúctil (classe K7 e junta JGS) e custo da tubulação com assentamento. ....	75
Tabela 4.7. Custo de implantação de reservatórios. ....	76
Tabela 4.8. Custo de implantação do conjunto motobomba.....	78
Tabela 5.1. Síntese dos resultados da curva 1. ....	93
Tabela 5.2. Síntese dos resultados da curva 2. ....	96
Tabela 5.3. Síntese dos resultados da curva 3. ....	99
Tabela 5.4. Diâmetros ótimos (menor custo total) para cada um dos volumes avaliados.....	108
Tabela 6.1. Sistema hipotético para análise da energia mínima em situações de projeto. ....	133
Tabela 6.2. Resultado dos indicadores calculados para o sistema hipotético da tabela 6.1. ...	135
Tabela 6.3. Identificação das Estações Elevatórias utilizadas no estudo de caso da pesquisa. ....	136
Tabela 6.4. Informações coletadas para as estações elevatórias utilizadas no estudo de caso da pesquisa. ....	137
Tabela 6.5. Resultado do indicador de energia mínima para as estações elevatórias utilizadas no estudo de caso da pesquisa. ....	139
Tabela 6.6. Resultados para os indicadores de energia mínima e classificação das EBAT's analisadas na pesquisa. ....	139

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEEE	Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
DN	Diâmetro Nominal
EBAB	Estação de Bombeamento de Água Bruta
EBAT	Estação de Bombeamento de Água Tratada
ETA	Estação de Tratamento de Água
GEPO	Gerência de Projetos e Obras
GWh	Gigawatthora
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IGP-M	Índice Geral de Preços do Mercado
MW	Megawatt
NBR	Norma Brasileira
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
PDA	Plano Diretor de Água
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PIS	Programa de Integração Social
PROCEMPA	Companhia de Processamento de Dados do Município de Porto Alegre
PVC	Cloreto de Polivinil
SCE-UA	<i>Shuffled Complex Evolution</i>
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
THS	Tarifa Horó Sazonal

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C$	Coeficiente de rugosidade da equação de Hazen-Williams
$C_{adutora}$	Custo de implantação da tubulação
$C_{bomba}$	Custo de implantação do conjunto motobomba
$CE$	Consumo específico
$CEN$	Consumo específico normalizado
$CFP$	Tarifa de consumo fora da ponta
$C_{ins}$	Custo de instalação
$C_{minimo}$	Custo mínimo
$CON_{med}$	Consumo médio
$Consumo_{FP}$	Energia consumida fora da ponta
$Consumo_{P}$	Energia consumida da ponta
$C_{op}$	Custo de operação
$CP$	Tarifa de consumo na ponta
$C_{pop}$	Consumo per capita
$C_{reservatório}$	Custo de implantação do reservatório
$C_{tot}$	Custo total
$D$	Diâmetro
$d$	Dia
$Dem$	Tarifa de demanda
$dH$	Perda de carga
$dH'$	Perda de carga linear
$dH''$	Perda de carga singular
$dH_r$	Perda de carga no recalque
$dH_s$	Perda de carga na sucção
$e$	Taxa de aumento anual de energia
$E$	Energia
$E_{min}$	Energia mínima
$E_{real}$	Energia real
$Fa$	Fator de atualização
$FC$	Fator de consumo
$FO$	Função-objetivo
$h$	Hora

Hg	Altura geométrica
Hg <sub>r</sub>	Altura geométrica de recalque
Hg <sub>s</sub>	Altura geométrica de sucção
Hm	Altura manométrica
Hz	Hertz
i	Taxa de juro
k	Coefficiente de perdas para válvulas e acessórios
K	Coefficiente da fórmula de Bresse
k <sub>1</sub>	Coefficiente do dia de maior consumo
k <sub>2</sub>	Coefficiente da hora de maior consumo
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatthora
L	Comprimento
m	Metro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mm	Milímetro
n	Período de amortização
N	Rotação
Ns	Velocidade de rotação específica
P	Pressão
penal	Penalidade
Pop	População
Pot	Potência
Pot <sub>ele</sub>	Potência elétrica
Pot <sub>hid</sub>	Potência hidráulica
Pot <sub>mot</sub>	Potência motriz
Q	Vazão
Q <sub>ponta</sub>	Vazão de bombeamento na ponta
Q <sub>max</sub> <sup>FP</sup>	Vazão máxima fora da ponta
Q <sub>med</sub> <sup>FP</sup>	Vazão média fora da ponta
Q <sub>med</sub> <sup>P</sup>	Vazão média da ponta
Q <sub>nominal</sub>	Vazão nominal
R\$	Reais

$t$	Tempo
TWh	Terawatthora
$v$	Velocidade
V	Volume
VC	Volume de consumo
$v_{\max}$	Velocidade máxima
$v_{\min}$	Velocidade mínima
VR $_{\max}$	Volume máximo do reservatório
X	Número de horas de trabalho da instalação por dia
$\gamma$	Peso específico da água
$\Delta t$	Tempo
$\eta_{\text{bomba}}$	Rendimento da bomba
$\eta_{\text{motor}}$	Rendimento do motor

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL .....	21
2.2	OBJETIVOS SECUNDÁRIOS .....	21
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
3.1	SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA .....	22
3.2	ASPECTOS HIDRÁULICOS BÁSICOS DOS SISTEMAS DE BOMBEAMENTO .....	26
3.3	DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO.....	33
3.4	CONSUMO DE ENERGIA NO SANEAMENTO E MEDIDAS DE ECONOMIA .....	36
3.4.1	Medidas relacionadas com a tarifa .....	37
3.4.2	Medidas para redução de perdas nas instalações elétricas.....	39
3.4.3	Medidas para aumentar a eficiência dos motores .....	39
3.4.4	Medidas para aumentar a eficiência das bombas .....	40
3.4.5	Medidas para reduzir as perdas de carga.....	42
3.4.6	Medidas para reduzir os vazamentos .....	43
3.4.7	Medidas para melhorar a operação dos sistemas de bombeamento .....	45
3.4.8	Medidas para melhorar a manutenção dos equipamentos .....	47
3.5	INDICADORES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA.....	48
3.6	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO.....	50
3.6.1	Algoritmos de evolução de complexos misturados .....	52
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>58</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	58
4.2	DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO SISTEMA .....	61
4.3	CURVAS DE CONSUMO .....	63
4.4	CRESCIMENTO DO CONSUMO E ENVELHECIMENTO DA TUBULAÇÃO .....	68
4.5	RENDIMENTO DOS CONJUNTOS MOTOBOMBA .....	69



4.5.1	Metodologia para estimar o rendimento da bomba.....	70
4.5.2	Metodologia para correção do rendimento para as demais vazões.....	71
4.5.3	Metodologia para estimar o rendimento do motor .....	72
4.6	CUSTO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA .....	73
4.7	CUSTO DE INSTALAÇÃO DO SISTEMA .....	74
4.7.1	Custo de implantação das linhas adutoras .....	74
4.7.2	Custo de implantação de reservatórios .....	76
4.7.3	Custo de implantação da estação elevatória.....	77
4.8	DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA REGRA DE OPERAÇÃO.....	79
4.9	CÁLCULO DOS INDICADORES .....	84
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>87</b>
5.1	OPERAÇÃO DE BOMBEAMENTO OTIMIZADA .....	87
5.1.1	Resultados para a curva de consumo 1 .....	88
5.1.2	Resultados para a curva de consumo 2 .....	94
5.1.3	Resultados para a curva de consumo 3 .....	97
5.1.4	Considerações sobre a operação de bombeamento otimizada para as três curvas .....	100
5.2	CUSTO DE OPERAÇÃO E CUSTO DE INSTALAÇÃO .....	102
5.3	CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO SUPERIOR.....	108
5.4	INDICADORES.....	111
5.4.1	Consumo de energia.....	111
5.4.2	Consumo específico e consumo específico normalizado .....	114
5.4.3	Vazão nominal.....	117
5.4.4	Rendimento do conjunto motobomba .....	118
5.4.5	Velocidade máxima e mínima .....	120
5.4.6	Perda de carga.....	124
5.4.7	Operação do bombeamento no período de ponta .....	126
<b>6</b>	<b>ENERGIA MÍNIMA .....</b>	<b>129</b>
6.1.1	Energia mínima em situação de projeto .....	132
6.1.2	Energia mínima aplicada a sistemas reais como forma de estudo de caso .....	135
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>143</b>

<b>8 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>148</b>
APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS PARA A CURVA 2 .....	157
APÊNDICE B - RESULTADOS OBTIDOS PARA A CURVA 3 .....	159

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Existe uma importante relação entre o consumo de água e o consumo de energia utilizada para disponibilizar água tratada à população. Estima-se que entre 2% e 3% da energia do mundo são gastos nas operações dos sistemas de abastecimento de água (ALLIANCE, 2002), dentro dos quais, o maior consumo de energia se dá nos sistemas de bombeamento. No Brasil, em 2015, as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento atingiram R\$ 5,14 bilhões, tendo sido consumidos 11,0 TWh com abastecimento de água (BRASIL, 2017).

Dentro do contexto da utilização dos recursos hídricos e energéticos nas diversas atividades humanas mostra-se cada vez maior a preocupação com o consumo consciente e a conservação, em função do crescimento acelerado da população mundial e também da preocupação com a manutenção dos recursos para as futuras gerações.

Estima-se que o consumo de energia na maioria dos sistemas poderia ser reduzido por meio de ações de eficiência relacionadas aos aspectos construtivos e operacionais dos sistemas (GOMES, 2009). Além disso, o gasto com energia elétrica poderia ser reduzido por meio da adoção de medidas administrativas e/ou operacionais como, por exemplo, adequação da classe tarifária e melhorias na operação dos sistemas de bombeamento.

As técnicas de otimização surgem com expressivo papel nesse sentido, pois podem atuar melhorando o desempenho de diversos processos, diminuindo custos, maximizando a produção, entre outros. O algoritmo *Shuffled Complex Evolution* – SCE-UA, proposto por Duan et al. (1992), trata-se de uma estratégia de otimização global baseada em Algoritmos Genéticos e foi utilizado na presente pesquisa para a minimização dos custos de operação e instalação de um sistema de bombeamento de água e obtenção da regra de operação otimizada de sistemas de bombeamento.

Algumas vantagens do algoritmo são: convergência rápida ao ótimo global, mesmo quando a região de busca apresenta vários ótimos locais, e capacidade para modelar problemas com um grande número de variáveis de decisão (NUNOO e MRAWIRA, 2004).

A partir da regra de operação otimizada, obtida com o algoritmo SCE-UA, foram calculados e analisados índices e indicadores para avaliar quais parâmetros geométricos e hidráulicos são relevantes para a análise da eficiência energética de sistemas de bombeamento. Para Alegre et al. (2004), a utilização de um indicador de desempenho simplifica a avaliação da eficiência que, de outra forma, seria mais complexa e subjetiva. Ou seja, para melhor

aplicação das medidas de planejamento, gestão e operação dos recursos hídricos e energéticos nos sistemas de bombeamento de água é importante que se conheça a infraestrutura existente, os procedimentos operacionais, os cadastros comerciais e também que haja monitoramento dos parâmetros elétricos, hidráulicos e mecânicos envolvidos.

Indicadores são ferramentas de representação de sistemas complexos e possuem três funções básicas: avaliar e controlar o desempenho dos recursos disponíveis, demonstrar o desempenho da organização interna e externamente e apontar falhas entre o desempenho e as metas estabelecidas (FRANCESCHINI et al. 2007). Alguns indicadores propostos na literatura da área são o consumo específico e o consumo específico normalizado.

A partir da análise dos indicadores foram estabelecidas equações que podem ser utilizadas como critério de análise da eficiência energética de sistemas de bombeamento. Toda a metodologia desenvolvida tem potencial para ser utilizada tanto em projetos como para avaliação hidroenergética de sistemas de bombeamento existentes. Nessa perspectiva, foi proposto o indicador de energia mínima, que permite inferir sobre o consumo de energia e a eficiência energética de sistemas de bombeamento.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O custo de operação de um sistema de bombeamento de água foi minimizado em um processo de otimização utilizando-se um algoritmo evolucionário chamado *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) e a variável de decisão foi a curva de operação de um sistema dotado de conversor de frequência. Foram avaliados os custos de operação para diferentes possibilidades geométricas do sistema e, por conseguinte, também os custos de instalação.

A realização da pesquisa envolveu as seguintes etapas: pesquisa bibliográfica que proporcionou coleta de material necessário para o embasamento teórico dos temas relacionados à pesquisa; definição das características geométricas para dimensionamento do sistema de bombeamento de água que foram variadas com objetivo de representar diferentes tipologias de sistemas que existem e, também, verificar quais delas são mais significativas na composição dos custos de operação e instalação dos sistemas de bombeamento de água; definição do algoritmo evolucionário utilizado no processo de otimização, em que foi necessário o desenvolvimento da sequência de cálculos que compões a função-objetivo e posterior acoplamento ao algoritmo *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA); análise e discussão dos resultados e aplicação desses em estudos de caso em sistemas de bombeamento de água reais. Todas essas etapas são apresentadas nos capítulos deste texto.

No capítulo 2 são apresentados os objetivos, principal e específico, que nortearam o desenvolvimento da pesquisa.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre sistema de abastecimento de água, sistemas de bombeamento, consumo de energia no saneamento e medidas de economia, indicadores de eficiência hidroenergética, técnicas de otimização, com ênfase aos algoritmos evolucionários e pesquisas realizadas em âmbito nacional e internacional utilizando o algoritmo SCE-UA.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada nesta pesquisa, com detalhes sobre o programa desenvolvido, as considerações adotadas, a análise econômica para determinação dos custos envolvidos na operação e instalação do sistema de bombeamento, e como os resultados foram avaliados.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com o algoritmo evolucionário e o desenvolvimento dos valores otimizados, limites mínimos e máximos, entre outros, para índices e indicadores que possam ser utilizados para auxiliar no dimensionamento e avaliação da eficiência energética de projetos de sistemas de bombeamento de água.

No capítulo 6 é apresentada a metodologia proposta para estimativa da energia mínima em sistemas de bombeamento bem como os resultados desse indicador para situações de projeto e em estudos de caso realizados como forma de elucidar sobre a metodologia e corroborar sua aplicação em casos reais.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações da pesquisa e no capítulo 8 as referências bibliográficas consultadas.

## 2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e serão apresentados na sequência.

### 2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Desenvolver uma metodologia para análise geral da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água com velocidade de rotação variável, na fase de projeto, ou para diagnóstico de operação, por meio do uso de índices e indicadores e de um algoritmo evolucionário.

### 2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

- Propor regras para a otimização da operação de sistemas de bombeamento de água com o algoritmo SCE-UA com vistas a diminuição dos custos dispendidos com energia elétrica na operação;
- avaliar o custo de operação e instalação de diferentes características hidráulicas e geométricas de sistemas de bombeamento de água;
- verificar quais características geométricas são mais significativas na composição dos custos de instalação e operação de sistemas de bombeamento de água;
- verificar quais as condições hidráulicas de operação que fornecem uma melhor eficiência energética;
- definir valores de referência para índices e indicadores que possam ser utilizados para auxiliar no dimensionamento e análise de projetos de sistemas de bombeamento de água que tenham a eficiência hidroenergética como princípio;
- estabelecer um indicador que permita avaliar e realizar diagnóstico sobre a eficiência hidroenergética de sistemas de bombeamento já existentes (energia mínima);
- aplicar a metodologia, os índices e os indicadores em sistema de bombeamento de água reais como forma de estudo de caso e validação.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item é apresentada a revisão bibliográfica sobre os assuntos de maior relevância à pesquisa. Inicialmente são abordados os conceitos básicos para concepção e operação de sistemas de bombeamento como partes integrantes de sistemas de abastecimento de água, com destaque ao consumo de energia elétrica relativo à operação dos serviços de saneamento e também às ações de eficiência hidroenergética propostas atualmente, para diminuição deste consumo. São abordados, também, índices e indicadores sugeridos como ferramentas para mensurar a eficiência hidroenergética e, ainda, como variável capaz de descrever o estado de um sistema ao longo do tempo.

Em seguida, são apresentados alguns métodos de otimização que podem ser empregados para aperfeiçoar a operação e o dimensionamento dos sistemas de bombeamento, com destaque aos algoritmos evolucionários, que foram utilizados nesta pesquisa. Conjuntamente, são apresentados trabalhos em que os autores utilizaram alguma abordagem de otimização para incrementar a eficiência hidroenergética de sistemas de abastecimento de água e bombeamento.

#### 3.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao abastecimento de água potável de uma comunidade recebe o nome de sistema de abastecimento de água. A ABNT NBR 12211:1992 fixa condições exigíveis para estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. As características desses sistemas dependem das condições topográficas encontradas, da população a ser atendida e de outras condições locais, no entanto, em geral são constituídos das seguintes partes:

**Manancial:** fonte de onde se retira a água para atender a demanda. É importante que o manancial forneça água em condições sanitárias adequadas e vazão suficiente para atender à demanda máxima prevista para o alcance do plano (ABNT, 1992b). Em alguns sistemas, há necessidade de se buscar mais de um manancial para atender a demanda total. Nestes casos, pode-se realizar a captação adotando um ou outro manancial como prioritário, levando-se em consideração não apenas aspectos de qualidade e quantidade, mas também, o aspecto econômico de operação e manutenção dos equipamentos para captação de água do manancial escolhido. Os mananciais podem ser do tipo subterrâneo freático ou confinado, superficial com ou sem acumulação e águas pluviais (HELLER, 2006).

**Captação:** conjunto de estruturas e dispositivos construídos ou montados junto a um manancial, para a retirada de água destinada a um sistema de abastecimento. A ABNT NBR 12213:1992 fixa as condições exigíveis para a elaboração de projetos de captação de água de

superfície para abastecimento público. As obras de captação dependem das condições locais, hidrológicas, topográficas ou hidrogeológicas (para as águas subterrâneas). Trata-se da primeira unidade do sistema de abastecimento de água. É importante que sua concepção evite ao máximo as interrupções em seu funcionamento, de modo a não comprometer às demais unidades subsequentes e, adicionalmente, garantir água em quantidade suficiente para atender todo o consumo (ABNT, 1992a).

Estação elevatória: é o conjunto de tubulações, acessórios, bombas e motores, necessário para transportar a água de um ponto com cota topográfica inferior até um ponto com cota topográfica superior. São destinadas a vencer desníveis topográficos ou fornecer carga piezométrica ao sistema. Dentro dos sistemas de abastecimento de água os conjuntos elevatórios são responsáveis pelo consumo de 90% da energia total consumida pelo sistema (GOMES, 2012) e devem ser alvo prioritário das ações de eficiência energética dos sistemas. Nesse sentido, o escopo desta pesquisa contempla com maior ênfase as questões de dimensionamento, construção e operação dos sistemas de bombeamento inseridos nos sistemas de abastecimento de água. A estação elevatória de transferência de água para o reservatório elevado deve observar a ABNT NBR 12214:1992 que fixa as condições exigíveis para a elaboração de projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público. Os conceitos necessários para compreensão do funcionamento dos grupos motor e bomba, utilizados nos sistemas de bombeamento, são expostos com maior detalhe em item específico.

Adução: o transporte de água entre duas unidades distintas do sistema é realizado por um conjunto de encanamentos e peças especiais. O projeto de adutoras de água para abastecimento público deve seguir as recomendações da ABNT NBR 12215:1991. As adutoras podem ligar, por exemplo, a captação ao reservatório de distribuição, a captação à ETA, a captação à rede de distribuição, a ETA ao reservatório de distribuição ou, um reservatório ao outro, dentro da rede de distribuição.

São classificadas de acordo com a energia utilizada para a realização do transporte em adutora por gravidade ou recalque, de acordo com o modo de escoamento do líquido em: escoamento a superfície livre ou escoamento forçado, e de acordo com a natureza da água que transportam em adutora de água bruta ou tratada (Coelho e Baptista, 2006).

Os materiais empregados nas canalizações de adução são agrupados em três categorias principais, tubulações, conexões e peças especiais.

As tubulações (canalizações construídas com tubos) são classificadas segundo o material de fabricação dos tubos, do tipo de junta e da pressão de serviço. Os tubos podem ser de: Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Cloreto de Polivinil (PVC), Ferro Fundido Dúctil



(F<sup>o</sup>F<sup>o</sup>), Aço Soldado ou Rebitado, Concreto Simples ou Armado, Fibra de Vidro, Fibro-Cimento (em desuso). Rodrigues (2014) realizou uma pesquisa junto ao Departamento de Água e Esgoto (DMAE) do município de Porto Alegre e apresentou os materiais encontrados em 393,54 km de adutoras da cidade. Aproximadamente metade dessas adutoras (50,8%) é de ferro fundido cinzento. A outra metade tem 28,7% construída em ferro dúctil, 13,3% em PEAD (polietileno de alta densidade), 4,3% em fibrocimento, além de pequenos percentuais em PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro) (1,2%), aço (0,9%), concreto (0,6%) e PVC - PBA (0,1%).

A escolha do material dos tubos depende primariamente das pressões de serviço (pressão interna quando em funcionamento hidráulico) a que as tubulações vão ser submetidas. Alguns critérios importantes na escolha do material são: facilidade de montagem (transporte, armazenagem, peso, corte, número de juntas e rapidez na sua execução, etc), resistência aos esforços externos (reaterros, cargas, pancadas acidentais, etc), funcionamento hidráulico, manutenção e durabilidade além dos custos de aquisição e montagem.

As conexões são destinadas a ligarem tubos ou seguimentos de tubos entre si, permitindo mudanças de direção, derivações e alterações de diâmetros. São fabricadas nas classes de juntas compatíveis com a tubulação. As mais comuns são: curvas (mudanças de direção), tês (derivação simples), cruzetas derivação dupla, reduções (mudanças de diâmetro), luvas (ligação entre duas pontas), caps (fechamento de extremidades), junções (derivações inclinadas), etc.

As peças especiais são aquelas com finalidades específicas, tais como controle de vazões, esgotamento de canalizações, retirada de ar ou preenchimento de trechos de tubulação, entre outras. As mais comuns são: registros ou válvulas de manobra para controle do fluxo, válvulas de retenção para impedir retorno do fluxo, ventosas para aliviar o ar das canalizações, crivos para impedir à entrada de material grosseiro nos condutos, válvulas de pé para manter o escorvamento dos conjuntos elevatórios, comportas e adufas para controle das entradas e saídas de vazão e hidrante para fornecimento de água para combate a incêndios.

O dimensionamento do diâmetro de uma adutora, escolha do traçado e do material dos tubos, necessidade de conexões e peças especiais influencia diretamente nos custos de implantação e operação do sistema de abastecimento. Quando a adutora está ligada a um sistema de bombeamento, essas escolhas influenciam, também, no consumo de energia despendido por este sistema, já que podem estar acarretando perdas de carga demasiadas, exigindo maior trabalho dos grupos de motores e bombas. Em contrapartida, adutoras superdimensionadas, que têm menores valores de perdas de carga durante a operação, custam muito mais para serem construídas, sendo necessário, sempre, um estudo para o correto

dimensionamento, considerando a composição do custo total entre os custos de implantação e operação. Destaca-se que estas questões também são parcela fundamental do escopo desta pesquisa.

Estação de tratamento de água: conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade, ou seja, destinadas à eliminação de impurezas e/ou correção de propriedades inadequadas ao uso da água, transformando em água de boa qualidade do ponto de vista físico, químico, biológico e bacteriológico. O projeto de estações de tratamento de água para abastecimento público deve observar o que está exposto na ABNT NBR 12216:1992. Existem diversas tecnologias que podem ser empregadas nas estações de tratamento de água e a escolha entre uma ou outra depende, principalmente, das características da água bruta disponível no manancial onde é feita a captação, no entanto, independente das tecnologias adotadas, a água para consumo humano deve atender aos padrões estabelecidos pela portaria nº2.914, de 12 de dezembro de 2011, do ministério da saúde (BRASIL, 2011).

Reservatório: unidade destinada ao armazenamento de água para absorver as variações do consumo, manter a pressão adequada na rede de distribuição, promover a continuidade do abastecimento no caso de paralisação da produção de água e garantir uma reserva estratégica para consumos emergenciais, como incêndios. O projeto de reservatórios de distribuição de água para abastecimento público deve seguir a norma ABNT NBR 12217:1994. Podem ser classificados em (Coelho e Libânio, 2006):

- a) enterrados, semi-enterrados, apoiados ou elevados;
- b) de montante ou de jusante;

Os reservatórios elevados, devido ao seu custo, em geral são associados a reservatórios apoiados ou enterrados que armazenam a maior parte do volume necessário (TSUTIYA, 2006a). O volume necessário para atender as variações de consumo deve ser avaliado a partir de dados de consumo diário e do regime previsto de alimentação do reservatório. Onde inexistam dados de consumo confiáveis para o dimensionamento deve-se proceder um estudo em caráter técnico e econômico para justificar o volume adotado (ABNT, 1994a). O consumo de energia elétrica é função do planejamento da operação, devendo ser evitada a operação total ou parcial do sistema em horários de pico de energia.

Quanto maior a capacidade de reserva de um sistema, maior também a flexibilidade operacional permitida, já que a água armazenada pode suprir, por exemplo, o consumo durante o período em que a tarifa de energia é mais cara, evitando bombeamentos. Grandes

reservatórios, no entanto, estão associados a elevados custos de instalação, e pode ser difícil encontrar área disponível para sua construção nos grandes centros urbanos.

Rede de distribuição: parte do sistema de abastecimento formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas. Seu projeto deve seguir o que está disposto em ABNT NBR 12218:1994. A rede de distribuição é a estrutura mais integrada à realidade urbana, e a mais dispendiosa em relação aos custos de implantação (PRINCE, 2006).

Como já exposto anteriormente, as características construtivas e operacionais das várias unidades inseridas nos sistemas de abastecimento de água dependem fortemente da localidade a que o sistema se destina a abastecer. Heller (2006) destaca que, em localidades de maior porte, os sistemas são mais complexos e exigem sofisticação tecnológica e operacional. A complexidade desses sistemas pode se caracterizar por:

- necessidade de mais de um manancial;
- implantação de barragem de acumulação para regularização da vazão ao longo do tempo;
- mananciais com qualidade da água comprometida;
- aduções com comprimentos elevados e, por vezes, elevados desníveis geométricos;
- distribuição com diversas zonas de pressão.

Em relação a sistemas de abastecimento de água por bombeamento em que já há uma determinada potência instalada das estações elevatórias, diâmetro, traçado e material das adutoras definidos e também já está definida a capacidade do reservatório, a otimização da operação do sistema pode levar a redução do consumo de energia, sendo necessário, todavia, um estudo aprofundado de todas as variáveis envolvidas e um centro de controle operacional confiável para alimentar o modelo otimizador. A definição de regras de operação otimizadas para os sistemas de abastecimento de água trata-se de um dos objetivos secundários desta pesquisa.

### 3.2 ASPECTOS HIDRÁULICOS BÁSICOS DOS SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Bombas são máquinas que convertem a energia mecânica, produzida por um motor, em energia hidráulica, na forma de pressão, energia cinética e potencial. O modo pelo qual fazem a conversão do trabalho em energia hidráulica e o como cedem a energia ao líquido, aumentando sua pressão e/ou sua velocidade, permitem classificá-las em bombas volumétricas

ou de deslocamento positivo, bombas dinâmicas ou turbobombas e bombas especiais (MACINTYRE, 1987).

As bombas dinâmicas são caracterizadas por possuírem um órgão rotatório dotado de pás, chamado de rotor, movido por alguma fonte de potência através de seu eixo. Dentre os inúmeros tipos de bombas disponíveis no mercado, indicadas às diferentes aplicações e necessidades, as bombas dinâmicas ou turbobombas, e dentro destas, as bombas centrífugas, são as mais utilizadas nos serviços de abastecimento de água. Adicionalmente, destaca-se que os motores mais utilizados são os motores elétricos (GOMES, 2012).

Os parâmetros hidráulicos mais importantes para o dimensionamento dos conjuntos motobomba são: vazão, altura manométrica, potência e rendimento.

As vazões que serão recalçadas são determinadas em função das condições de operação das unidades a montante e a jusante da estação elevatória, por exemplo, se uma estação elevatória se destina a recalcar a água do manancial à estação de tratamento de água, a vazão de projeto não deve superar a capacidade desta, e assim sucessivamente.

Além disso, a vazão de projeto deve ser capaz de atender o consumo da população a que o sistema de bombeamento se destina. Para determinação da demanda de água devem ser considerados o consumo das ligações medidas e não medidas e o volume de perdas no sistema. Caso esses dados sejam inexistentes, as demandas devem ser definidas com base em dados de outras comunidades com características análogas à comunidade em estudo (ABNT, 1992c).

A quantidade de água consumida em um sistema público de abastecimento de água varia continuamente ao longo do dia e ao longo do ano e é influenciada pelos hábitos da população, pelas condições climáticas, entre outro. Durante o dia a vazão consumida também varia continuamente. Nas horas diurnas, em geral, a vazão supera o valor médio, atingindo valores máximo próximos ao meio dia e durante a noite o consumo cai significativamente, atingindo valores mínimos durante a madrugada. Gomes (2009) apresenta uma curva padrão de demanda de água, ao longo de um dia, característica dos sistemas de abastecimento de água brasileiros. Esta curva mostra-se reproduzida na Figura 3.1.

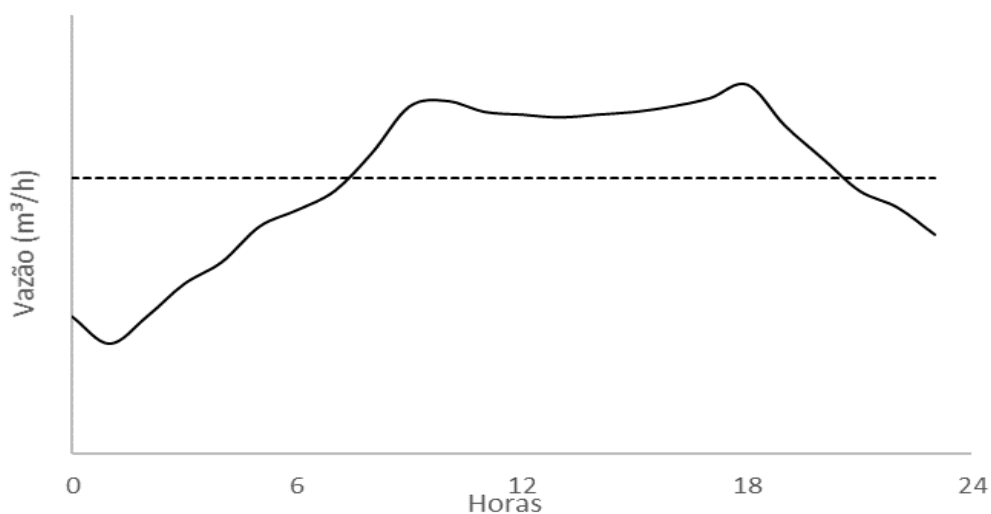


Figura 3.1. Curva padrão da demanda de água característica dos sistemas de abastecimento de cidades brasileiras. (Fonte: GOMES, 2009).

De acordo com a ABNT (1992c) o dimensionamento das tubulações de sucção e recalque deve observar alguns critérios, dentre eles, o critério de velocidade máxima na tubulação de sucção, apresentado em função do diâmetro da tubulação conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Velocidade máxima na tubulação de sucção.

Diâmetro Nominal (DN)	Velocidade (m/s)
50	0,70
75	0,80
100	0,90
150	1,00
200	1,10
250	1,20
300	1,40
400	1,50

(Fonte: ABNT, 1992b).

A altura estática ou geométrica de elevação representa a diferença entre os dois níveis que o fluido precisa vencer, ou seja, a diferença de energia potencial que separa a superfície livre do reservatório inferior e a descarga do recalque. A energia cedida pela bomba ao líquido na forma de energia por unidade de peso de fluido bombeado denomina-se altura manométrica. Ao aplicar a equação da conservação da energia (Bernoulli) entre duas seções de um escoamento que contém uma bomba, conforme as informações contidas na Figura 3.2, se demonstram as equações (1) e (2).

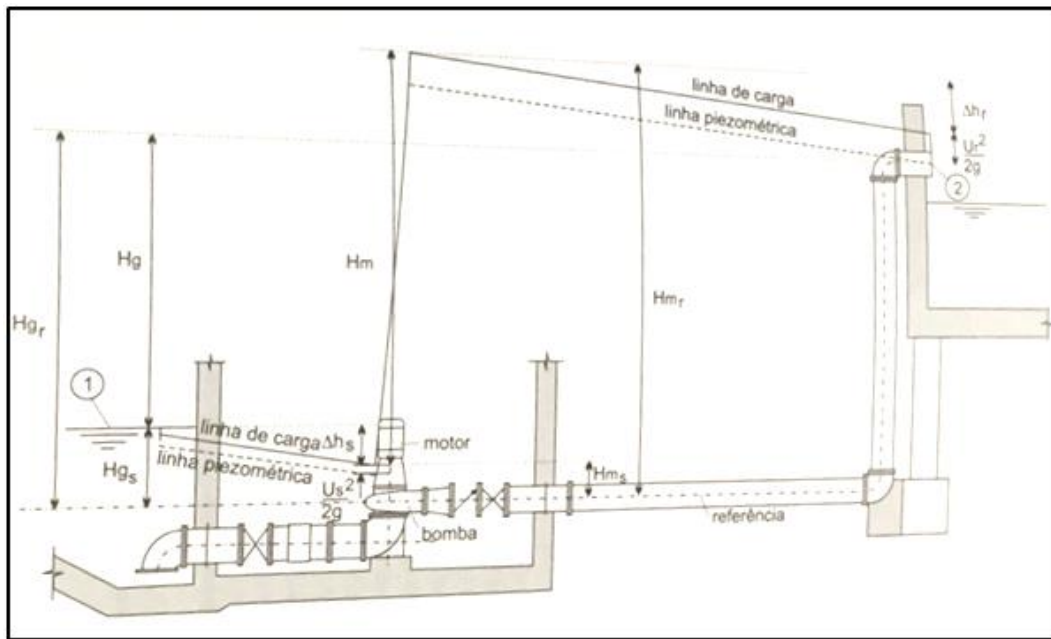


Figura 3.2. Parâmetros hidráulicos em uma instalação elevatória.

(Fonte: Coelho, 2006).

$$Hg_s + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Hm = Hg_r + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + dH_s + dH_r \quad (1)$$

$$Hm = Hg + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + dH_{1-2} \quad (2)$$

Onde:

$Hg_s$ : altura geométrica de sucção, em m;

$Hg_r$ : altura geométrica de recalque, em m;

$dH_s$ : perda de carga de sucção, em m;

$dH_r$ : perda de carga de recalque, em m;

$Hm$ : altura manométrica fornecida pela bomba, em m;

$Hg$ : altura geométrica total;

$P$ : pressão no centro da seção considerada, em  $\text{kgf/m}^2$ ;

$\gamma$ : peso específico da água, em  $\text{kgf/m}^3$ ;

$v$ : velocidade média do escoamento na seção, em m/s;

$dH_{1-2}$ : perda de carga total entre as seções 1 e 2, em m.

Se os pontos 1 e 2 estiverem sujeitos à pressão atmosférica e se a diferença de energia cinética for desprezível, tem-se a equação (3)

$$Hm = Hg_r + dH_{1-2} \quad (3)$$

Entretanto, se a entrada do reservatório se fizer pelo fundo deste, a carga de pressão ( $P_2/\gamma$ ) será igual à lâmina de água no reservatório. No caso da elevatória da Figura 3.2 os pontos 1 e 2 estão sujeitos à pressão atmosférica, mas somente a velocidade do escoamento no ponto 1 pode ser considerada nula, por pertencer à superfície de água do poço de sucção. Dessa forma, obtém-se a equação (4).

$$H_m = H_g + \frac{v_2^2}{2g} + dH_{1-2} \quad (4)$$

As perdas de carga em uma tubulação podem ser divididas em duas parcelas: perdas lineares, que resultam do atrito interno do fluido e deste com as paredes dos tubos e as perdas singulares, que ocorrem nos acessórios e peças especiais utilizados ao longo do trecho considerado.

As perdas lineares podem ser calculadas por diversas fórmulas, sendo a fórmula universal, ou de Darcy-Weissbach, a mais indicada. Não obstante, no cálculo de adutoras e redes, a formulação empírica de Hazen-Williams, desenvolvida em 1920, proposta para instalações de água fria com diâmetros superiores a 50 mm, é a mais utilizada, em função de sua simplicidade (GOMES e CARVALHO, 2012). Nesta formulação, apresentada na equação (5), a perda de carga linear é função da velocidade ou vazão do escoamento, do diâmetro, do comprimento e de um coeficiente fixo caracterizado para cada material e para as condições do conduto.

$$dH' = 10,667 \times \frac{L \times Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}} \quad (5)$$

Onde:

$dH'$ : perda de carga linear, em m;

L: comprimento, em m;

Q: vazão, em m<sup>3</sup>/s;

D: diâmetro, em m;

C: coeficiente de rugosidade característico do conduto.

O coeficiente de rugosidade C, também chamado de coeficiente de Hazen-Williams, é encontrado em tabelas disponíveis em diversos manuais de hidráulica e apresenta valores diferentes em função do material da tubulação. A Tabela 3.2 apresenta os valores do coeficiente “C” sugerido por Azevedo Netto et al. (1998).

Tabela 3.2. Valor do coeficiente "C" sugerido para a fórmula de Hazen-Williams.

Tubos	Novos	Usados 10 anos	± Usados 20 anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	-	-
Aço galvanizado roscado	125	100	-
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	130	135	130
Concreto, bom acabamento	130	-	-
Concreto, acabamento comum	140	130	110
Ferro fundido, revestimento interno epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento argamassa	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Plástico (PVC)	140	135	130

(Fonte: Azevedo Netto et al., 1998).

As perdas singulares podem ser calculadas pela equação (6), conforme ABNT (1992c).

$$dH'' = \sum k \times \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

Onde:

$dH''$ : perda de carga singular

$k$ : fator adimensional que representa o coeficiente de perda de carga do acessório;

$v$ : velocidade média do escoamento na seção, em m/s.

Assim como o coeficiente da equação de Hazem-Williams, o coeficiente de perda de carga para válvulas e acessórios é encontrado em tabelas em diversos manuais de hidráulica. A Tabela 3.3 apresenta o coeficiente de perda de carga ( $k$ ) para algumas peças e acessórios.



Tabela 3.3. Coeficiente de perdas "k" para válvulas e acessórios.

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

(Fonte: Gomes e Carvalho, 2012).

Outra fonte que pode ser consultada para verificação do valor do coeficiente de perda de carga (k) de peças e acessórios é o anexo B da norma ABNT NBR 12214:1992.

Geralmente, em sistemas de abastecimento de água, as perdas lineares são muito mais expressivas que as perdas localizadas, em virtude dos elevados comprimentos das linhas adutoras. Para o dimensionamento dos sistemas de bombeamento inseridos neste contexto, pode-se desprezar a parcela das perdas localizadas e considerar somente a perda de carga linear para a composição da altura manométrica. Streeter e Wylie (1982) e Porto (2006) esclarecem que, como regra básica, as perdas de carga singulares podem ser desprezadas quando, em média, existe um comprimento de 1000 diâmetros entre duas singularidades. A energia total entregue ao fluido pela bomba é a altura manométrica, expressa pela quantidade de energia recebida por cada unidade de peso do fluido bombeado. A potência hidráulica é obtida multiplicando essa parcela pela vazão gravimétrica, conforme equação (7).

$$Pot_{hid} = \gamma \times Q \times Hm \quad (7)$$

Onde:

$Pot_{hid}$ : potência hidráulica útil, em watts;

$\gamma$ : peso específico do líquido, em N/m<sup>3</sup>;

Q: vazão bombeada, em m<sup>3</sup>/s;

Hm: altura manométrica, em m.

Para que o líquido receba a potência requerida ( $Pot_{hid}$ ) a bomba deve receber uma potência superior a esta, pois há perdas em seu interior. Esta potência, fornecida pelo motor, recebe o nome de potência motriz ou mecânica ( $Pot_{mot}$ ). A relação entre estas potências expressa o rendimento da bomba ( $\eta_{bomba}$ ). O motor, por sua vez, recebe da fonte de energia uma potência

maior, chamada potência elétrica ( $Pot_{ele}$ ) do que àquela que fornece a bomba. A relação entre estas potências representa o rendimento do motor ( $\eta_{motor}$ ). As equações (8) e (9) descrevem a relação de potências para cálculo dos rendimentos do motor e da bomba.

$$n_{bomba} = \frac{Pot_{hid}}{Pot_{mot}} \quad (8)$$

$$n_{motor} = \frac{Pot_{mot}}{Pot_{ele}} \quad (9)$$

Onde:

$\eta_{bomba}$ : rendimento da bomba;

$Pot_{hid}$ : potência hidráulica;

$Pot_{mot}$ : potência motriz;

$\eta_{motor}$ : rendimento do motor;

$Pot_{ele}$ : potência elétrica.

Os rendimentos de bombas de grande porte podem atingir mais de 85%, enquanto pequenas unidades podem chegar a menos de 40% (Gomes, 2012). Kuritza et al. (2017) apresentaram uma metodologia para verificar o rendimento de bombas em função da rotação específica. Os autores encontraram rendimentos variando de 30 a 85%, ratificando o que já tinha sido encontrado na literatura da área.

A energia que será consumida por um sistema de bombeamento depende da potência que precisa ser fornecida e do número de horas de funcionamento do sistema. Dessa forma, a equação (10) mostra como obter a energia consumida por um sistema a partir da potência instalada.

$$E = Pot_{ele} \times \Delta t \quad (10)$$

Onde:

E: energia consumida, em kWh;

$Pot_{ele}$ : potência elétrica, em kW;

$\Delta t$ : tempo de funcionamento, em horas.

### 3.3 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

O projeto de um sistema de bombeamento compreende o dimensionamento das tubulações de recalque e de sucção e, por conseguinte, o cálculo da potência do conjunto motobomba. Sob o ponto de vista técnico e econômico, deve-se dar ênfase ao dimensionamento hidráulico das tubulações de recalque pois apresentam maior magnitude na composição dos

custos se comparadas às tubulações de sucção (GOMES, 2009). Os custos de instalação e operação do sistema poderão variar significativamente em função do diâmetro adotado na adutora.

Quando se pretende determinar o custo de um projeto de sistema de bombeamento, deve-se computar os custos fixos de investimento, referentes à aquisição dos equipamentos eletromecânicos, peças de conexão, obras civis de escavação e montagem dos equipamentos, sendo que, nos projetos de abastecimento de água de médio e grande porte, os custos das tubulações predominam frente aos demais, e os gastos variáveis de operação e manutenção, que ocorrem ao longo do alcance de projeto e consistem, principalmente, nos gastos de energia das estações elevatórias (GOMES, 2009). A Figura 3.3 apresenta a variação do custo total de sistemas de bombeamento em função do diâmetro da adutora.

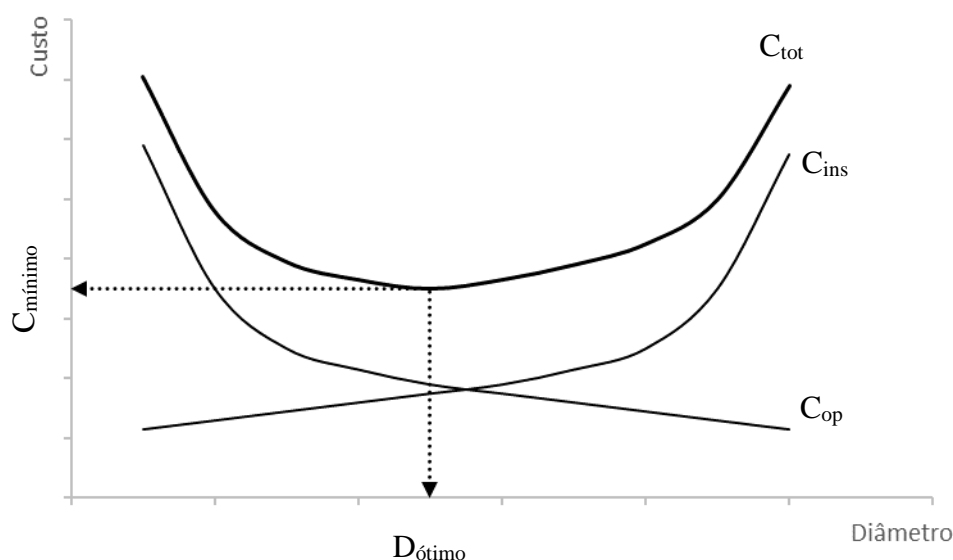


Figura 3.3. Variação do custo total em função do diâmetro da adutora

(Fonte: Gomes, 2009).

Para a obtenção do custo total do sistema, na fase de projeto, devem ser somados os custos de investimento com os custos de operação. No entanto, esses gastos incidem em tempos diferentes e, portanto, é preciso converter financeiramente os gastos variáveis em gastos fixos. Desta forma, podem-se comparar as várias alternativas de projeto e escolher aquela que apresenta o menor custo total (GOMES, 2009).

Para calcular o valor presente dos custos de operação, ao longo dos anos de alcance do sistema, Gomes (2009) indicou a utilização do Fator de Atualização ( $F_a$ ), também chamado de fator de valor presente, que efetua a conversão de uma série de custos anuais para um valor presente, sujeita a uma taxa de juros “ $i$ ” e de aumento de energia “ $e$ ”, para “ $i$ ” diferente de “ $e$ ”,

dado pela equação (11). O autor explica que a estimativa dos valores de taxa de juro anual, taxa de aumento anual do custo de energia e número de anos do alcance do projeto estará sempre sujeita a um determinado grau de incerteza já que dependem de fatores econômicos, financeiros e políticos, no caso das taxas, e da vida útil dos equipamentos e obras civis, entre outros fatores, no caso do alcance do projeto.

$$Fa = \frac{(1+e)^n - (1-i)^n}{(1+e) - (1+i)} \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (11)$$

Onde:

Fa: fator de atualização;

e: taxa de aumento anual de energia;

i: taxa de juro anual;

n: período de amortização, em anos.

A fórmula de Bresse foi proposta como alternativa para o problema do dimensionamento econômico de tubulações de recalque supondo que o custo da linha instalada é diretamente proporcional ao comprimento e ao diâmetro e que o custo do conjunto motobomba é proporcional à unidade de potência instalada (PORTO, 2006). A partir destas considerações obtém-se a equação (12), válida para quando a operação do sistema de bombeamento é contínua.

$$D = K\sqrt{Q} \quad (12)$$

Onde:

D: diâmetro da tubulação de recalque, em m;

K: constante de Bresse;

Q: vazão de recalque, em m<sup>3</sup>/s.

A constante K de Bresse depende, entre outras coisas, dos custos de material, mão-de-obra, operação e manutenção do sistema, etc. Em geral assume valores na faixa de 0,7 a 1,3. Porto (2006) explica que a fórmula de Bresse é uma equação muito simples para representar um problema complexo e com muitas variáveis econômicas, portanto deve ser aplicada apenas na fase de anteprojeto e que, a fixação de um valor para a constante K equivale a adotar uma velocidade média de recalque, chamada velocidade econômica, que para instalações de bombeamento variam de 0,6 a 3,0m/s, ou, mais comumente, de 1,5 a 2,0m/s.

Quando o funcionamento da instalação de recalque não é contínuo, o diâmetro econômico pode ser calculado pela fórmula de Forchheimer (equação (13)), também proposta pela ABNT.

$$D = 1,3X^{0,25}\sqrt{Q} \quad (13)$$

Onde:

D: diâmetro da tubulação de recalque, em m;

X: número de horas de trabalho da instalação por dia, dividido por 24

Q: vazão de recalque, em m<sup>3</sup>/s.

### 3.4 CONSUMO DE ENERGIA NO SANEAMENTO E MEDIDAS DE ECONOMIA

Existe uma importante relação entre o consumo de água e o consumo de energia utilizada para disponibilizar água tratada à população. Estima-se que entre 2% e 3% da energia do mundo são gastos nas operações dos sistemas de abastecimento de água (ALLIANCE, 2002). Estudos sobre o consumo de energia elétrica são indispensáveis na gestão e operação dos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. Sob uma perspectiva econômica e financeira, as ineficiências no uso de energia constituem custos evitáveis que são suportados por subsídios à operação dos serviços e por taxas e tarifas cobradas dos usuários. Já sob uma perspectiva ambiental, o uso de energia sem considerações de eficiência contribui para a emissão de gases de efeito estufa desnecessários com impactos nas alterações climáticas em escala global (BRASIL, 2017).

Esse consumo representa um elevado custo para as companhias prestadoras dos serviços de saneamento, ficando atrás apenas do que é gasto com recursos humanos. No Brasil, em 2015, as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento participantes do SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, do Ministério das Cidades atingiram R\$ 5,14 bilhões, tendo sido consumidos 11,0 TWh com abastecimento de água (BRASIL, 2017). Estima-se, no entanto, que o consumo de energia na maioria dos sistemas poderia ser reduzido por meio de ações de efficientização, relacionadas aos aspectos construtivos e operacionais dos sistemas (GOMES, 2009). Além disso, o gasto com energia elétrica pode ser reduzido por meio de ações administrativas como, por exemplo, adequação na contratação da tarifa de energia elétrica.

O consumo energético em cada etapa do sistema de abastecimento deve ser analisado para possibilitar um programa de eficiência hidroenergética do setor, que pode adequar-se em cada situação em função da concepção do sistema, do projeto adotado, da implantação executada e do modo gerencial da operação do sistema com reflexos nos valores finais das tarifas (BAHIA, 1998).

O estabelecimento de ações contínuas de redução e controle do consumo de energia assegura benefícios em curto, médio e longo prazos, com eficiência e eficácia. Algumas ações simples para controle dos custos de energia consistem em (BRASIL, 2017):

- Monitorar parâmetros elétricos e hidráulicos para instalações com elevado consumo;
- Proceder à manutenção dos equipamentos sempre que ultrapassar níveis pré-estabelecidos de determinado indicador (exemplo: kWh/m<sup>3</sup>) ou outro indicador adequado para avaliação do rendimento eletromecânico;
- Adequar os horários de operação dos conjuntos motobombas aos horários de tarifas elétricas mais baixas;
- Controlar o fator de potência das unidades consumidoras de energia, por meio da substituição regular de bancos de capacitores;
- Medidas de controle de perdas de água.

Além disso, segundo BID (2011) as medidas de economia podem ser classificadas nos seguintes grupos:

1. Medidas relacionadas com a tarifa de energia;
2. Medidas para redução de perdas nas instalações elétricas;
3. Medidas para aumentar a eficiência dos motores;
4. Medidas para aumentar a eficiência das bombas;
5. Medidas para reduzir as perdas de carga;
6. Medidas para reduzir os vazamentos;
7. Medidas para melhorar a operação dos sistemas de bombeamento;
8. Medidas para melhorar a manutenção dos equipamentos.

A seguir são descritos os passos para a efficientização dos sistemas seguindo as medidas supracitadas.

#### 3.4.1 Medidas relacionadas com a tarifa

É preciso definir, em primeiro lugar, como funciona a estrutura tarifária em vigor no Brasil. De maneira simplificada, a tarifa de energia é o preço cobrado por unidade de energia consumida, expressa em R\$/kWh. Podem-se dividir os consumidores de energia elétrica de acordo com a finalidade da unidade consumidora, como residência, comércio, indústria, e por nível de tensão no qual é feito o atendimento, como alta tensão (acima de 69 kV), média tensão (de 1 kV até 69 kV) e baixa tensão (abaixo de 1 kV) (BRASIL, 2010a).

Há três tipos possíveis de tarifação para os consumidores: a tarifa convencional, tarifa horo-sazonal verde (THS Verde) e a tarifa horo-sazonal azul (THS Azul) A tarifa convencional possui apenas um preço para a energia e outro para a potência. As tarifas horo-sazonais (THS) possuem preços diferentes de energia que dependem do horário (na ponta ou fora de ponta do sistema) e do período do ano (bandeira verde, amarela e vermelha) de utilização (BRASIL, 2010a).

O sistema de bandeiras tarifárias, que passou por um período de teste em 2013 e 2014, entrando plenamente em vigor a partir de 2015, foi criado para substituir a tarifa do período seco e úmido, buscando fornecer um sinal de preços mais adequado ao consumidor e mais próximo do contexto atual de custos de geração de energia, no qual a geração térmica de energia passou a ter um papel mais significativo. A bandeira verde não implicará cobrança adicional. As bandeiras amarela e vermelha, quando acionadas, implicarão tarifas de maior valor, devido ao maior custo de geração (BRASIL, 2013).

A diferença entre as duas tarifas horo-sazonais é o preço da potência utilizada. A THS Verde possui apenas um valor de tarifa para a potência (demanda), enquanto que a THS Azul tem dois preços, um para a ponta e outro para fora de ponta. Isto não significa, porém, que o custo do horário de ponta não é cobrado dos consumidores que optam pela THS Verde. Neste caso, este custo está incorporado na tarifa de energia do horário de ponta que, justamente por isso, comumente é maior do que o da tarifa de energia da THS Azul.

Conforme Coura (2007), a Tarifa Convencional pode ser vantajosa, do ponto de vista do custo da fatura de energia elétrica, para unidades consumidoras com baixo fator de carga e que não podem desligar equipamentos durante o horário de ponta. Segundo o mesmo autor, a THS Verde pode ser vantajosa para unidades consumidoras cujo consumo e demanda são nulos ou muito baixo durante o horário de ponta, enquanto que a THS Azul se mostra mais vantajosa para as unidades consumidoras que não podem reduzir o consumo significativamente durante o horário de ponta.

Para os consumidores atendidos em baixa tensão, a tarifa é cobrada somente em função do consumo de energia elétrica do período, não existindo o preço para a demanda.

Diante disso, uma área de oportunidade de economia que pode ser atraente às companhias de saneamento consiste em modificar a tarifa contratada com a companhia fornecedora de energia elétrica por alguma outra que seja mais rentável. O processo de otimização tarifária deve identificar as tarifas em que os serviços da empresa se encontram, bem como, os consumos e demandas de cada unidade, e avaliar as possibilidades de economia no custo de energia elétrica com as diferentes tarifas aplicáveis. Ou seja, deve-se fazer um

comparativo dos valores que seriam pagos em cada uma das tarifas nas quais o serviço poderia ser contratado.

Outra opção, quando a operação está sob tarifas horo-sazonais, é não operar ou reduzir a operação durante o período de ponta, onde o custo de energia é bem mais alto que no restante do dia. Ou seja, propor uma nova forma de operação dos equipamentos, de forma tal que a carga no horário de pico seja a menor possível. Uma das formas de tornar isso possível é apoiar-se na capacidade de regulação dos reservatórios.

Um estudo de gerenciamento da energia elétrica de uma empresa de saneamento é apresentado por Oliveira (2002). As ações de gestão de energia, implantadas pela empresa de saneamento de Goiás S/A, voltaram-se para a atualização do cadastro das unidades consumidoras de energia elétrica, controle efetivo das faturas, correção do fator de potência elétrico, mudança do grupo tarifário e adoção de um sistema computacional de gestão energética. O autor verificou que a partir das ações executadas foi possível uma economia de 22,58% com a correção dos erros de faturamento, 29,20% com a reclassificação das contas e 36,27% implantando contratos na modalidade horo-sazonal.

#### 3.4.2 Medidas para redução de perdas nas instalações elétricas

A redução de perdas nas instalações elétricas pode ser obtida por meio de melhorias no arrefecimento dos transformadores, realizando manutenção geral no equipamento, aumento na ventilação do local e troca de equipamentos, caso apresentem falhas irreversíveis e corrigindo o fator de potência da instalação, dado pela razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado. A legislação determina que o fator de potência deva ser mantido o mais próximo possível da unidade (1), sendo o valor mínimo admissível 0,92. Quanto maior for o consumo de energia reativa, para mesmo consumo de energia ativa, menor será o fator de potência (BRASIL, 2010b).

#### 3.4.3 Medidas para aumentar a eficiência dos motores

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição (BRASIL, 2010b). A principal consequência do desequilíbrio de tensão é o aumento das perdas elétricas, em outras palavras, sistemas elétricos desequilibrados ou desbalanceados provocam aumento considerável das perdas elétricas contribuindo para o desperdício de energia elétrica. Desequilíbrios acima de 2,5% devem ser investigados junto à concessionária de energia (Gomes e Carvalho, 2012). Soluções para a correção de redes



desbalanceadas são, portanto, além de adequações econômicas e operacionais, ações sustentáveis do ponto de vista ambiental.

Dependendo da origem do desequilíbrio de tensão podem ser implantadas diferentes medidas como as indicadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Ações corretivas em função da origem do desequilíbrio de tensão.

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

(Fonte: BID, 2011).

A substituição de motores elétricos por outro de alto rendimento é recomendável quando se esgotarem as ações que não envolvam o investimento representado pela substituição do motor. Essa medida é altamente viável quando o motor sofre uma falha e é necessário repará-lo. As principais vantagens dos motores de alto rendimento são: reduzem o consumo de energia elétrica, apresentam fator de potência, em geral, mais alto, além de menores temperaturas durante seu funcionamento. Os motores de alto rendimento são mais caros que os da linha padrão, no entanto, por serem mais eficientes gastam menos energia. Logo, o custo adicional de aquisição é compensado pelo menor custo operacional, desde que o número de horas de utilização seja suficientemente grande para proporcionar significativa economia de energia e justificar o investimento (ELETROBRAS, 2002).

Cardoso et al. (2009) apresentaram uma metodologia para calcular os impactos energéticos obtidos por ações de etiquetagem energéticas de motores com o selo PROCEL (Programa de Conservação de Energia Elétrica). Os autores constataram que, em 2007, a introdução de motores mais eficientes no mercado brasileiro resultou em economia de energia na ordem de 428 GWh, além de 119 MW de redução de demanda de ponta.

#### 3.4.4 Medidas para aumentar a eficiência das bombas

As bombas são projetadas para operar com vazões e alturas manométricas previamente estabelecidas por meio de ensaios realizados pelos fabricantes, mas que podem variar numa ampla faixa de operação. Esses ensaios indicam: a faixa de operação da bomba, a potência

necessária ao seu funcionamento, a variação do rendimento e o desenvolvimento do NPSH (*Net Positive Suction Head*) com a vazão recalçada (BAPTISTA et al., 2001).

As curvas geradas com esses ensaios constituem as curvas características da bomba e suas informações são essenciais para a escolha da bomba e para o modo de operação da elevatória.

Apesar da ampla faixa de vazão e altura manométrica que a bomba pode operar, há somente uma pequena parcela em que o bombeamento ocorre sob condições de máximo rendimento. De acordo com Santos (2007), no projeto de uma bomba, o caminho interno percorrido pelo fluido é preparado para uma única vazão ( $Q_{\text{nominal}}$ ) para que a perda de energia seja a mínima possível. Se a vazão é diferente em relação à vazão ( $Q_{\text{nominal}}$ ), aumentam-se os choques e turbulências, provocando maior perda de carga e, conseqüentemente, diminuição do rendimento.

O ponto de operação de uma bomba num determinado sistema é dado pela interseção da curva característica da bomba com a curva do sistema de tubulações, conforme apresentado na Figura 3.4.

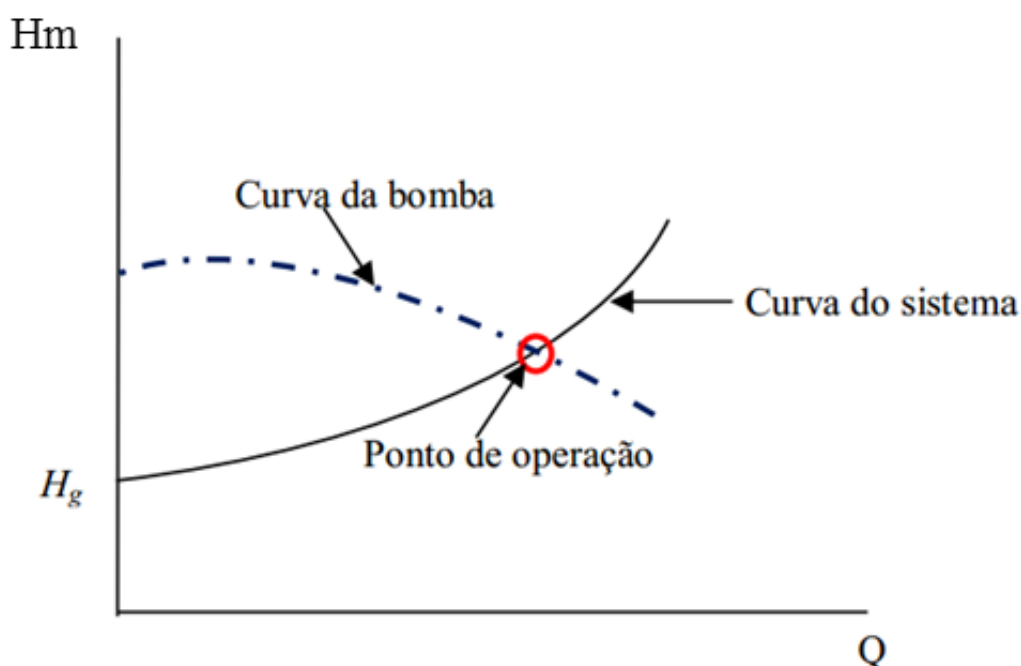


Figura 3.4. Interseção da curva do sistema com a curva característica da bomba.

Em algumas situações práticas, pode ser verificado que a bomba está operando num ponto diferente do que foi projetado, ou seja, fora da faixa de maior rendimento, acarretando em maiores custos para operação. A adequação do ponto de funcionamento pode ser obtida

utilizando, por exemplo, conversores de frequência para variação da rotação, modificando o ponto de operação. O ponto de funcionamento da bomba pode mudar ao longo dos anos de operação em função do aumento da perda de carga do sistema, deslocamento da curva do sistema para a esquerda, reduzindo a vazão e aumentando a altura manométrica. Sistemas com perdas de carga excessivas são indicados para as ações de eficiência hidroenergética.

Filho et al. (2011) desenvolveram e validaram uma metodologia para diagnosticar energeticamente um sistema de bombeamento de água para um município de cerca de 70.000 habitantes. Dentre as medidas propostas para economia de energia, o redimensionamento de bombas foi uma das que apresentou resultados mais significativos. A substituição das duas bombas que eram empregadas no sistema estudado pelos autores, por apenas uma, mantendo a altura manométrica e a vazão, resultaria na redução de 15,6% no consumo de energia.

Kaya et al. (2008) afirmam que 30% do consumo energético proveniente de bombas hidráulicas pode ser evitado a partir de melhores projetos e também da seleção adequada de equipamentos. Segundo os autores, para uma bomba trabalhar no seu ponto de máxima eficiência é necessário não somente sua correta seleção/projeto, mas também, um bom projeto do sistema no qual ela se insere e das condições de trabalho. Os programas de etiquetagem, que fornecem bases para comparação de eficiência energética aos compradores, são iniciativas fundamentais no tocante ao incremento do desempenho hidráulico e energético em sistemas de bombeamento. Sugerem, ainda, que bombas operando com vazões inferiores a 40% da nominal têm aumentados seus níveis de vibração e ruídos, além do decréscimo acentuado do rendimento.

#### 3.4.5 Medidas para reduzir as perdas de carga

A energia total entregue ao fluido pela bomba é a altura manométrica ( $H_m$ ), que representa a quantidade de energia recebida por cada unidade de peso de fluido bombeado. A altura manométrica é a altura geométrica, desnível geométrico entre os níveis dos reservatórios de sucção e recalque, acrescida da parcela relativa às perdas de carga ocorridas na tubulação que interliga os dois reservatórios.

As perdas de carga que ocorrem na tubulação representam a energia dissipada, principalmente na forma de calor, pelo escoamento do líquido no interior do conduto. São classificadas em perda de carga contínua, função do atrito interno entre partículas escoando em diferentes velocidades devido à viscosidade do fluido e da rugosidade da tubulação e perda de carga localizada, causadas por singularidades como curvas, válvulas e registros, que também provocam dissipação de energia. Quando as tubulações são muito longas, com vários

quilômetros de comprimento, como é o caso das adutoras nos sistemas de abastecimento de água urbanos, a perda de carga localizada pode ser desprezada (BAPTISTA et al, 2001).

O desnível geométrico, em geral, não pode ser otimizado, pois depende da topografia local. Já as perdas de carga podem ser alvo de ações de efficientização. As principais medidas para reduzir a perda de carga nas tubulações de recalque são: diminuição da rugosidade mediante limpeza ou revestimento das paredes internas, substituição da tubulação por outra de maior diâmetro e implantação de tubulação em paralelo à já existente (GOMES, 2012).

#### 3.4.6 Medidas para reduzir os vazamentos

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

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

A vazão total bombeada pelo sistema deve atender as necessidades de abastecimento da população, mas é acrescida da parcela de perdas que ocorrem ao longo dos sistemas de abastecimento de água. As perdas são classificadas em perdas reais e aparentes, segundo balanço hídrico, apresentado na Figura 3.5. Matriz do balanço hídrico, que foi proposto pela International Water Association (IWA) (LAMBERT e HIRNER, 2000).

Entrada de água no sistema (m <sup>3</sup> /ano)	Consumo autorizado (m <sup>3</sup> /ano)	Consumo autorizado faturado (m <sup>3</sup> /ano)	Consumo faturado medido – inclui água exportada (m <sup>3</sup> /ano)	Consumo faturado (m <sup>3</sup> /ano)		
			Consumo faturado não medido (m <sup>3</sup> /ano)			
	Perdas de água (m <sup>3</sup> /ano)	Consumo autorizado não faturado (m <sup>3</sup> /ano)		Consumo não faturado medido (m <sup>3</sup> /ano)	Consumo não faturado (m <sup>3</sup> /ano)	
				Consumo não faturado não medido (m <sup>3</sup> /ano)		
		Perdas reais (m <sup>3</sup> /ano)	Perdas aparentes (m <sup>3</sup> /ano)	Uso não autorizado (m <sup>3</sup> /ano)		
				Erros de medição (m <sup>3</sup> /ano)		
	Perdas reais na captação e no tratamento (m <sup>3</sup> /ano)					
		Vazamentos em tubulações de adução e distribuição (m <sup>3</sup> /ano)				
		Vazamentos e extravasamentos em reservatórios (m <sup>3</sup> /ano)				
		Vazamentos nos ramais – à montante do hidrômetro (m <sup>3</sup> /ano)				

Figura 3.5. Matriz do balanço hídrico.

(Fonte: Lambert e Hirner, 2000).

Quando o sistema apresenta índices elevados de perdas, reais e aparentes, a vazão bombeada pode estar superdimensionada, ou seja, poderia ser reduzida com ações de redução das perdas, principalmente as perdas reais, que incluem os vazamentos, ou então o sistema opera mais tempo do que o necessário. O estudo de redução de perdas exige uma análise acurada, pois a partir de um momento, o valor que é investido para o controle dessas perdas não retorna à companhia de saneamento na mesma proporção. Gomes (2009) aponta que não vale a pena, economicamente, reduzir as perdas de água para níveis abaixo de 10%. Estima-se que foram perdidos no Brasil, em média, 37% do volume de água tratada nos sistemas de distribuição em 2015 (BRASIL, 2017).

A manutenção das redes de distribuição de água mostra-se bastante desafiadora para os gestores das companhias prestadoras dos serviços de saneamento, pois em muitos casos, essas redes foram construídas há mais de dez ou até vinte anos. Redes mais antigas podem apresentar problemas estruturais e, por consequência, elevados índices de perdas reais, em função dos vazamentos.

Naoum-Sawaya et al. (2015) propuseram uma abordagem heurística para apoiar a tomada de decisão do programa de reparo e substituição de tubulações em redes de distribuição. A abordagem tem como objetivo minimizar o custo das perdas de água, e leva em consideração a relação custo-benefício entre a substituição ou reparo do tubo e a economia proporcionada por sua substituição. As restrições hidráulicas do sistema e o impacto de cada tubulação substituída na rede são avaliados utilizando simulação hidráulica. Os autores apresentaram um estudo de caso em um sistema real com o modelo desenvolvido, onde para diferentes valores

de investimento em novas tubulações, o índice de redução de perdas foi calculado. Concluíram que, para o caso estudado, o investimento ideal seria 50% do valor calculado para a total substituição das tubulações, diminuindo as perdas em 53%, e que a partir deste ponto, o investimento pode aumentar, mas o índice de redução de perdas não o acompanha.

A gestão de perdas tem grande importância nas ações das companhias de saneamento. As principais ações, indicadas para esta finalidade são: modernização institucional visando à melhoria na redução de perdas reais, perdas aparentes e o desenvolvimento gerencial, institucionalização de atividades rotineiras relacionadas ao gerenciamento das perdas de água nos processos operacionais, aumento da capacidade de desenvolvimento de projetos para redução de perdas de água e desenvolvimento da capacidade de mobilização e comunicação interna (para os funcionários) e externa (para a comunidade) visando dar sustentabilidade, governabilidade e perenidade aos programas implantados (BRASIL, 2017).

#### 3.4.7 Medidas para melhorar a operação dos sistemas de bombeamento

Melhorias na operação de sistemas de bombeamento podem ser obtidas utilizando-se conversores de frequência para variação da rotação, e conseqüentemente, da vazão bombeada ao longo do dia.

Além disso, a utilização desse equipamento é indicada como método ideal de arranque dos motores elétricos, tanto para redução da corrente, que é mantida constante e equivalente à corrente nominal do motor, como para a eliminação de oscilações bruscas de pressão na saída da bomba. Os conversores de frequência são dispositivos que alteram eletronicamente a frequência da corrente elétrica e, conseqüentemente, a rotação dos motores de forma contínua e suave (GRUNDFOS, 1996).

Para Gomes (2012), as vantagens dos conversores de frequência em sistemas de bombeamento são:

- aumento da confiabilidade do sistema;
- aumento da vida útil das bombas, mancais e vedações;
- controle da corrente do motor elétrico;
- economia de energia;
- aumento do fator de potência;
- elimina a necessidade de válvulas para partir e parar o bombeamento;
- melhor controle do processo;
- minimiza a necessidade de paradas do sistema ou elimina saltos de produção; e
- possibilita a automação do sistema.

Para Gibson (1994), dispositivos para variação de velocidade são alternativas energeticamente eficientes para controlar a vazão de bombas e podem ser utilizados de forma similar às alternativas tradicionais, como o estrangulamento de válvulas. Segundo o autor, a efetividade de dispositivos de controle de velocidade no controle da vazão depende da interação entre a curva característica da bomba e a curva do sistema ou processo. Essa interação inclui a magnitude da variação de velocidade necessária para que sejam obtidas as vazões máximas e mínimas requeridas, e sua relação com as regiões instáveis da curva da bomba, geralmente localizada na faixa de vazão inferior a 35% da nominal.

Em contrapartida, Gomes (2012) afirma que as bombas podem operar satisfatoriamente dentro de uma faixa de vazão entre 70 e 120% do ponto de melhor rendimento, sendo que o limite de operação é definido pelo NPSH requerido da bomba, pela vazão de recirculação dentro do rotor, deflexão do eixo, carga no mancal ou pelo aumento da temperatura do líquido dentro da bomba. Além disso, segundo o autor, o motor elétrico também sofre variações do rendimento, fator de potência, velocidade de rotação e corrente, em função da potência da carga acionada, logo, a melhor região de trabalho do motor está entre 75 e 100% da carga acionada, ou seja, é nesta região que se obtém valores elevados para o rendimento e o fator de potência de motor, contudo, aplicação em valores inferiores a 75% não são inviabilizadas, mas perdem em eficiência. Em relação a faixa de frequência de alimentação do motor, o autor recomenda variação entre 30 a 60Hz.

Outra forma de se obter melhorias na operação dos sistemas de bombeamento é por meio da utilização da capacidade de reserva do sistema, evitando, com isso, a operação das bombas durante o período de ponta do sistema elétrico.

Ramos et al. (2010) apresentaram uma metodologia desenvolvida para mensurar os resultados positivos a partir da implantação de algumas medidas de eficiência energética, dentre elas a otimização da operação de um sistema de bombeamento em função das variações da tarifa de energia ao longo do dia. O algoritmo desenvolvido para operar o sistema de bombeamento tem por função-objetivo minimizar os custos com energia em um dia de operação, sem deixar de atender, no entanto, as restrições hidráulicas do sistema, como o total atendimento da demanda de água e também as restrições de pressão e vazão inseridas por meio de um modelo de simulação hidráulica acoplado ao algoritmo de otimização. Concluíram que modelos como esse, apesar de não afetarem o consumo de energia, podem diminuir consideravelmente os custos relativos a esse consumo.

### 3.4.8 Medidas para melhorar a manutenção dos equipamentos

As boas práticas de manutenção dos equipamentos do sistema de bombeamento contribuem para a economia de energia. Deve-se manter um procedimento para manutenção preventiva e corretiva dos motores e das bombas aumentando, com isso, a vida útil desses equipamentos e a redução da necessidade de investimentos, entre outras vantagens.

Gomes (2012) aponta as principais falhas que impedem o funcionamento do equipamento, possibilitando a sua permanência em operação mesmo com perda de eficiência e sob risco de quebra definitiva como:

- vibração excessiva em conjuntos motobomba por causas relacionadas aos eixos ou às carcaças: podem ser provenientes de causas mecânicas, como desalinhamento, ou causas elétricas, como defeito nos mancais;
- sobreaquecimento dos mancais de conjuntos motobomba: pode estar relacionado a deficiências na lubrificação em geral, ou por mancais operando com rotações muito altas;
- sobreaquecimento nos enrolamentos dos motores: causado por deficiências no sistema de refrigeração, por exemplo;
- motores operando com correntes ou tensões desequilibradas;
- bombas operando em condições anormais: presença de fenômeno de cavitação, comprometendo a integridade e eficiência dos rotores, queda de vazão em função da presença de ar na tubulação de sucção, entre outros;
- falhas em transformadores, operando com sobreaquecimento, em banco de capacitores, causadas por surtos de tensão ou presença de harmônicas, fusíveis rompidos, entre outros, ou em instrumentos da rede como válvula de retenção deficiente e motores demandando potência acima da necessária; e
- queimas prematuras de equipamentos elétricos por falhas na manutenção: motores operando com falta de fase, tentativas fracassadas de ligar o motor, conversor de frequência operando em ambiente mal ventilado, substituição aleatória de fusíveis rompidos por outros de capacidade maior, localização inadequada ou uso incorreto de transformadores de corrente, etc.

A implantação de qualquer uma das medidas apresentadas nesta seção precisa ser avaliada com parcimônia, além disso, devem ser analisadas junto a critérios econômicos que justifiquem seu emprego e demonstrem seus ganhos. Os indicadores de eficiência hidroenergética mostram-se como ferramentas interessantes nesse sentido.



### 3.5 INDICADORES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA

Para melhor aplicação das medidas de planejamento e gestão dos recursos hídricos e energéticos nos sistemas de bombeamento de água é importante que se conheça: a infraestrutura existente, os procedimentos operacionais, os cadastros comerciais e também que haja monitoramento dos parâmetros elétricos, hidráulicos e mecânicos envolvidos. Avaliar a eficiência energética é importante para estabelecer prioridades de intervenção e para controlar a eficácia das medidas implementadas. No entanto, para Duarte et al. (2008), esta tarefa está longe de ser trivial e, por isso, é aconselhável a utilização de indicadores de desempenho ou de índices de desempenho técnico.

Segundo De Rolt (1998), indicadores de desempenho referem-se a elementos que medem níveis de eficácia e eficiência de uma organização por meio da análise dos processos produtivos relacionados à satisfação dos clientes. A utilização de um indicador de desempenho, portanto, simplifica uma avaliação que de outra forma seria mais complexa e subjetiva (ALEGRE et al. 2004).

Para Franceschini et al. (2007), indicadores são ferramentas de representação de sistemas complexos, que permitem a coleta de informações e sua análise, visando à avaliação da evolução do sistema. Sugerem, ainda, que os indicadores possuem três funções básicas: avaliar e controlar o desempenho dos recursos disponíveis, demonstrar o desempenho da organização interna e externamente e apontar falhas entre o desempenho e as metas estabelecidas.

A principal referência internacional nesse sentido é a publicação feita pela IWA (2000) intitulada: *Performance Indicators for Water Supply Services*. Essa publicação teve por objetivo fornecer um quadro de referência de indicadores de desempenho que constituísse um instrumento de apoio à gestão das entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água. Foi traduzida para o português e publicada em 2004 com o título: *Indicadores de Desempenho para Serviços de Abastecimento de Água* (ALEGRE et al., 2004). O sistema proposto é dividido em seis grupos de indicadores: recursos hídricos, recursos humanos, infraestrutura, operacionais, qualidade de serviço e econômico-financeiros.

Alguns indicadores referentes ao sistema de bombeamento estão inseridos no grupo dos indicadores de infraestrutura, entre eles o consumo de energia normalizado (Ph5) (kWh/m<sup>3</sup>/100m) que representa a energia consumida pelo sistema para elevar 1m<sup>3</sup> de água a 100 metros de altura manométrica (Hm). O indicador representa uma medida indireta do rendimento dos conjuntos motobomba e é dado pela equação (14).

$$CEN = \frac{\text{ConsumoEnergia}}{\text{VolumeBombeado} \times \frac{Hm}{100}} \quad (14)$$

Um dos indicadores mais utilizados para mensurar a eficiência de sistemas de bombeamento tem sido o consumo específico de energia elétrica, expresso em kWh/m<sup>3</sup>, que representa a energia necessária para bombear 1m<sup>3</sup> de água. Esse indicador é útil para acompanhar o desempenho de uma mesma instalação de bombeamento, ao longo do tempo, mas não se presta a comparar o desempenho de instalações distintas, sendo esta a sua principal limitação. O indicador consumo específico normalizado, por sua vez, foi proposto pela IWA para driblar essa limitação (GOMES, 2012).

O consumo específico de energia elétrica, é indicado também pelo SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, do Ministério das Cidades. Os prestadores nacionais de serviços de água e esgoto são convidados, anualmente, a fornecerem informações sobre seus sistemas. Essas informações são analisadas e dão origem a uma série de indicadores de natureza operacional, econômica, financeira, administrativa, de balanço e qualidade, publicados sob o título: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto.

A vigésima primeira edição do Diagnóstico foi publicada em fevereiro de 2017 e refere-se aos dados de 2015. A primeira edição foi publicada em 1995. Em 2015, o SNIS apurou informações sobre abastecimento de água em 5.088 municípios, com população urbana de 169,0 milhões de habitantes, assegurando uma representatividade de 91,3% em relação ao total de municípios e de 97,8% em relação à população urbana do Brasil. Foram apresentados 32 indicadores econômico-financeiros e administrativos, 22 indicadores operacionais dos serviços de água, 08 indicadores operacionais dos serviços de esgoto, 09 indicadores de balanço e 13 indicadores de qualidade. O índice de consumo de energia elétrica, calculado para os sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, IN058 e IN059, respectivamente, é expresso em kWh/m<sup>3</sup> e encontra-se na seção dos indicadores operacionais. Outros indicadores econômicos relacionam a participação da energia elétrica nas despesas operacionais. Além disso, alguns índices versam sobre as perdas de água, por exemplo: índice de perdas no faturamento, índice de perdas na distribuição, índice bruto de perdas lineares, índice de perdas por ligação (BRASIL, 2017).

Duarte et al. (2008) apresentaram três índices de desempenho energético global para sistemas de bombeamento denominados: E1 (energia em excesso por volume de água que entra no sistema), E2 (energia em excesso por volume de água faturada) e E3 (razão entre a energia fornecida e a energia mínima do sistema). O índice E1 é adequado para avaliar o impacto de

medidas de gestão de energia tais como a utilização de grupos motobomba com velocidade de rotação variável, a redução da carga hidráulica fornecida na origem ou a instalação de microturbinas em sistemas com energia em excesso. O índice E2 traduz o potencial teórico de redução de energia por m<sup>3</sup> de água faturada, ou seja, traduz o efeito em termos de energia de ações de controle de perdas. Por fim, o índice E3, segundo os autores, quantifica de uma forma muito direta o excesso teórico de energia que é fornecido ao sistema, pois relaciona a energia fornecida com a energia mínima do sistema, dada pelo somatório da energia requerida em cada ponto do sistema, de modo a satisfazer os respectivos consumos (sem incluir perdas de água) e os requisitos mínimos de pressão.

A publicação sobre indicadores da IWA (ALEGRE et al., 2004) apresenta, além do Ph5 (Consumo de Energia Normalizado) outros indicadores relacionados aos sistemas de bombeamento como: Ph4 – utilização da capacidade de bombeamento (%) que mede a capacidade de bombeamento remanescente no dia de maior consumo energético; Ph6 – consumo de energia reativa (%) que expressa o percentual de energia reativa consumida em relação ao consumo total de energia; Ph7 – recuperação de energia (%) que indica o potencial para recuperação de energia por meio do uso de turbinas ou de bombas de eixo reversível.

Cabrera et al. (2010) utilizaram indicadores de desempenho para caracterizar o balanço energético de redes de distribuição de água e avaliar sua eficiência energética. Cinco indicadores foram propostos: taxa entre energia real inserida no sistema e a mínima energia útil (somatória das energias mínimas requeridas por cada nó, calculadas pelo produto do volume consumido em cada nó durante o tempo considerado pela mínima carga hidráulica requerida); taxa entre a energia efetivamente utilizada pelos consumidores no período de simulação; capacidade hidráulica da rede, expressa pela relação entre a energia perdida por atrito e a energia fornecida ao sistema; energia perdida por vazamentos, calculado através do quociente entre a soma das perdas de energia por vazamento (volume perdido associado à carga hidráulica) e das perdas por atrito causadas pelos vazamentos (diferença entre a energia perdida por atrito e a energia perdida por atrito na mesma rede, sem vazamentos); e, taxa entre energia entregue aos consumidores e a mínima energia útil. Sendo que, quando encontrado valor menor que 1, há déficit de pressão para os consumidores e quando superior a 1, há excesso de pressão na rede.

### 3.6 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

Dentro do contexto da utilização dos recursos naturais nas diversas atividades humanas e, inseridos nestes, os recursos hídricos e energéticos, mostra-se cada vez maior a preocupação

com o consumo consciente e a conservação, em função do crescimento acelerado da população mundial e também da preocupação com a manutenção dos recursos para as futuras gerações.

As técnicas de otimização surgem com expressivo papel nesse sentido, pois podem atuar melhorando o desempenho de diversos processos, diminuindo custos, maximizando a produção, entre outros. Otimização é a busca da melhor solução para um determinado problema. Um processo de otimização consiste de variáveis de decisão cujos valores otimizados deseja-se conhecer, com uma ou mais funções-objetivo e que atenda as restrições determinadas.

Os problemas de otimização podem ser resolvidos usando métodos determinísticos como programação linear, programação não-linear e programação dinâmica. Apesar de alguns desses métodos possuírem grande rapidez e precisão na busca da solução algumas desvantagens são apontadas como: necessidade de cálculo de derivadas, dificuldade de adaptação a projetos com variáveis discretas, e complexidade de implementação nos trabalhos práticos de engenharia (WU e SIMPSON, 2001).

Outra opção são os métodos estocásticos, que buscam a solução por meio de regras que levam em conta processos aleatórios. Nestes casos, a exploração do espaço de busca não é feita somente na vizinhança de ótimos e isso aumenta as chances de se encontrar o verdadeiro ótimo global. Em contrapartida, o número de chamadas à função-objetivo é tipicamente superior aos métodos determinísticos, acarretando maior tempo de processamento para encontrar a solução do problema.

Para Loucks e Van Beek (2005), existem diversas maneiras de classificar os modelos de otimização, contudo, todos têm em comum o fato de que estão descrevendo situações onde existem múltiplas soluções que satisfazem todas as restrições e, portanto, existe o desejo de encontrar a melhor alternativa, ou ao menos um conjunto de boas soluções.

Entre as diferentes técnicas de otimização estocásticas, os algoritmos genéticos têm sido amplamente utilizados para resolver problemas em áreas das engenharias e outras. Os algoritmos genéticos surgiram da analogia entre a otimização e os processos da genética e da evolução natural das espécies, como: adaptação seletiva, troca de material genéticos e sobrevivência de organismos mais adaptados. Entre as principais vantagens dessa técnica está a sua capacidade para otimizar parâmetros contínuos ou discretos, não ter seu desempenho afetado por descontinuidades da função-objetivo e a possibilidade de serem empregados para uma grande variedade de problemas (GOLDBERG, 1989).

O sucesso do método de otimização utilizando Algoritmos Genéticos tem conduzido diversos pesquisadores a aplicar essa técnica nas mais variadas áreas de conhecimento, especialmente abrangendo aspectos relativos às redes de distribuição e a operação de sistemas

de bombeamento inseridos em sistemas de abastecimento de água (WU e SIMPSON, 2001; PEDROSA FILHO, 2006; ALBUQUERQUE, 2007; BARDALES, 2007; WU et al., 2012; WU et al. 2015).

Neste contexto, o algoritmo *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona – SCE-UA* ("Algoritmo de Evolução de Complexos Misturados, Universidade de Arizona") trata-se de uma estratégia de otimização global baseada em Algoritmos Genéticos e foi desenvolvido por Duan et al. (1992) para calibração automática de modelos chuva-vazão (DINIZ, 1999).

Este algoritmo foi utilizado na presente pesquisa para otimizar a regra de operação de um sistema de bombeamento. Na elaboração do sistema foram consideradas diferentes combinações de valores de desnível geométrico, comprimento e diâmetro da linha adutora. Para cada combinação o algoritmo definiu a regra de operação otimizada. A próxima subseção explica a forma de pesquisa do ótimo global realizada pelo algoritmo SCE-UA.

### 3.6.1 Algoritmos de evolução de complexos misturados

A otimização proposta nesta pesquisa foi feita utilizando o algoritmo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution - University of Arizona*) inicialmente descrito por Duan et al. (1992), que desenvolveram esse método alternativo ao analisar a superfície de resposta de funções-objetivo aplicadas à calibração de modelos hidrológicos. Os autores constataram nessa análise que, por apresentarem muitos ótimos locais, os métodos de calibração automática de busca local não conseguiam encontrar o mínimo global.

O princípio deste algoritmo é a evolução de uma população de soluções candidatas, similarmente a um algoritmo genético. Trata-se da combinação da estratégia de busca do método Simplex, de Nelder e Mead (1965), com conceitos de busca aleatória supervisionada, evolução competitiva e mistura de complexos. A síntese dessas estratégias faz com que o algoritmo seja eficaz, flexível e eficiente.

O algoritmo inicializa criando de forma aleatória um conjunto de soluções candidatas, denominado de população. Esta população de pontos se encontra no interior do espaço de busca definido pelos valores máximos e mínimos que cada variável decisão pode apresentar para que o resultado encontrado seja viável. A população é separada em complexos que evoluem em direção ao ótimo global de uma única função-objetivo, através de sucessivas iterações baseados em um processo de exploração do espaço de busca. Os complexos evoluem independentemente uns dos outros, ou seja, o espaço de busca é explorado em várias direções.

Os passos do algoritmo estão reproduzidos a seguir e foram apresentados por Duan et al. (1992):

- 1 Para o início do processo, são selecionados os valores dos parâmetros do algoritmo,  $p \geq 1$  e  $m \geq 2n'+1$ , onde  $p$  representa o número de complexos,  $m$  o número de pontos em cada complexo e  $n'$  o número de variáveis de decisão do problema de otimização. O tamanho da população ( $s$ ) é definido pelo produto entre  $p$  e  $m$ .
- 2 Para a geração da população inicial, cada variável de decisão deve ter seus limites, máximo e mínimo, estabelecidos com base no conhecimento do problema, permitindo a definição do espaço de busca. A partir disso, são gerados  $s$  conjuntos de variáveis de decisão. Os conjuntos são escolhidos de forma aleatória, utilizando uma distribuição de probabilidades uniforme dentro do espaço de busca.
- 3 Os pontos da população são avaliados com a função-objetivo e reorganizados, em ordem crescente de função-objetivo, formando o conjunto  $D$ . Como o algoritmo foi desenvolvido para problemas de minimização, o primeiro ponto de  $D$  apresenta o menor (melhor) valor da função-objetivo.
- 4 A população  $D$  de  $s$  pontos é dividida em  $p$  complexos, cada um com  $m$  pontos. A divisão de complexos segue a regra  $A^k = \{x_j^k, f_j^k\}$  onde  $x_j^k = x_{k+p(j-1)}$  e  $f_j^k = f_{k+p(j-1)}$ , para  $j = 1, \dots, m$ , onde  $k$  é o número de complexos, que varia de 1 a  $p$ ,  $j$  é o número de pontos dentro do complexo, que varia de 1 a  $m$ ,  $x$  é o conjunto de variáveis de decisão e  $f$  é a função-objetivo. Esta regra faz com que cada complexo esteja formado por certo número de soluções "boas" (baixos valores da função-objetivo) e de soluções "ruins" (altos valores da função-objetivo).
- 5 Evolução dos complexos: a cada complexo é dada a oportunidade de evoluir com base no método de Evolução Competitiva Complexa, explicado posteriormente.
- 6 Os complexos  $A^k$  são novamente agrupados na população  $D$ , e os pontos reorganizados, em ordem crescente de função-objetivo.
- 7 Teste de convergência: Se o critério de convergência é satisfeito, o algoritmo se encerra. Caso contrário, o procedimento retorna ao passo 3.

O algoritmo de Evolução Competitiva Complexa, usado no passo 5, para a evolução de cada complexo do algoritmo SCE-UA, também foi descrito por Duan et al. (1992) e está transcrito a seguir:

- 1 Início: são selecionados valores de  $q$ ,  $\alpha'$  e  $\beta$ , que são parâmetros do SCE-UA. Os valores são escolhidos de forma que  $2 \leq q \leq m$ ,  $\alpha' \geq 1$ , e  $\beta \geq 1$ .
- 2 Atribuição de pesos: cada um dos pontos do complexo recebe um peso, proporcional a sua posição na hierarquia do complexo. Os pesos são atribuídos em função de uma distribuição de probabilidades trapezoidal, considerada em cada um dos complexos

através da equação (15). Os pesos atribuídos variam de forma linear entre o valor máximo, atribuído ao ponto  $i=1$ , até o valor mínimo, superior a zero, atribuído ao ponto  $i=m$ .

$$p_i = \frac{2 \times (m+1-i)}{m \times (m+1)} \quad (15)$$

Onde:

$i = 1, \dots, m$

$p_i$ , é o peso do ponto  $i$ ;

$i$  é a posição do ponto no complexo.

- 3 Seleção dos pais: um subcomplexo de  $q$  pontos ( $u_j$  onde  $j=1, \dots, q$ ) é escolhido de forma aleatória em cada complexo. A probabilidade de cada ponto do complexo ser parte do subcomplexo é dada pelo peso definido em 2.
- 4 Geração dos filhotes: os pontos do subcomplexo são organizados de forma crescente de função-objetivo e calculado o centroide ( $g$ ) dos  $q-1$  melhores pontos do subcomplexo, segundo a equação (16).

$$g = \frac{1}{q-1} \times \sum_{j=1}^{q-1} u_j \quad (16)$$

- 5 As coordenadas de um novo ponto são calculadas como segue:
  - a. O ponto  $X_R$  é chamado de "pontos de reflexão" e suas coordenadas são calculadas de acordo com a equação  $X_R=2g-u_q$ .
  - b. Se  $X_R$  estiver contido no espaço de busca é calculado o valor da função-objetivo  $F_R$  e o procedimento continua no passo c. Caso contrário, é definido o menor hipercubo que contém todos os pontos do complexo e gerado um ponto  $X_A$ , de forma aleatória, no interior deste hipercubo. Posteriormente é calculada  $F_A$  e feito  $X_R=X_A$  e  $F_R=F_A$ .
  - c. Se  $F_R < F_q$ ,  $u_q$  é substituído por  $X_R$  e o procedimento continua no passo e. Caso contrário as coordenadas de um novo ponto ( $X_C$ ), chamado "ponto de contração", são calculadas com a equação  $X_C=(g+u_q)/2$ . Posteriormente é calculada  $F_C$ .
  - d. Se  $F_C < F_q$ ,  $u_q$  é substituído por  $X_C$  e o procedimento continua no passo e. Caso contrário é definido o menor hipercubo que contém todos os pontos do complexo e gerado um ponto  $X_A$ , de forma aleatória, no interior deste hipercubo (passo de mutação). Posteriormente é calculada  $F_A$  e substituído  $u_q$  por  $X_A$ .
  - e. Repetir os passos a-d um número  $\alpha'$  de vezes.
- 6 Os pontos de cada um dos subcomplexos são devolvidos, modificados, a cada complexo.

7 Os passos 1 a 5 são repetidos um número  $\beta$  de vezes.

Informações mais detalhadas a respeito do algoritmo podem ser encontradas nos trabalhos apresentados por Duan et al. (1992), Lacerda e Carvalho (1999), Collischonn e Tucci (2001) e Bravo (2006).

Algumas vantagens do algoritmo são: convergência rápida ao ótimo global mesmo quando a região de busca apresenta vários ótimos locais e capacidade para modelar problemas com um grande número de variáveis de decisão (NUNOO e MRAWIRA, 2004).

Diversos pesquisadores já utilizaram o algoritmo SCE-UA com bons resultados em diferentes situações, por exemplo, otimização das soluções para manutenção e reabilitação da infraestrutura de sistemas de pavimentação em centros urbanos, em que a programação das obras de preservação de infraestrutura representa um desafio computacional devido à complexidade e escala do problema. A partir dos resultados de um estudo de caso os autores observaram que o algoritmo SCE-UA apresentou boa convergência dos resultados além de eficiência e consistência (FERREIRA, et al. 2000; NUNOO e MRAWIRA, 2004).

Gopalakrishnan e Ceylan (2010) utilizaram o SCE-UA para otimização da análise de qualidade e rigidez de pisos de concreto, onde a função-objetivo foi formulada para minimizar o erro entre o valor de deflexão calculado e medido *in-loco*. As variáveis de decisão foram o módulo de elasticidade da laje e o módulo de reação do subleito que eram utilizadas por um modelo de substituição de pavimentação desenvolvido em Redes Neurais.

Grave (2016) empregou o algoritmo SCE-UA acoplado a um algoritmo de águas rasas buscando controlar cheias por meio de controle de uma vazão alternativa ao curso natural, considerando, ainda, topografia complexa e situações de inundação e secagem. Para testar a aplicação do SCE-UA a autora, num primeiro momento, buscou otimizar funções-objetivo que possuíssem solução analítica conhecida. Observou que, em geral, o algoritmo resolve a busca de mínimos de funções-objetivo com pouquíssimas interações, mesmo para funções complexas que são de difícil otimização. Como conclusão, afirma que, alterando a função-objetivo, este método pode ser utilizado para diversos problemas de otimização, com uma vasta gama de aplicação em problemas de engenharia.

Além destas aplicações, o algoritmo tem apresentado excelentes resultados na calibração automática de modelos hidrológicos, primeira aplicação proposta pelos autores que desenvolveram o algoritmo (DUAN et al. 1992; DINIZ, 1999; COLLISCHONN e TUCCI, 2001; COOPER et al. 2007; DAKHLAOUI et al. 2012; SALLA et al. 2015). Na prática, a principal dificuldade em relação ao uso de modelos hidrológicos está relacionada à sua calibração, já que a maioria deles possui uma grande quantidade de parâmetros. Assim, a



calibração do modelo pode ser considerada como um problema de otimização global porque seu principal objetivo é encontrar um conjunto de valores de parâmetros ótimos dentro de um grande espaço de parâmetros multidimensional que forneça o melhor ajuste entre os valores de vazão observados e estimados (COOPER et al. 2007). Salla et al. (2015) afirmam que a calibração bem-sucedida de parâmetros de modelos hidrológicos através do SCE-UA é extremamente importante, visto que esta é uma das atividades mais importantes e difíceis na modelagem chuva-vazão.

Outra aplicação largamente utilizada é na determinação das regras de operação lineares em sistemas de reservatórios (KOUTSOYIANNIS et. al., 2002; BRAVO et. al., 2008; WANG et. al., 2010). Bravo (2006) utilizou o algoritmo SCE-UA para a otimização da curva-guia de um reservatório com usos conflitantes, geração de energia e controle de cheias, onde a curva-guia foi representada por segmentos de retas cujas coordenadas dos pontos extremos foram consideradas como variáveis de decisão e a função-objetivo foi formulada de modo a representar a energia gerada sem romper as restrições de nível máximo do reservatório, para evitar inundações a montante da barragem.

No caso dos reservatórios destinados à irrigação, a operação deve garantir o abastecimento dos usuários e, para tanto, é preciso prever com precisão as variações nas vazões de entrada e saída. Os sistemas podem apresentar múltiplos reservatórios, o que torna a operação ainda mais complexa. Outro fator complicador são as vazões de retorno proporcionados pela irrigação que podem impactar o regime dos rios. Kang e Park (2014) desenvolveram um modelo para simular as vazões no sistema de reservatórios de irrigação em série de uma bacia hidrográfica. Levaram em consideração as vazões de retorno da irrigação (através dos canais de drenagem e do escoamento subterrâneo) e a operação dos reservatórios. O modelo desenvolvido era alimentado por um subprograma para estimativa de demanda da irrigação e foi utilizado o SCE-UA para calibrar os parâmetros do modelo. A função-objetivo a ser minimizada representava o erro entre a vazão simulada e a vazão observada.

Dong et al. (2013) utilizaram o SCE-UA para determinar a programação de geração de energia em um sistema composto por uma hidrelétrica e três termelétricas. A função-objetivo foi formulada para representar a diferença entre a receita total e os custos de geração (térmica e hidráulica). O ótimo global foi encontrado a partir da 35ª geração com tempo computacional de 570 segundos. Os autores concluíram que o resultado da programação obtida com o SCE-UA utiliza os recursos hídricos de modo adequado e diminui ao mínimo o consumo de carvão.

Lerma et al. (2015) avaliaram o algoritmo para otimizar as regras de operação de um sistema de três reservatórios com diferentes vazões de entrada, 44 demandas (urbanas e

agrícolas) e sistemas de bombeamento. As regras de operação obtidas com o algoritmo eram inseridas em um modelo de gestão complexa de sistemas de recursos hídricos onde existem elementos de controle ou armazenamento superficiais e/ou subterrâneos, elementos de coleta, transporte, uso e/ou consumo e recarga artificial de água. A função-objetivo foi definida de modo a contemplar o atendimento das demandas (eficácia) e o custo do sistema de bombeamento. Os autores explicam que um problema existente neste tipo de situação é que, aumentar a eficácia do sistema pode significar, em muitos casos, bombear mais, ou seja, aumentam os custos do bombeamento. Diante disto, os autores adicionaram o custo do bombeamento na função-objetivo de modo que as melhores soluções atendam a demanda sem onerar o custo do sistema. Outra preocupação foi com relação ao atendimento das demandas urbanas, ou seja, foi dado prioridade ao atendimento destas em detrimento das demandas agrícolas. Após o processo de otimização, a melhor solução, convertida em regra de operação, levou ao menor custo anual com apenas 3, das 44 demandas, com déficit.

Diante do exposto, é possível perceber a larga utilização do algoritmo SCE-UA para resolver problemas de otimização em diferentes áreas, a qual sugere que a ferramenta também possa ser útil para o setor de abastecimento de água, passível de otimização em diversos aspectos como: determinação de regras de operação dos sistemas de bombeamento, avaliação do atendimento de demandas, tomadas de decisão sobre o volume de reservatórios bem como sua variação de nível, entre outros.

Nesta pesquisa, o algoritmo foi utilizado para a minimização dos custos de operação de um sistema de bombeamento de água e determinação das características hidráulicas e geométricas do sistema, que está de acordo com o objetivo principal da pesquisa que é desenvolver uma metodologia para análise geral da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água operados com conversor de frequência na fase de projeto, ou para diagnóstico de operação, por meio do uso de índices e indicadores.

## 4 METODOLOGIA

Esse capítulo compreende a descrição dos métodos experimentais utilizados para a realização da pesquisa que trata do desenvolvimento de uma metodologia de análise da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água com potencial de utilização em projetos e/ou para diagnóstico de operação, por meio do uso de índices e indicadores. São detalhados o modelo teórico desenvolvido, as considerações e critérios adotados, o algoritmo SCE-UA com suas características e restrições, os indicadores de eficiência hidroenergética propostos e a análise econômica realizada para avaliação dos custos envolvidos na operação e instalação do sistema de bombeamento otimizado.

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir da construção do sistema de bombeamento de água, que nesta pesquisa foi entendido como um sistema composto por reservatório inferior, ou manancial, estação elevatória, adutora de água e reservatório superior, podem-se adotar diferentes maneiras de operar esse sistema. A concepção genérica de sistema de bombeamento utilizada nesta pesquisa está apresentada na Figura 4.1.

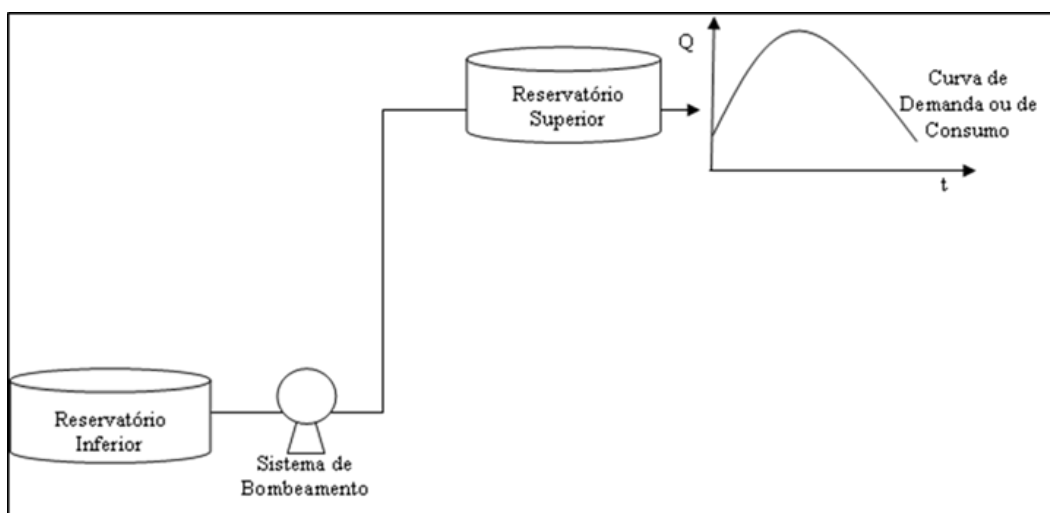


Figura 4.1. Sistema genérico utilizado no estudo de otimização.

O sistema apresentado na Figura 4.1 é similar ao utilizado por Vilanova (2012) que classificou este arranjo como clássico para estação de bombeamento utilizada em sistemas de abastecimento, nos quais se deseja recalcar água de um reservatório localizado em cota topográfica inferior para outro posicionado em uma cota superior. Apesar disso, existem outras configurações possíveis, como, por exemplo, sistemas cujo o bombeamento é feito diretamente na rede e que podem contar ou não com reservatório de jusante, também chamado reservatório

de sobra (Tsutiya, 2006b). Os sistemas similares ao da Figura 4.1, em virtude da presença do reservatório superior, apresentam vantagens como: possibilidade de realizar o bombeamento fora do período de ponta, quando a energia é mais cara, já que a água armazenada no reservatório pode abastecer o consumo durante esse período e, também, a possibilidade de operar o conjunto motobomba com menor variação do ponto de operação (ponto de máximo rendimento) (Tsutiya, 2006b).

Os sistemas de bombeamento apresentam características geométricas que são determinantes para a composição dos custos de instalação e operação do sistema. São elas: altura ou desnível geométrico (Hg), diâmetro (D), comprimento (L) e material da linha adutora, volume do reservatório superior (VR), entre outros. A proposta da pesquisa foi verificar a regra de operação otimizada para várias combinações dessas características, de modo que fosse possível entender quais delas são mais determinantes para a composição dos custos de instalação e operação.

Coelho e Andrade-Campos (2014) afirmam que os sistemas de abastecimento de água são caracterizados por apresentarem variadas possibilidades de dimensionamento, materiais constituintes, formas de operação, entre outras, o que os tornam bastante complexos e, também, com enorme potencial para ações de economia de energia e de aprimoramento da eficiência energética.

As horas de funcionamento dos conjuntos motobomba são diretamente proporcionais aos custos de operação do sistema de abastecimento de água, no entanto, a operação do sistema de bombeamento deve garantir o atendimento à curva de demanda do sistema, ou seja, garantir o atendimento à população, além de ser eficaz no atendimento, precisa também ser eficiente nas questões de consumo de energia e custos de operação e instalação.

Para operar o sistema podem ser utilizados conversores de frequência que permitem variar a vazão bombeada ao longo do dia. Nestes casos, pode-se obter economia de energia e, principalmente, de recursos financeiros para a operação do sistema. A regra de operação deve ser determinada de modo que otimize o sistema de bombeamento com relação à energia consumida. Cabe ressaltar que, apesar de recomendados na literatura técnica da área com inúmeras vantagens, os conversores de frequência não estão presentes na totalidade dos sistemas de bombeamento brasileiros já que podem ser considerados como um custo adicional na instalação do sistema de bombeamento e, por isso, serem suprimidos dos projetos quando, por exemplo, não se consideram os custos de energia envolvidos durante a vida útil dos sistemas.

O algoritmo SCE-UA foi utilizado para determinar a regra de operação otimizada do sistema de bombeamento, ou seja, a variação da vazão ao longo do dia, e o volume do reservatório superior correspondentes ao menor custo de operação e instalação do sistema com determinadas características de: desnível geométrico, diâmetro, comprimento e material da linha adutora, volume do reservatório superior e curva de demanda.

Na Figura 4.2 está demonstrado o desenvolvimento metodológico desta pesquisa de modo esquemático, na forma de fluxograma.

A operação do sistema de bombeamento foi otimizada utilizando o algoritmo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution - University of Arizona*; DUAN et al., 1992). O princípio deste algoritmo foi descrito com detalhes no capítulo 3, no item 3.6.1.

Foi utilizada a versão FORTRAN do algoritmo SCE-UA adaptada e testada por Collischonn e Tucci (2001) que o implementaram para a otimização mono-objetivo de duas funções simples, para compreender o procedimento utilizado no algoritmo, e para a calibração do modelo chuva-vazão IPH2 (TUCCI, 1998) em uma bacia hidrográfica no Estado de Goiás, com vazões sintéticas e reais. Os autores concluíram que o algoritmo SCE-UA foi eficiente para a calibração automática de modelos hidrológicos e recomendaram que fosse incluído como ferramenta de calibração padrão nos modelos hidrológicos chuva – vazão.

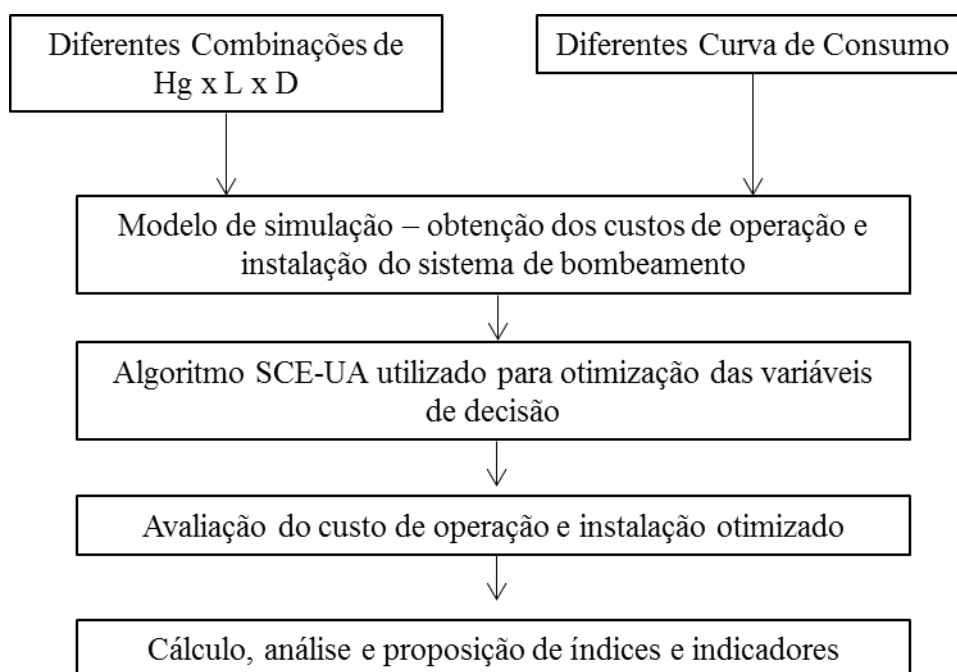


Figura 4.2. Fluxograma geral de metodologia da tese.

A otimização das variáveis de decisão representa a obtenção da regra de operação otimizada para o sistema de bombeamento, ou seja, pode-se dizer que essa é a primeira ação de

eficiência energética proposta nesta pesquisa. Posterior a isso, a partir da ferramenta desenvolvida, podem ser propostas outras ações nessa lógica.

#### 4.2 DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO SISTEMA

Os sistemas de bombeamento de água, encontrados nas diferentes localidades, apresentam características bastante variadas em virtude das especificidades de cada local, do tamanho da população atendida pelo sistema, entre outros. A altura geométrica (Hg), por exemplo, é definida pela topografia e posicionamento dos reservatórios superior e inferior e, em geral, não apresenta possibilidade de modificação. Outras características como diâmetro (D), comprimento (L), traçado e material da linha adutora, potência do conjunto motobomba (Pot), volume do reservatório (VR), entre outras, contudo, podem ser projetadas a partir de critérios de engenharia, buscando, por exemplo, reduzir os custos de implantação e/ou operação.

No intuito de desenvolver uma metodologia para análise geral da eficiência hidroenergética de sistemas de bombeamento e atingir aos outros objetivos desta pesquisa, descritos no capítulo 2, utilizou-se para o sistema genérico, apresentado na Figura 4.1, diversas variações de tamanho para algumas das características como: altura geométrica, comprimento e diâmetro da linha adutora. Os valores adotados para cada uma dessas características estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Variação de dimensionamento do sistema genérico utilizado na pesquisa.

Grandeza	Valores adotados									
Altura geométrica – Hg (m)	10	25	50	100						
Diâmetro – D (mm)	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
Comprimento – L (m)	100	500	1.000	5.000						
Coefficiente de Rugosidade – C	130	105								

Os nove valores apresentados para variação de diâmetro (100 a 500 mm) foram utilizados em conjuntos de seis valores por vez, em função do consumo diário de água utilizado na otimização, conforme apresentado na Tabela 4.2. As curvas e seus respectivos consumos estão descritos em detalhe no próximo item.

A partir da combinação das variáveis apresentadas na Tabela 4.1, foram obtidas 96 possibilidades geométricas para o sistema genérico (4Hg x 6D x 4L x 1C). O arquivo com essas combinações, exemplificado na Figura 4.3, foi um dos arquivos de entrada do algoritmo SCE-UA onde cada uma das 96 possibilidades teve a operação otimizada.

Tabela 4.2. Diâmetros adotados para cada valor de consumo diário.

Consumo (m <sup>3</sup> /d)	Diâmetros (mm)					
755	100	150	200	250	300	350
1.231	100	150	200	250	300	350
1.511	100	150	200	250	300	350
2.463	100	150	200	250	300	350
3.777	200	250	300	350	400	450
6.157	200	250	300	350	400	450
7.555	250	300	350	400	450	500
12.315	250	300	350	400	450	500

O coeficiente de rugosidade da fórmula da Hazen-Williams também foi inserido no arquivo das combinações. Este coeficiente foi fixado em 130, por ser o valor encontrado na literatura da área para tubulações de ferro fundido revestido de concreto, pois este material foi utilizado na análise dos custos de instalação realizada na pesquisa. Também foram feitas simulações para o fim do horizonte de projeto, quando o coeficiente de rugosidade C foi modificado para 105. Este cenário está descrito com maior detalhamento no item 4.4.

Apesar de existirem outras formulas que permitem calcular a perda de carga linear em uma tubulação, a fórmula de Hazen-Williams é uma das mais utilizadas em função de sua simplicidade (GOMES e CARVALHO, 2012).

Hg	L	D	C
10.00	100.00	100.00	130.00
10.00	100.00	150.00	130.00
10.00	100.00	200.00	130.00
10.00	100.00	250.00	130.00
10.00	100.00	300.00	130.00
10.00	100.00	350.00	130.00
10.00	500.00	100.00	130.00
10.00	500.00	150.00	130.00
10.00	500.00	200.00	130.00
10.00	500.00	250.00	130.00
10.00	500.00	300.00	130.00
10.00	500.00	350.00	130.00
10.00	1000.00	100.00	130.00
10.00	1000.00	150.00	130.00
10.00	1000.00	200.00	130.00
10.00	1000.00	250.00	130.00
10.00	1000.00	300.00	130.00
10.00	1000.00	350.00	130.00
10.00	5000.00	100.00	130.00
10.00	5000.00	150.00	130.00
10.00	5000.00	200.00	130.00
10.00	5000.00	250.00	130.00
10.00	5000.00	300.00	130.00
10.00	5000.00	350.00	130.00
25.00	100.00	100.00	130.00
25.00	100.00	150.00	130.00
25.00	100.00	200.00	130.00
25.00	100.00	250.00	130.00
25.00	100.00	300.00	130.00
25.00	100.00	350.00	130.00

Figura 4.3. Exemplo de arquivo com as combinações de altura geométrica, comprimento e diâmetro inserido como arquivo de entrada no algoritmo SCE-UA.

Existem, na prática, infinitas combinações de dimensionamento que poderiam ser testadas. Segundo Cabrera et al. (2010), do ponto de vista energético, cada sistema é diferente; as redes podem ser planas ou montanhosas; os mananciais elevados (possibilitando adução por gravidade) ou baixos (exigindo bombeamento), ou ainda, subterrâneos. Tais fatores dificultam a comparação consistente entre sistemas, do ponto de vista exclusivamente hidráulico e energético. Além disso, os sistemas de abastecimento reais podem ter adutoras muito maiores que 5.000 metros de comprimento e/ou 500 milímetros de diâmetro. No entanto, havia necessidade de serem definidas delimitações metodológicas para a pesquisa e os valores adotados foram considerados suficientes para atender aos objetivos propostos.

### 4.3 CURVAS DE CONSUMO

O consumo de água diário do reservatório superior representa a vazão total que deve ser fornecida pelo sistema de bombeamento. Nesta pesquisa foram utilizados três diferentes formatos de curva de consumo:



- o primeiro (Figura 4.4) obtido junto ao setor de Gerência de Projetos e Obras do Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) do município de Porto Alegre;
- o segundo (Figura 4.5) obtido por meio de medições de campo da Rede Lenhs realizadas no município de Ananindeua, estado do Pará, em 2014;
- o terceiro (Figura 4.6) obtido por meio de medições de campo da Rede Lenhs realizadas no Campus do Vale, na UFRGS, em 2013.

O estudo de curvas distintas teve por objetivo permitir uma maior generalização dos resultados, pois as curvas de consumo das cidades dependem de fatores variados (hábitos culturais, tipo de serviços atendidos, etc). Além disso, permitiu validar os resultados obtidos já que, se tivesse sido utilizada apenas uma (um único formato), poderiam haver dúvidas quanto a aplicação dos resultados em sistema distintos ao estudado na pesquisa.

Os valores para o consumo, apresentados nas figuras, foram tornados adimensionais a partir do consumo máximo ( $Con_{max}$ ). Também estão apresentados os valores para o consumo médio adimensional ( $Con_{med}$ ) de cada curva. Ainda, foi calculado um índice para identificar a curva de consumo, denominado fator de consumo (FC), dado pela relação entre o consumo médio ( $Con_{med}$ ) e o consumo máximo ( $Con_{max}$ ), da curva utilizada. Esse índice é o inverso do  $k_2$  (coeficiente da hora de maior consumo) utilizado na determinação da vazão de projeto de sistemas de abastecimento de água.

A primeira curva apresenta crescimento do consumo a partir das 5 horas e pico de consumo às 18 horas. Há uma variação mediana entre a vazão máxima e a vazão média da curva de consumo.

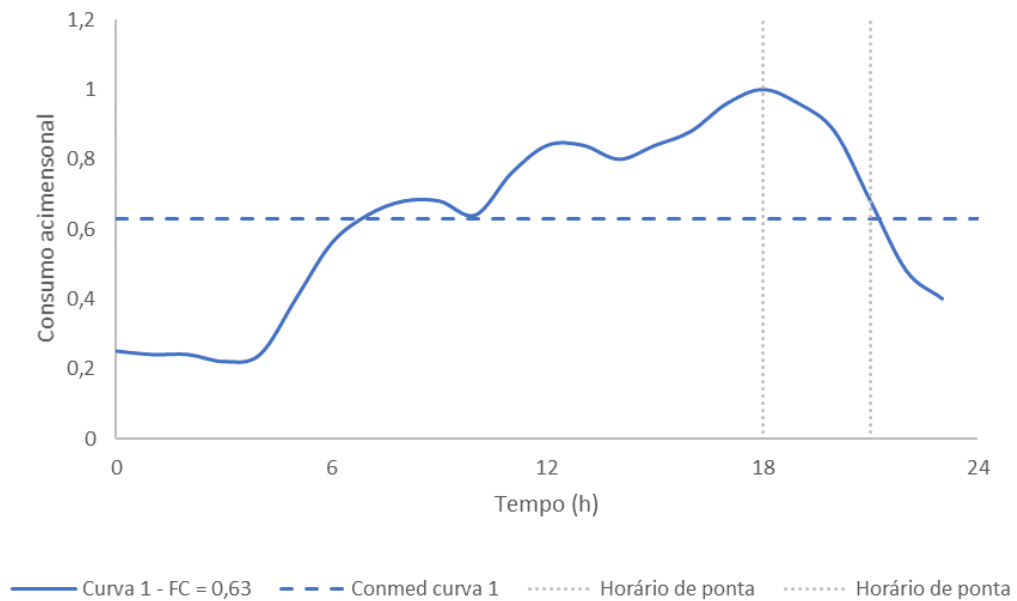


Figura 4.4. Curva de consumo 1 – adimensional; FC = 0,63, obtida junto ao DMAE.

A segunda curva foi medida num sistema de bombeamento da cidade de Ananindeua, Pará. Em relação à curva 1, essa curva apresenta menor variação entre a vazão máxima e a vazão média, o consumo de pico ocorre às 12 horas, contudo, entre as 6 e as 22 horas o consumo não apresenta variação expressiva em relação ao consumo de pico.

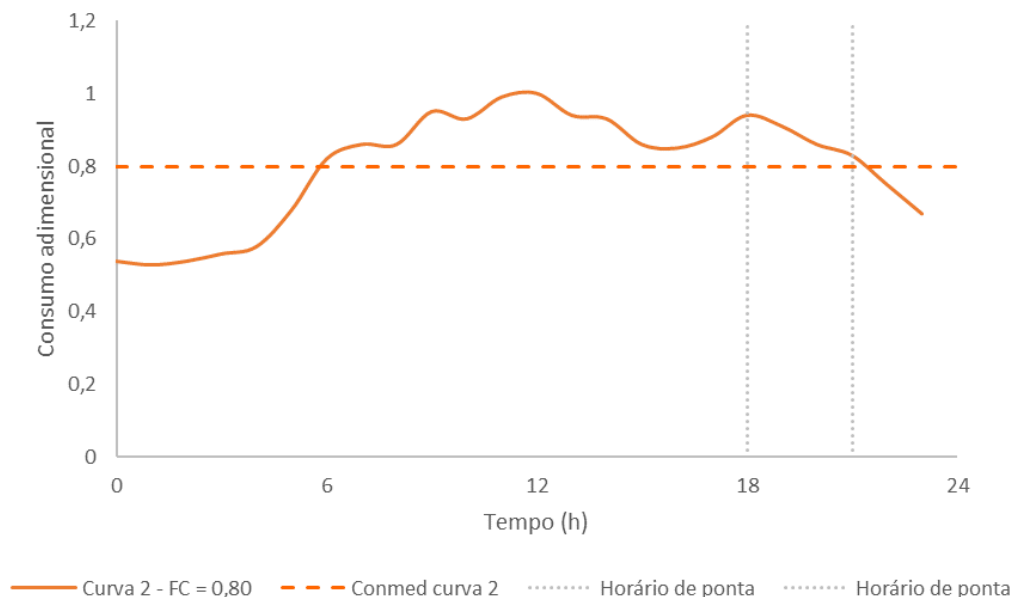


Figura 4.5. Curva de consumo 2 – adimensional, FC = 0,80, obtida por meio de medições realizadas em Ananindeua (Pará).

A terceira curva foi medida no sistema de bombeamento do Campus do Vale, UFRGS, em Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Por ser um sistema de abastecimento de um campus

universitário, a maior parcela do consumo ocorre durante os turnos matutino e vespertino, ou seja, entre as 6 e as 18 horas. O consumo de pico é bastante pronunciado e ocorre às 12 horas.

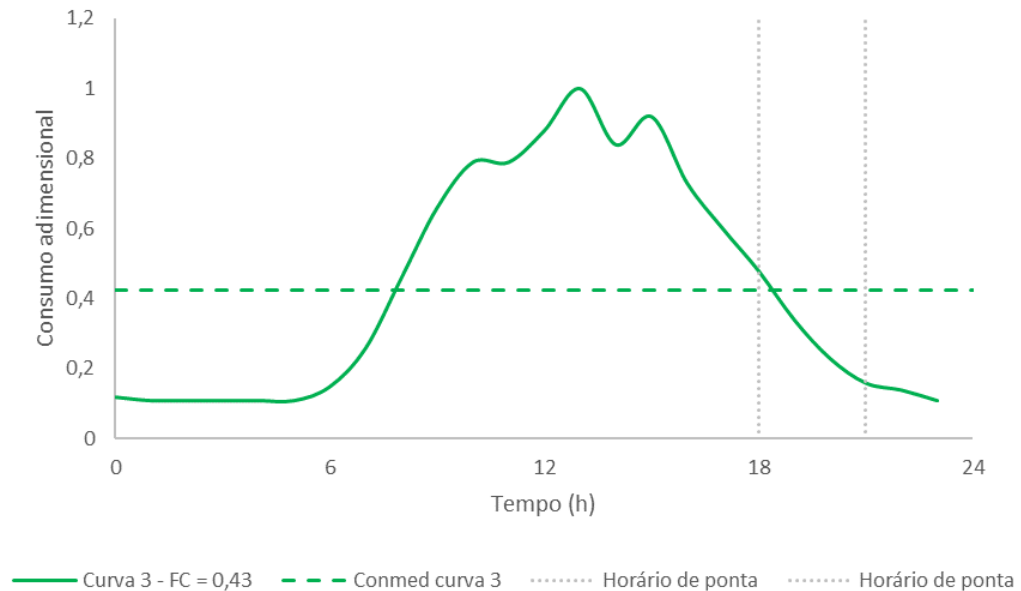


Figura 4.6. Curva de consumo 3 – adimensional; FC = 0,43, obtida por meio de medições realizadas no Campus do Vale, UFRGS.

Os valores adimensionais das curvas foram transformados em consumo ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) por meio da multiplicação desses por quatro valores distintos de consumo máximo, logo, as curvas adimensionais transformaram-se em curvas de consumo. Por consequência, para cada curva, foram obtidos quatro volumes de consumo diários ( $\text{m}^3/\text{d}$ ). Assim, pode-se dizer que foram analisadas doze diferentes curvas de consumo (3 formatos x 4 volumes) conforme apresentado na Tabela 4.3.

De modo a demonstrar a representatividade das curvas de consumo avaliadas, foi calculada a população que poderia ser atendida por um sistema de bombeamento cujos volumes bombeados por dia fossem análogos aos utilizados nesta pesquisa. Para tanto, utilizou-se a equação (17).

$$Pop = \frac{V}{C_{pop} \times k_1} \quad (17)$$

Onde:

Pop: população atendida, em habitantes;

V: volume bombeado, em  $\text{m}^3/\text{d}$ ;

$C_{pop}$ : consumo per capita, adotado como  $0,2\text{m}^3/\text{hab}/\text{d}$ ;

$k_1$ : coeficiente do dia de maior consumo, adotado como 1,2;

As populações supostamente atendidas pelos sistemas de bombeamento avaliados na pesquisa foram calculadas sem considerar as perdas de água que podem ocorrer durante a distribuição de água.

Tabela 4.3. Características das curvas de consumo utilizadas na pesquisa, vazão máxima e volume de consumo diário no ano 0.

Características	Valores adotados para o ano 0			
Curva 1				
Fator de Consumo (FC)	0,63	0,63	0,63	0,63
Consumo máximo (m <sup>3</sup> /h)	50,0	100,0	250,0	500,0
Volume consumido (m <sup>3</sup> /d)	755	1.511	3.777	7.555
População	2.296	4.595	11.487	22.977
Curva 2				
Fator de Consumo (FC)	0,80	0,80	0,80	0,80
Consumo máximo (m <sup>3</sup> /h)	39,2	78,5	196,1	392,3
Volume consumido (m <sup>3</sup> /d)	755	1.511	3.777	7.555
População	2.296	4.595	11.487	22.977
Curva 3				
Fator de Consumo (FC)	0,43	0,43	0,43	0,43
Consumo máximo (m <sup>3</sup> /h)	74,0	148,0	370,0	740,0
Volume consumido (m <sup>3</sup> /d)	755	1.511	3.777	7.555
População	2.296	4.595	11.487	22.977

Observa-se que os quatro volumes utilizados na pesquisa atenderiam a populações bastante variadas, de 2 mil a 23 mil habitantes, aproximadamente. Para enfatizar a representatividade desses valores frente aos municípios brasileiros, uma consulta ao censo de 2010, do IBGE, verificou que 50% dos municípios apresentava população até 10.904 habitantes, ou seja, as populações supostamente atendidas pelos sistemas de bombeamento avaliados na pesquisa apresentam boa representatividade frente ao cenário dos municípios brasileiros que, em sua maior parte, são de pequeno porte. A Figura 4.7 apresenta a população dos municípios brasileiros na forma de uma curva de frequência acumulada.

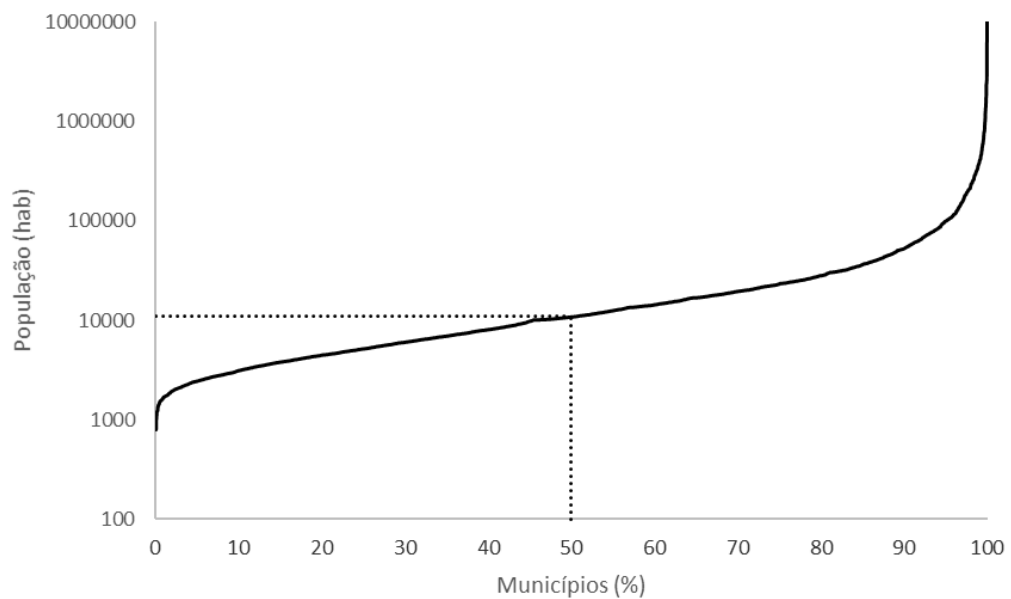


Figura 4.7. Frequência acumulada da população dos municípios brasileiros.  
(Fonte: IBGE, 2010).

Ainda, cabe ressaltar que os sistemas de bombeamento, em geral, não são projetados para atender a totalidade da população de um município. Usualmente, os sistemas são divididos em setores de abastecimento, definidos a partir do conhecimento das condições topográficas e do perfil dos consumidores da área a ser atendida. Em Porto Alegre, por exemplo, o Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) abastece aproximadamente 1,5 milhões de pessoas por meio de 7 sistemas distintos que possuem, ao todo, 96 estações elevatórias de água tratada (DMAE, 2010).

#### 4.4 CRESCIMENTO DO CONSUMO E ENVELHECIMENTO DA TUBULAÇÃO

Na concepção de projetos de sistemas de bombeamento de água é preciso levar em consideração o crescimento populacional, o crescimento do consumo e, também, o envelhecimento da tubulação. Os dados apresentados na Tabela 4.3 e o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams igual a 130 são, portanto, para o ano 0.

Nesta pesquisa, foi considerado um horizonte de projeto de 20 anos. Gomes (2009) explica que, no Brasil, os sistemas de abastecimento de água, desde a captação até as ligações prediais, têm sido projetados com alcance que variam de 10 a 30 anos, e que isso depende de vários fatores.

O crescimento do consumo ao longo do alcance de projeto depende do crescimento populacional e da variação dos hábitos da população, que pode levar ao maior consumo per capita. Gomes (2009) apresenta uma metodologia detalhada para quantificar a necessidade de

água requerida ao longo do alcance de projeto. Para a abordagem proposta nesta pesquisa essa quantificação foi feita de modo simplificado, considerou-se um crescimento de 2,5% ao ano, ao longo do horizonte de projeto, o que levou aos valores de vazão máxima e volume apresentados na Tabela 4.4. Esse valor de crescimento foi adotado para que atenda as considerações feitas para a operação do sistema de bombeamento onde foi considerada que a vazão nominal da bomba deve abastecer o sistema durante todo o horizonte de projeto (sem substituição) e respeitar os limites de variação de vazão determinados pelo limite de variação da rotação (entre 50 a 120%, conforme ABNT, 1989).

Tabela 4.4. Características das curvas de consumo utilizadas na pesquisa, vazão máxima e volume de consumo diário no ano 20.

Características	Valores adotados para o ano 20			
Curva 1				
Fator de Consumo (FC)	0,63	0,63	0,63	0,63
Consumo máximo (m <sup>3</sup> /h)	81,5	163	407,5	815
Volume consumido (m <sup>3</sup> /d)	1.231	2.463	6.157	12.315
Curva 2				
Fator de Consumo (FC)	0,80	0,80	0,80	0,80
Consumo máximo (m <sup>3</sup> /h)	63,9	127,9	319,6	639,4
Volume consumido (m <sup>3</sup> /d)	1.231	2.463	6.157	12.315
Curva 3				
Fator de Consumo (FC)	0,43	0,43	0,43	0,43
Consumo máximo (m <sup>3</sup> /h)	120,6	241,2	603,1	1206,2
Volume consumido (m <sup>3</sup> /d)	1.231	2.463	6.157	12.315

Já para o coeficiente de rugosidade (C) foi adotado o valor de 105 para o ano 20, valor consoante ao proposto por Azevedo Netto et al. (1998) para tubulações de ferro fundido com esse tempo de uso.

Toda a otimização da regra de operação, análise de custo e de indicadores foram realizados, então, para as duas situações, ano 0 e ano 20. Adotou-se que, durante esse horizonte, o crescimento e o envelhecimento foram lineares, logo, ao analisar o início e o fim do projeto, foram contemplados os anos intermediários.

#### 4.5 RENDIMENTO DOS CONJUNTOS MOTOBOMBA

O rendimento global de um conjunto motobomba é o produto entre o rendimento do motor e da bomba. Para as bombas, os rendimentos geralmente são apresentados junto com a curva da bomba em catálogos de fabricantes. É importante a adoção de critérios ao estimar o rendimento da bomba durante os projetos de sistemas de bombeamento já que se trata de uma das grandezas com maior relevância para o consumo energético do sistema.

Para calcular o rendimento da bomba, foi desenvolvida uma metodologia para relacionar o rendimento com a velocidade de rotação específica e que permitisse calcular o rendimento da bomba. Esta metodologia foi apresentada por Kuritza et al. (2017).

#### 4.5.1 Metodologia para estimar o rendimento da bomba

A partir de curvas de bomba encontradas em catálogos de quatro fabricantes distintos foram coletados os dados de vazão de bombeamento, altura manométrica e rendimento para o ponto cujo rendimento apresentava valor máximo. Foram analisadas 538 modelos de bombas de quatro fabricantes. As bombas centrífugas de três fabricantes são de execução horizontal, estágio único, sucção simples horizontal com rotor radial e fechado, as bombas do outro fabricante possuem rotor aberto e semiaberto. Todas são indicadas para o bombeamento de água e outros líquidos, limpos e turvos.

Gomes (2009) apresenta curvas que relacionam o rendimento com a velocidade de rotação específica e a vazão bombeada, no entanto, não apresenta uma equação que permita calcular o rendimento para cada caso. Obter esta equação foi um dos objetivos da metodologia proposta por Kuritza et al. (2017).

Para cada uma das 538 bombas analisadas foi calculada a velocidade de rotação específica ( $N_s$ ) por meio da equação (18). O rendimento obtido para cada ponto ( $H_m \times Q$ ) e, por conseguinte, para cada  $N_s$ , está apresentado na Figura 4.8.

$$N_s = \frac{N \times \sqrt{Q}}{H_m^{3/4}} \quad (18)$$

Onde:

$N_s$ : velocidade de rotação específica, em RPM;

$N$ : rotação nominal, em RPM;

$Q$ : vazão, em  $m^3/s$ ;

$H_m$ : altura manométrica, em m.

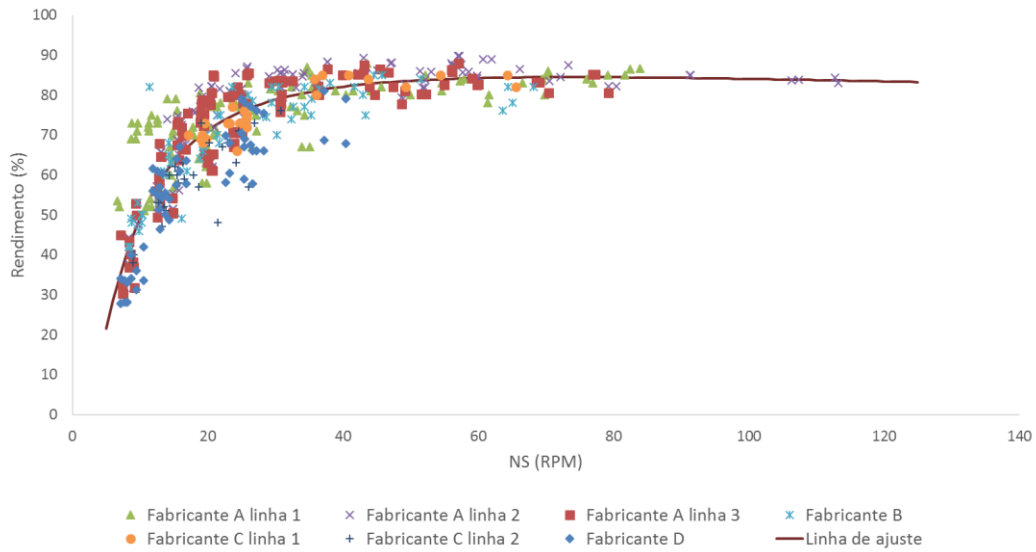


Figura 4.8. Rendimento expresso em função da velocidade de rotação específica.

(Fonte: Kuritza et al. 2017).

A partir dos dados coletados, foi determinada uma equação de ajuste de curvas (19), com coeficiente de determinação igual a 0,8782, conforme linha de ajuste mostrada na Figura 4.8.

$$\eta_{bomba} = e^{5,092 \frac{9,121}{Ns} - 0,124 \ln(Ns)} \quad (19)$$

Onde

$\eta_{bomba}$  = rendimento da bomba (%);

$Ns$  = velocidade de rotação específica, em RPM.

A partir da Figura 4.8 pode-se observar que há tendência de aumento do rendimento com o aumento da velocidade de rotação específica de bombas centrífugas. Para baixas velocidades de rotação específicas (menor que 30 RPM), os rendimentos das bombas apresentam valores que variam entre 20% e 80%. Para  $Ns$  entre 40 e 120 RPM, os rendimentos se mantiveram mais estáveis com valor próximo a 80%.

#### 4.5.2 Metodologia para correção do rendimento para as demais vazões

Como a abordagem estudada nesta pesquisa representa a operação do sistema com uso de conversor de frequência, a vazão bombeada varia ao longo do dia, logo, o rendimento também. Foi preciso estabelecer uma relação entre o rendimento obtido para vazão nominal, utilizada para cálculo da velocidade de rotação específica e do rendimento, e o rendimento nas demais vazões que são bombeadas ao longo de um dia de operação e de toda a vida útil do sistema.



Coelho e Andrade-Campos (2016) propuseram uma metodologia para estimar o comportamento do rendimento de uma bomba operada com conversor de frequência. A equação (20), estabelecida pelos autores, foi utilizada para calcular a variação do rendimento ao longo de um dia de operação.

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \left( \frac{N_2}{N_1} - 1 \right)^3 + 1 \quad (20)$$

Onde:

$\eta_1$  = rendimento nominal;

$\eta_2$  = rendimento ajustado para rotação modificada;

$N_1$  = rotação nominal, em RPM;

$N_2$  = rotação modificada pelo conversor de frequência, em RPM.

#### 4.5.3 Metodologia para estimar o rendimento do motor

De acordo com a tabela de potência e rendimentos para motores elétricos trifásicos de um fabricante reconhecido no mercado brasileiro (INMETRO, 2002), realizou-se um procedimento semelhante ao realizado para a estimativa de rendimentos de bombas centrífugas e, a partir disso, foi ajustada uma equação de rendimento do motor em função de sua potência. A Figura 4.9 mostra os rendimentos em função da potência, a equação (21) representa o ajuste destes dados e permite estimar o rendimento do motor.

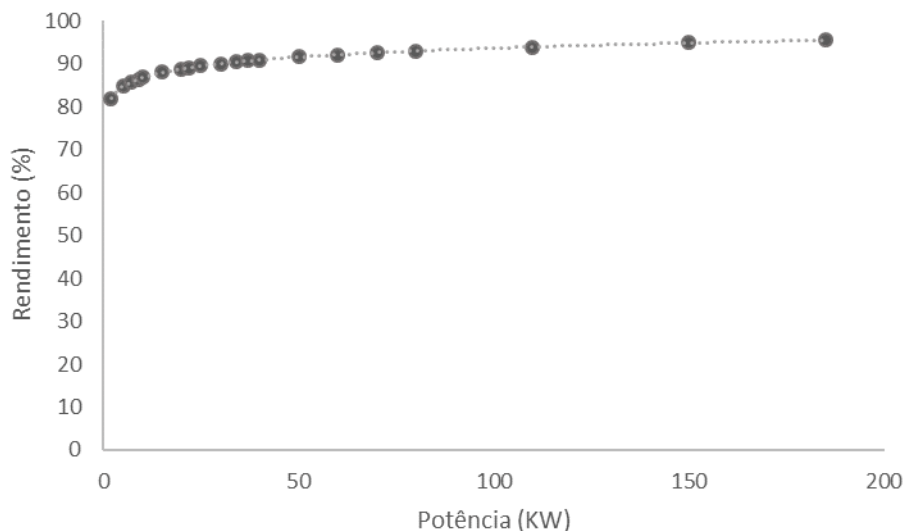


Figura 4.9. Curva de ajuste da variação do rendimento do motor com a potência.

(Fonte: Adaptado de INMETRO, 2002).

$$\eta_{motor} = 2,9899 \ln(Pot_{mot}) + 79,921 \quad (21)$$

Onde:

$\eta_{motor}$  = rendimento (%);

$Pot_{mot}$  = potência do motor, em kW.

#### 4.6 CUSTO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

O custo dispendido para a operação de um sistema de bombeamento é dividido em duas parcelas, consumo e demanda. A tarifa de consumo é o preço cobrado por unidade de energia consumida, expressa em R\$/kWh. Já a tarifa de demanda, expressa em R\$/kW, depende da potência instalada, apresenta valor fixo e deve ser contratada junto a concessionária de energia.

Os custos de consumo e demanda variam para as diferentes modalidades tarifárias que podem ser contratadas. Além desses, fazem parte da composição do preço as alíquotas de ICMS, PIS e COFINS. Nesta pesquisa, foi escolhida como modalidade tarifária a horo-sazonal verde, já que, segundo Coura (2007), essa tarifa pode ser vantajosa para unidades consumidoras cujo consumo e demanda são nulos ou muito baixo durante o horário de ponta e, também, porque o processo de otimização da operação do sistema de bombeamento buscou desligar ou diminuir o bombeamento durante o período de tarifação diferenciada.

Os valores utilizados para tarifa foram os vigentes a partir de 25 de outubro de 2015, segundo a Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE), e estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Tarifas de consumo de energia, demanda na modalidade horo-sazonal verde e alíquota ICMS.

Modalidade Tarifária Horária Verde		A4 (13,8/25kV)
Demanda	R\$/kW	9,15
Consumo Ponta	R\$/kWh	1,03767
Consumo Fora de Ponta	R\$/kWh	0,33274
Alíquota de ICMS	Residencial (acima de 50 kWh), Comercial, Poderes Públicos, Serviços Públicos, Rural	30%

(Fonte: CEEE, 2016).

As alíquotas de PIS e COFINS têm variação mensal. Os valores médios para 2016, entre janeiro e dezembro, foram de 0,9856% e 4,8303% para PIS e COFINS, respectivamente.

As equações (22) e (23) apresentam a composição do preço a ser aplicado para cada mês de operação do sistema.

$$Custo = (CP \times ConsumoP) + (CFP \times ConsumoFP) + (Dem \times Pot) \quad (22)$$

Onde:

Custo: custo mensal de operação, sem impostos;

CP: tarifa de consumo na ponta, em R\$/kWh;

ConsumoP: energia consumida na ponta, em kWh/mês

CFP: tarifa de consumo fora da ponta, em R\$/kWh;

ConsumoFP: energia consumida fora da ponta, em kWh/mês;

Dem: tarifa de demanda, em R\$/kW;

Pot: potência contratada, em kW.

$$\text{PreçoFinal} = \frac{\text{Custo}}{(1 - \text{PIS} - \text{COFINS} - \text{ICMS})} \quad (23)$$

Onde:

Preço Final: valor a ser pago por mês, com impostos.

Primeiramente foi programado o cálculo do custo de operação para um dia. Este valor foi extrapolado para o mês, observando que o período de ponta não existe no final de semana.

Os custos de operação incidem em tempo distinto aos custos de instalação, portanto, para que possam ser somados, deve-se calcular o valor presente (atualizado) do custo de operação e somar ao custo de instalação para compor o custo total.

Para calcular o valor presente dos custos de operação, ao longo dos 20 anos de alcance do projeto, foi utilizado o Fator de Atualização (Fa) dado pela equação (11), apresentada no item 3.3. Este fator é indicado quando é preciso levar em consideração, além da taxa de juros, a taxa de aumento de energia. Foram utilizados os valores de 9% e 10%, sugeridos por Gomes (2009), para as taxas de aumento anual de energia e de juro, respectivamente.

#### 4.7 CUSTO DE INSTALAÇÃO DO SISTEMA

Os custos de instalação dizem respeito à aquisição dos equipamentos das instalações hidráulicas, tubulações, válvulas, equipamentos elétricos, bombas, entre outros, juntamente aos demais gastos de implantação do sistema como obras civis de escavação e montagem.

Para composição dos custos de instalação realizou-se levantamento junto às companhias de saneamento como, por exemplo, o DMAE, de Porto Alegre, RS, publicações variadas como o plano municipal de saneamento básico de Joinville, SC, e ainda, empresas atuantes no mercado de bombas e outros equipamentos de saneamento como a Maquimotor – Comercial e Técnica Ltda, de Porto Alegre, RS.

##### 4.7.1 Custo de implantação das linhas adutoras

Os custos de implantação da linha adutora são referentes ao preço da tubulação em ferro fundido dúctil da classe K7, com junta JGS, obtidos junto a empresa Maquimotor, Comercial e

Técnica LTDA e também aos custos da tubulação, somado ao valor de assentamento, obtidos junto ao setor de Gerência de Projetos e Obras do DMAE. Esses custos estão expostos na Tabela 4.6 e representados graficamente na Figura 4.10.

Tabela 4.6. Custos por metro de tubulação em ferro dúctil (classe K7 e junta JGS) e custo da tubulação com assentamento.

Diâmetro (mm)	Custo tubulação (R\$/m)	Custo tubulação com assentamento (R\$/m)
150	144,36	249,81
200	176,69	314,71
250	217,65	397,45
300	261,82	483,69
350	306,14	569,59
400	348,69	644,5
500	464,89	847,94
600	618,09	1104,72
700	918,34	1773,69
800	1109,97	2150,75
900	1267,8	2453,02
1.000	1470,14	2844,68

(Fonte: Maquimotor, 2016 e DMAE, 2016).

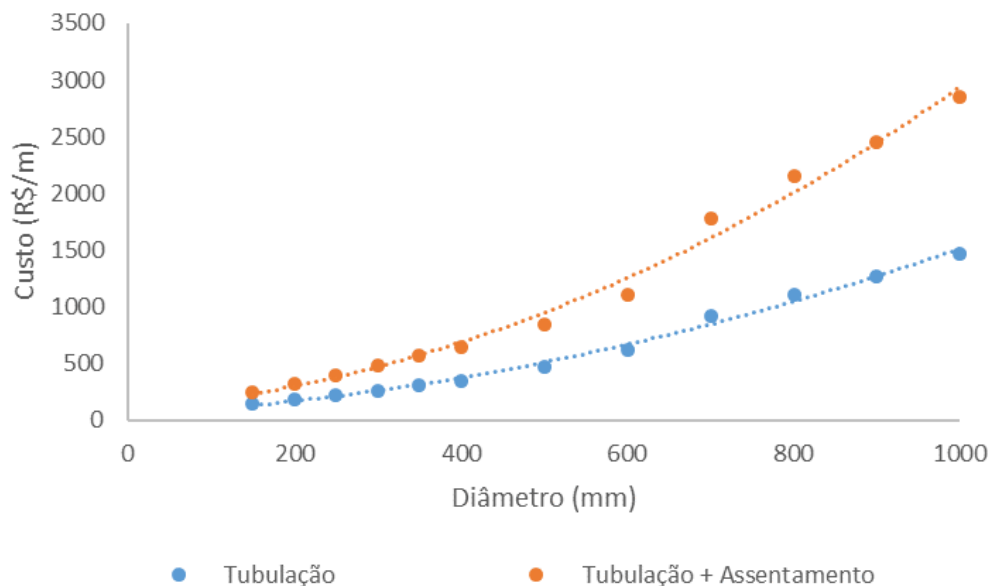


Figura 4.10. Custo da tubulação e da tubulação com assentamento.

(Fonte: Maquimotor, 2016 e DMAE, 2016).

A partir dos dados relativos ao custo da tubulação somado ao assentamento foi obtida a equação (24), que possibilitou o cálculo desse custo para ser inserida no modelo utilizado para determinação da regra de operação.

$$C_{adutora} = 0,0023L^2 + 0,5306L + 94,999 \quad (24)$$

Onde:

$C_{adutora}$  = custo de implantação da tubulação, em R\$/m;

L = comprimento da adutora, em metros (m).

#### 4.7.2 Custo de implantação de reservatórios

A implantação de reservatórios envolve os custos com escavações, obras civis, material estrutural, entre outros. O volume total de reservação deve atender à demanda do dia e também às situações de emergência, como incêndios. O volume total foi definido como o maior valor para o volume, dentre os 23 valores gerados na otimização, acrescido de 20%, que representa o volume de emergência. Para cálculo do custo de implantação do reservatório foi utilizada a equação (25), obtida a partir das informações apresentadas na Tabela 4.7 e representadas graficamente na Figura 4.11.

Tabela 4.7. Custo de implantação de reservatórios.

Volume (m <sup>3</sup> )	Custo (R\$)
100	92.318,90
200	130.558,64
300	159.901,03
400	184.637,80
500	206.431,34
600	226.134,20
700	244.252,85
800	261.117,28
900	276.956,70
1000	291.938,00

(Fonte: Gomes, 2016)

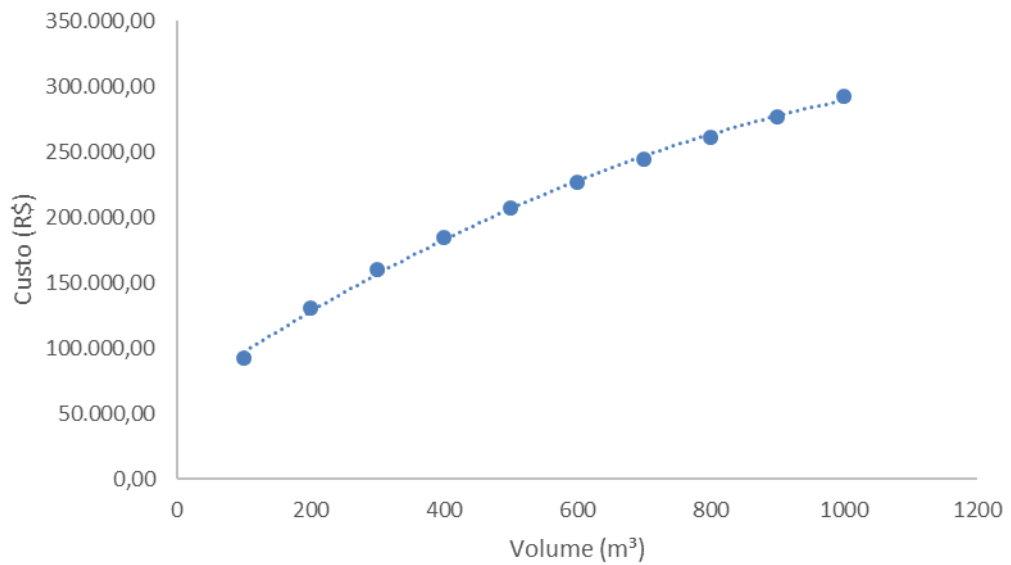


Figura 4.11. Custo de implantação do reservatório.

$$C_{\text{reservatório}} = -0,1202V^2 + 345,94V + 63443 \quad (25)$$

Onde:

$C_{\text{reservatório}}$  = custo de implantação do reservatório, em R\$;

$V$  = volume total do reservatório, em  $m^3$ .

#### 4.7.3 Custo de implantação da estação elevatória

Para cálculo do custo de implantação do grupo motobomba foi utilizada a equação (26), obtida a partir das informações apresentadas na Tabela 4.8, representadas graficamente na Figura 4.12.

Tabela 4.8. Custo de implantação do conjunto motobomba.

Potência instalada (kW)	Custo (R\$)	Potência instalada (kW)	Custo (R\$)
1,23	6.706,09	8,00	10.206,53
1,92	6.214,95	8,85	10.419,99
1,96	8.253,70	11,11	11.204,10
2,45	7.044,13	11,79	16.605,44
2,52	29.624,08	12,74	18.645,04
2,84	9.284,02	14,86	11.660,29
2,96	6.998,77	19,06	18.307,90
3,86	9.733,79	21,23	25.908,12
4,49	9.020,56	21,98	17.643,27
4,53	10.420,19	30,49	28.353,24
4,81	8.181,93	32,67	28.497,24
4,94	10.002,27	55,53	33.526,04
6,10	11.955,66	88,47	64.591,81
7,35	11.955,66	103,44	86.800,68
7,62	10.420,19		

(Fonte: Maquimotor, 2016).

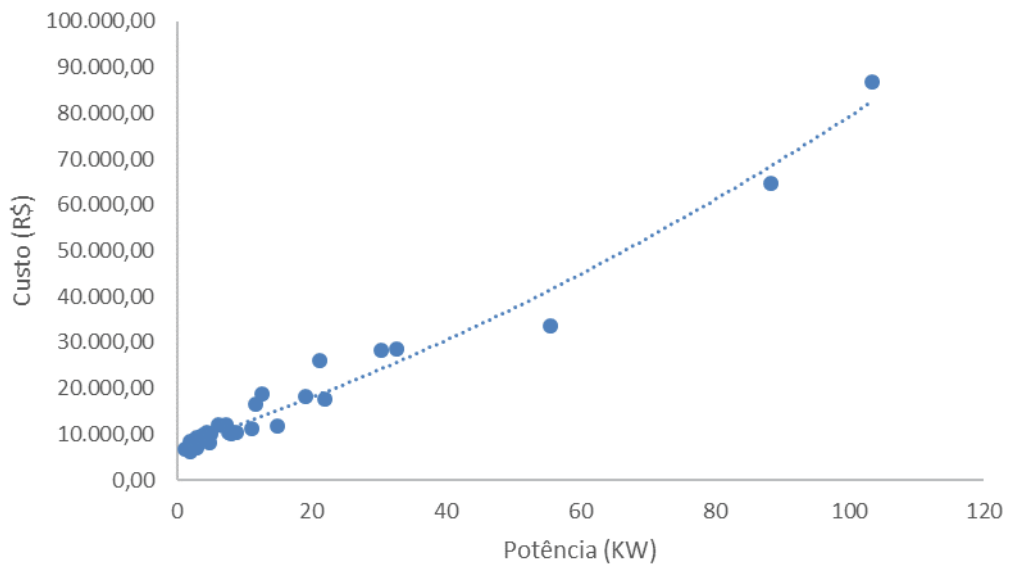


Figura 4.12. Custo de implantação do conjunto motobomba.

$$C_{bomba} = 3,1688Pot^2 + 388,55Pot + 9022,1 \quad (26)$$

Onde:

$C_{bomba}$  = Custo de implantação do conjunto motobomba, em R\$;

Pot = potência instalada, em kW.

#### 4.8 DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA REGRA DE OPERAÇÃO

O processo de otimização para cada combinação das características do sistema (96 combinações) foi executado de modo que foi obtida a regra de operação do sistema de bombeamento de água, com velocidade de rotação variável, por meio de conversor de frequência. Os conversores de frequência permitem que a vazão bombeada varie ao longo do dia, sem comprometer o desempenho das bombas em termos de rendimento.

O algoritmo de otimização SCE-UA foi utilizado para minimizar a função-objetivo dada pela soma do custo de instalação ao custo de operação do sistema. Dois arquivos de entrada foram inseridos no programa, um com as características geométricas de dimensionamento do sistema (Figura 4.3, página 63) e outro com a curva de consumo do reservatório superior, ambos descritos em itens anteriores.

O algoritmo foi desenvolvido de modo que as variáveis de decisão fossem os valores de volume de água disponíveis no reservatório superior de um sistema de bombeamento de água, a cada intervalo de tempo horário de um dia de operação. O volume inicial foi definido como 5% do volume total consumido por dia de operação, o que representa que o reservatório inicia o dia com um volume mínimo, e o volume final foi definido análogo ao volume inicial, para garantir as mesmas condições iniciais para a operação do próximo dia. A determinação do volume inicial está programada para às 00h00min, ou seja, até que se inicie o consumo, há tempo para hábil para o enchimento reservatório. Isso é importante pois, usualmente, os sistemas de abastecimento são operados de modo que o reservatório esteja cheio quando se inicia o consumo (próximo as 06h00min).

Dessa forma, o algoritmo foi programado para obter os valores otimizados de 23 variáveis de decisão, suficientes para descrever a operação de 24 horas por dia do sistema de bombeamento.

Em todo o processo de simulação foi considerado que a potência calculada deve ser fornecida por um único conjunto motobomba, ou seja, a operação do sistema de bombeamento segue o esquema de operação (1+1).

O critério de convergência foi definido por meio do número de gerações. Na prática, o algoritmo faz todo o processo para um determinado número de gerações (adotado 1000 neste trabalho) e apresenta o resultado. Foi feita uma avaliação dos resultados da função-objetivo na qual se observou que 1000 gerações eram suficientes para que o algoritmo tivesse convergido e todas as soluções candidatas resultavam num valor de função-objetivo igual ao melhor valor.



Para exemplificar a análise do critério de convergência, a Figura 4.13 apresenta o melhor valor de função-objetivo encontrado em cada geração, sendo possível observar que a função-objetivo não varia a partir da centésima geração. Isso indica que poderia ter sido utilizado um critério de convergência diferente, inferior a 1000 gerações, no entanto, como foram avaliados casos bastante diversificados, adotou-se um critério maior de modo a garantir que fosse suficiente para todas as situações, pois o tempo de processamento ainda se manteve inferior a 0,5 horas.

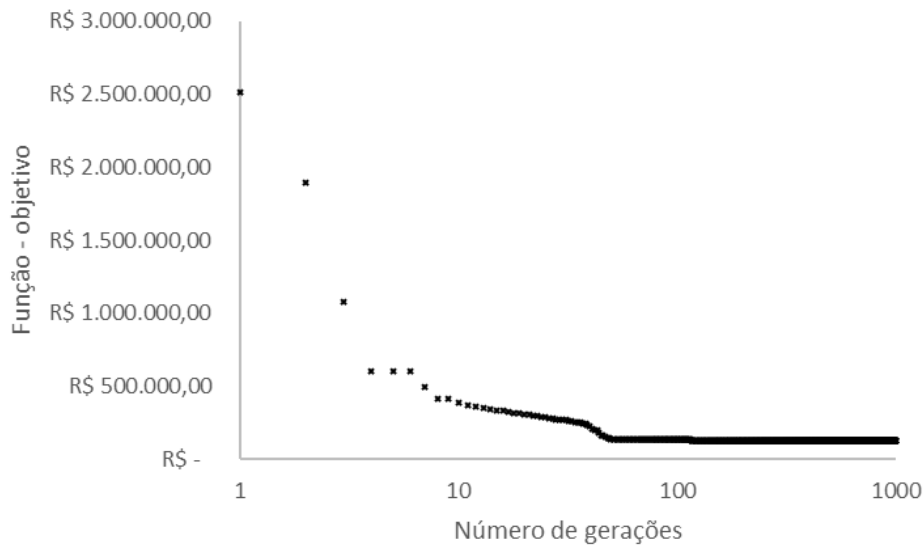


Figura 4.13. Função-objetivo em relação ao número de geração para determinar o critério de convergência do algoritmo SCE-UA.

Além do número de gerações ou ciclos até a parada, outros parâmetros precisaram ser definidos, como: 15 complexos ( $p$ ), 50 pontos em cada complexo ( $m$ ), o que levou a população ( $s$ ) ter 750 pontos.

Para o cálculo da função-objetivo foram seguidos os passos apresentados na Figura 4.14.

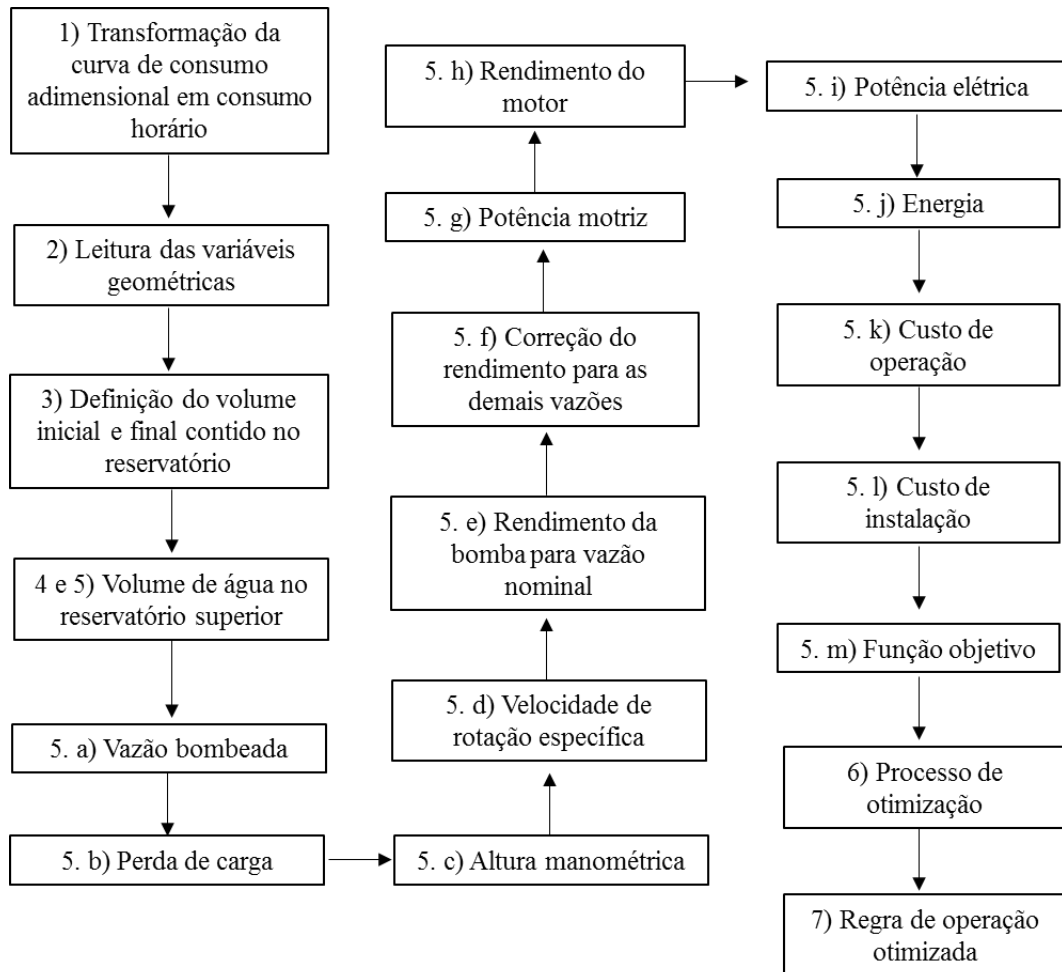


Figura 4.14. Fluxograma para cálculo da função-objetivo

Os passos apresentados no fluxograma são descritos abaixo, para melhor compreensão:

- 1 Cálculo da curva de demanda do reservatório superior: o algoritmo fez a leitura dos valores adimensionais da curva de consumo e calculou os valores de vazão horária, a partir da vazão máxima definida para aquela simulação.
- 2 Leitura das diferentes combinações das características geométricas: o processo de otimização foi executado para cada uma das 96 possibilidades de dimensionamento do sistema. Isso permitiu a obtenção da operação de bombeamento otimizada, ou seja, com menor valor de função-objetivo, para cada uma das diferentes configurações estudadas.
- 3 Definição do volume inicial contido no reservatório: para garantir a continuidade da operação do sistema, as condições finais de cada dia de operação devem ser iguais às condições iniciais estabelecidas neste momento. Foi determinado que o reservatório inicia e termina o dia com 5% do volume de consumo total.

- 4 Geração da população inicial: o algoritmo gera, aleatoriamente, a população inicial. Esses valores gerados devem respeitar os limites, inferior e superior, impostos.
- Definição do limite inferior: o limite inferior foi fixado em zero, já que volumes negativos não tem sentido físico. Além disso, foi necessário criar uma restrição para cada um dos 23 valores de volume gerados: definiu-se que cada valor não poderia ser menor que a diferença entre o volume anterior e a demanda nesse intervalo de tempo (caso essa restrição não fosse respeitada a vazão bombeada assumia valores negativos, ou seja, ao invés de o sistema fornecer água ao reservatório teria que retirar água para cumprir o balanço de massa do reservatório no intervalo de tempo).
  - Definição do limite superior: o limite superior foi fixado de modo a corresponder ao volume total consumido em um dia de operação.
- 5 Respeitados os limites inferior e superior, o algoritmo SCE-UA gera a população inicial de soluções candidatas. Cada solução contém 23 valores que representam os volumes de água horários contidos no reservatório superior ao longo de um dia de operação. A partir disso é avaliada a função-objetivo para cada solução candidata.
- Cálculo da vazão bombeada para atender aos volumes gerados com o algoritmo de otimização: a vazão bombeada deve atender o consumo daquela hora e o volume do reservatório superior, ou seja, é calculada a partir do balanço de massa entre o volume aduzido, que entra no reservatório, o volume contido no reservatório superior no intervalo de tempo anterior e o volume consumido no intervalo de tempo. Assim:
    - Para a primeira hora do dia, o volume inicial é fixo e foi definido no passo 3, a vazão bombeada é calculada pela equação (27);
 
$$Q_{(1)} = V_{(1)} - V_{inicial} + V_{consumida(1)} \quad (27)$$
    - Para as demais horas do dia, a vazão é calculada pela equação (28), sendo  $(i) = 2, 3, \dots, 23$ ;
 
$$Q_{(i)} = V_{(i)} - V_{(i-1)} + V_{consumida(i)} \quad (28)$$
    - Para última hora a vazão é obtida por meio da equação (29) e o volume final é fixo e igual ao volume inicial;
 
$$Q_{(24)} = V_{(inicial)} - V_{(23)} + V_{consumida(24)} \quad (29)$$
    - Caso alguma das 24 vazões calculadas apresentasse valor negativo o algoritmo atribuía um valor de penalidade à função-objetivo desta solução

candidata. A penalidade foi de R\$ 1.000.000,00, valor suficientemente grande para tornar esta solução inviável frente às demais;

- b. Cálculo da perda de carga: a perda de carga foi calculada pela equação de Hazen-Williams, equação (5);
- c. Cálculo da altura manométrica: a altura manométrica foi obtida pelo somatório da altura geométrica com a perda de carga, em cada intervalo de tempo, segundo equação (30);

$$Hm_{(i)} = Hg + dh_{(i)} \quad (30)$$

- d. Cálculo da velocidade de rotação específica, equação (18);
- e. Cálculo do rendimento máximo, equação (19);
- f. Correção do rendimento para as demais vazões, equação (20);
- g. Cálculo da potência motriz;
- h. Cálculo do rendimento do motor, equação (21)
- i. Cálculo da potência: a potência foi obtida por meio da equação (31);

$$Pot_{(i)} = \frac{\gamma \times Q_{(i)} \times Hm_{(i)}}{\eta_{(i)}} \quad (31)$$

- j. Cálculo da energia, equação (32);

$$E_{(i)} = Pot_{(i)} \times \Delta t \quad (32)$$

- k. Cálculo do custo de operação, conforme equações (22) e (23);
- l. Cálculo do custo de instalação por meio das equações (24), (25) e (26);
- m. Cálculo da função-objetivo, a partir da equação (33);

$$FO = (mensal) \times 12 \times Fa + C_{ins} + penal \quad (33)$$

Onde:

FO: função-objetivo;

mensal: custo da energia, em R\$/m<sup>3</sup>;

Fa: fator de atualização;

C<sub>ins</sub>: custo de implantação da adutora, do reservatório e do conjunto motobomba;

penal = penalidade imposta caso a vazão bombeada assumisse valores negativos, de modo que a solução candidata se tornasse inviável.

- 6 Obtida a função-objetivo, para cada solução candidata da população inicial, o algoritmo entra em processo iterativo no qual encontra a melhor solução candidata com melhor valor de função-objetivo. Depois, são geradas novas soluções candidatas a partir da existente na população e a função-objetivo é avaliada novamente. O

processo iterativo ocorre por meio dos passos descritos no item 3.6.1, a partir do passo 3.

- 7 Concluído o processo de otimização, tem-se a regra de operação otimizada.

#### 4.9 CÁLCULO DOS INDICADORES

Os indicadores podem auxiliar na tomada de decisão sobre os aspectos de eficiência hidroenergética dos sistemas de bombeamento. Foram calculados e analisados diversos indicadores com objetivo de comparar as opções geométricas de dimensionamento e hidráulicas de operação do sistema (Hg, L e D). Para todos os cenários avaliados foram obtidos valores para os seguintes indicadores:

- 1 Consumo de energia (kWh/mês): indica o consumo de energia que foi dispendido para a operação do sistema ao longo de um mês. Esse indicador reflete questões operacionais, onde se avalia o consumo de energia, mas não reflete questões administrativas já que o custo do kWh apresenta valores diferenciados ao longo do dia, ou seja, dois sistemas que tenham valores idênticos para esse indicador podem gastar valores distintos em função da tarifa contratada.
- 2 Consumo específico (kWh/m<sup>3</sup>): expressa a relação entre o consumo de energia e o volume bombeado. Esse indicador é bastante útil para avaliar a situação do sistema de bombeamento ao longo da sua vida útil.
- 3 Consumo específico normalizado (kWh/m<sup>3</sup>/100m): conceito similar ao do indicador anterior, com a vantagem de permitir a comparação entre sistemas com alturas geométricas distintas. Foi calculado para a altura manométrica máxima de operação.
- 4 Vazão nominal (m<sup>3</sup>/h): a vazão nominal foi definida de modo que no início do projeto (ano 0) e no final do projeto (ano 20) a vazão de bombeamento fosse, em média, 70% e 120% da vazão nominal, respectivamente. Esses limites foram estabelecidos para respeitar os limites de operação do conversor de frequência (ABNT, 1989 e GOMES, 2012).
- 5 Capacidade do reservatório superior: o reservatório superior pode estar destinado a absorver as variações do consumo, manter a pressão adequada na rede de distribuição, promover a continuidade do abastecimento, entre outros. Assim, foram determinadas regras para dimensionamento do reservatório superior a partir da respectiva curva de consumo associada a ele.

- 6 Rendimento máximo (%): rendimento da bomba e do motor, calculados a partir da metodologia apresentada nos itens 4.5.1, página 70 e 4.5.3, página 72, para vazão e altura manométrica nominais.
- 7 Velocidade (m/s): indica a velocidade do escoamento na tubulação. As velocidades máximas e mínimas podem ser utilizadas como critério de dimensionamento do diâmetro em sistemas de bombeamento.
- 8 Perda de carga (%): dada pela razão entre a perda de carga máxima e a altura geométrica do sistema, expresso em porcentagem, calculado pela equação (34).

$$dH(\%) = \frac{dH}{Hg} \times 100 \quad (34)$$

- 9 Altura manométrica (adimensional): dada pela razão entre a altura manométrica e altura geométrica. Esse indicador foi utilizado para avaliar a importância da perda de carga na composição da altura manométrica e é calculado pela equação (35).

$$Hm(a \text{ dim ensional}) = \frac{Hm}{Hg} \quad (35)$$

- 10 Custo total (R\$): dado pela somatória dos custos de operação e instalação. É a função-objetivo do programa.
- 11 Custo de operação (%): razão entre o custo de operação total, para 20 anos de operação, e o custo total (função-objetivo do programa).
- 12 Custo de implantação (%): razão entre o custo de implantação e o custo total (função-objetivo do programa).

O fluxograma da Figura 4.15 foi elaborado para ilustrar de modo mais claro e detalhado a metodologia apresentada ao longo deste capítulo. O último ponto do fluxograma (cálculo da energia mínima) tem sua descrição metodológica descrita no capítulo 6.

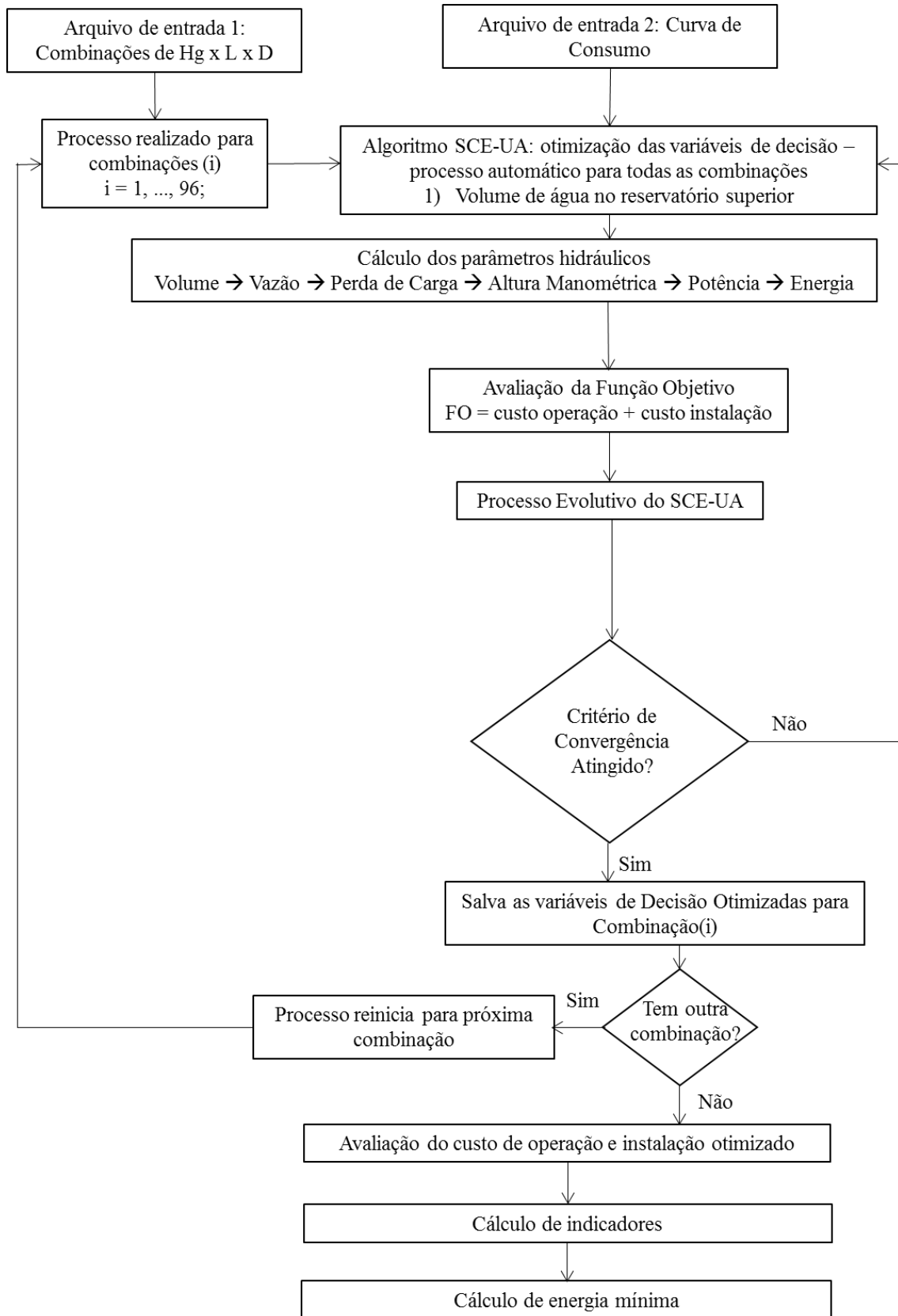


Figura 4.15. Fluxograma detalhado de metodologia da tese.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo abrange a transcrição dos resultados obtidos durante a realização da pesquisa. São detalhados os resultados obtidos com o algoritmo SCE-UA e com o modelo de simulação utilizado para cálculo da função-objetivo, os custos de operação e instalação e os indicadores empregados para a análise dos sistemas de bombeamento.

### 5.1 OPERAÇÃO DE BOMBEAMENTO OTIMIZADA

O algoritmo SCE-UA foi utilizado para definir a operação de um sistema de bombeamento de água dotado de conversor de frequência. As 23 variáveis de decisão representaram os valores horários de volume contido no reservatório superior, que permitiram calcular a vazão horária de bombeamento, por balanço de massa. Essa otimização foi feita para 96 possibilidades de dimensionamento do sistema (Tabela 4.1, página 61), para três formatos de curva de consumo com diferentes volumes e vazões (Tabela 4.3, página 67) com avaliação dos resultados para o ano 0 e para o ano 20 (Tabela 4.4, página 69).

Os conversores de frequência podem ser utilizados na otimização operativa de estações de bombeamento. Ao se alterar a rotação de uma bomba, altera-se também sua curva característica (vazão, altura manométrica e potência absorvida). Para pontos homólogos (de mesmo rendimento), são definidas as chamadas equações de similaridade, que relacionam a proporção entre a rotação original e alterada e sua influência sobre os parâmetros hidráulicos da bomba (VILANOVA, 2012).

São considerados os limites de rotação das bombas de 50% e 120% em relação à rotação nominal, conforme determina a norma NBR 6400 (ABNT, 1989). Nesta pesquisa, foram considerados os limites de 70% e 120% para a rotação e, conseqüentemente, vazão, referenciados ao seu valor no ponto de máximo rendimento. Estes limites de rotação e vazão foram respeitados para a variação da operação do sistema de bombeamento entre o início e o fim do horizonte de projeto.

Em consonância às proposições desta pesquisa, Coelho e Andrade-Campos (2014) apresentaram como possibilidade para ações de efficientização de sistemas de abastecimento de água algumas técnicas de otimização como algoritmos genéticos, algoritmos evolucionários, *Particle Swarm Optimization* (PSO), entre outras, as quais são mencionadas pelos autores com potencial utilização para aprimorar o dimensionamento de partes do sistema (diâmetro da tubulação, capacidade do reservatório, potência do conjunto motobomba, traçado das redes, etc) e definir regras de operação dos sistemas de bombeamento.



### 5.1.1 Resultados para a curva de consumo 1

A curva de consumo 1 foi apresentada na forma adimensional na Figura 4.4 e esses valores foram transformados em consumo por meio dos consumos máximos apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4, páginas 67 e 69, com quatro volumes de consumo diários distintos, para duas situações, ano 0 e ano 20, conforme apresentado na Figura 5.1.

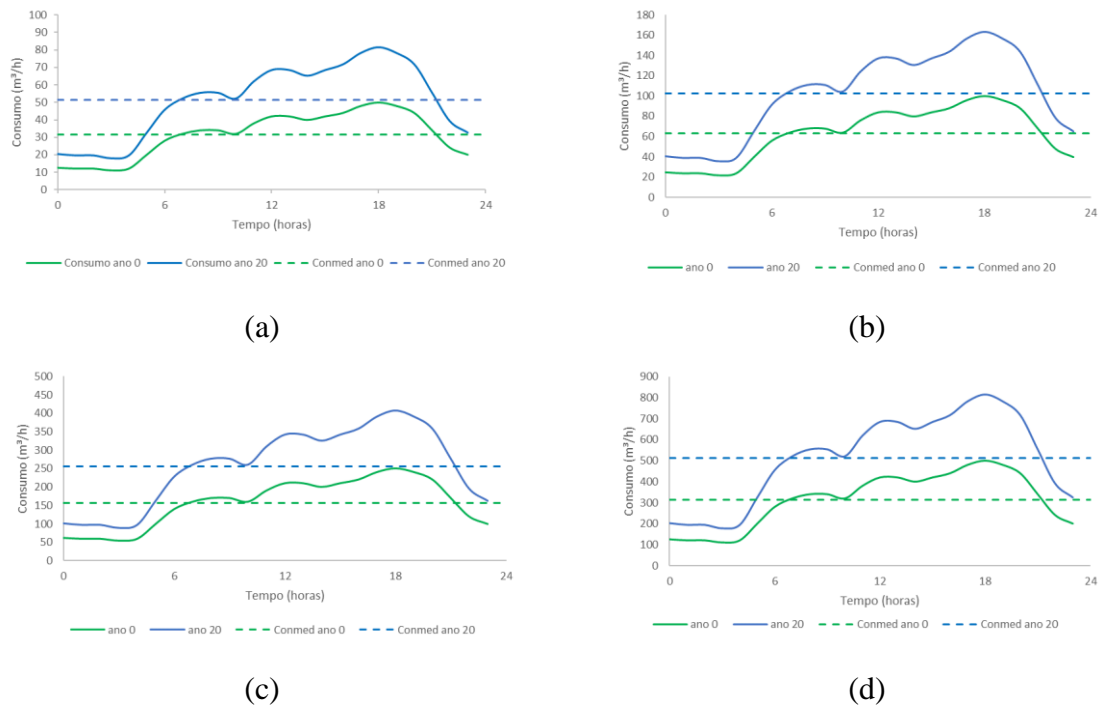


Figura 5.1. Curva de consumo 1 ( $FC = 0,63$ ) com consumo máximo de  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $81,5 \text{ m}^3/\text{h}$  (a),  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $163 \text{ m}^3/\text{h}$  (b),  $250 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $407,5 \text{ m}^3/\text{h}$  (c) e de  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $815 \text{ m}^3/\text{h}$  (d), para os anos 0 e 20, respectivamente.

Cada curva de consumo teve sua regra de operação do sistema de bombeamento otimizada para as duas situações de consumo, ano 0 e ano 20. Na Figura 5.2 estão apresentados os resultados em ambas situações, para o volume contido no reservatório superior (variável otimizada), a vazão bombeada e o consumo, para um dia de operação. Estes resultados referem-se ao sistema com altura geométrica 10 metros, comprimento 100 metros e diâmetro 100 milímetros, para consumo diário de  $755 \text{ m}^3$  no ano 0 e  $1.231 \text{ m}^3$  no ano 20 (Figura 5.1 (a)). Observa-se que, no caso apresentado, o sistema de bombeamento manteve uma vazão de bombeamento praticamente constante ao longo do dia e desligou no período de ponta (18h00min às 20h59min), o que levou o volume no reservatório superior a diminuir até quase zero. O desligamento na ponta foi uma tendência na maior parte das combinações geométricas analisadas, no entanto não foi regra.

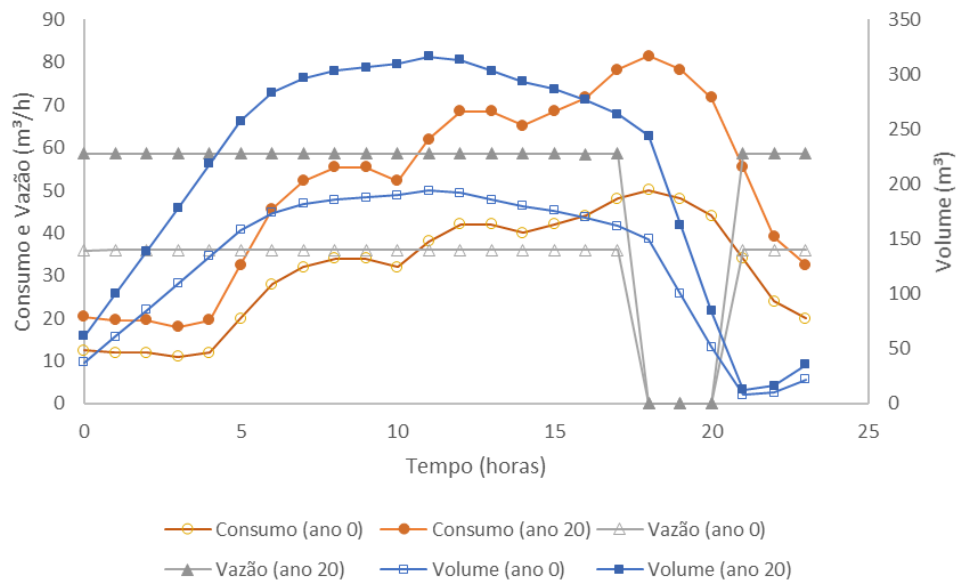


Figura 5.2. Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 1 (755 e 1.231 m<sup>3</sup>/d) inserida no algoritmo SCE-UA (Hg = 10 m; L = 100 m; D = 100 mm;).

Ressalta-se que a vazão média de bombeamento fora do período de ponta variou de 36 a 59 m<sup>3</sup>/h para atender aos consumos dos anos 0 e 20, respectivamente. Essa variação seria alcançada por meio da variação da rotação da bomba e a vazão nominal deveria ser calculada para atender todo o horizonte de projeto além de respeitar os limites de rotação de 70 a 120% em relação à rotação nominal.

O volume máximo no reservatório superior foi de 194m<sup>3</sup> no ano 0 e 317m<sup>3</sup> ano 20. O projeto desse sistema teria que prever um reservatório superior com capacidade para atender ao volume do ano 20, isto é, que atendesse a todo horizonte do projeto.

Na Figura 5.3 estão apresentados os resultados dos anos 0 e 20 para o volume (variável otimizada), a vazão bombeada e o consumo, para um dia de operação. Estes resultados referem-se ao sistema com altura geométrica 10 metros, comprimento 100 metros e diâmetro 100 milímetros, para consumos diários de 1.511 m<sup>3</sup> e 2.463 m<sup>3</sup> nos anos 0 e 20 (Figura 5.1 (b)), respectivamente. Nessa situação o bombeamento do período de ponta foi nulo apenas na operação do ano 0. A vazão média de bombeamento fora do período de ponta foi de 72 m<sup>3</sup>/h e 111 m<sup>3</sup>/h, o volume máximo no reservatório superior foi de 389 e 563 m<sup>3</sup>, para início e fim de projeto.

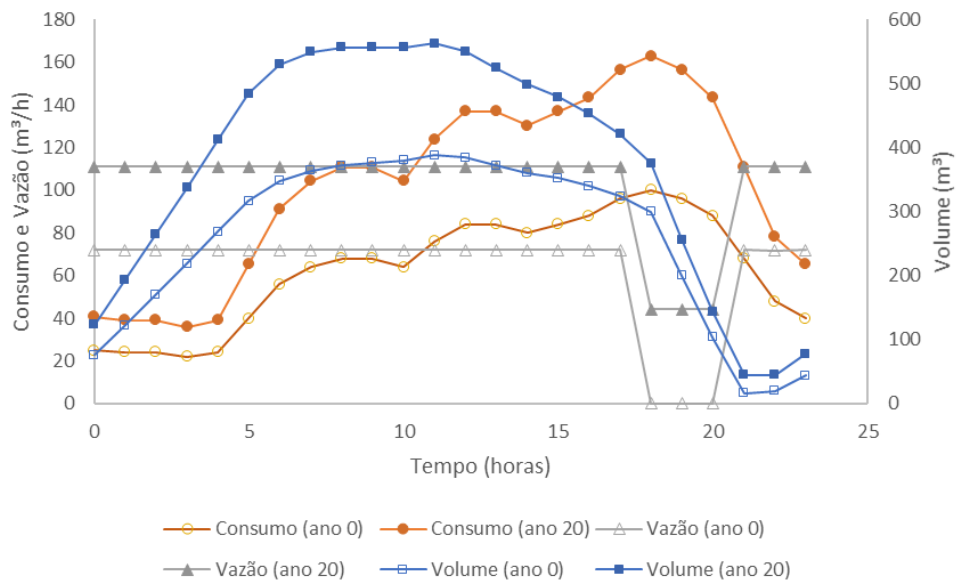


Figura 5.3. Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 1 (1.511 e 2.463 m<sup>3</sup>/d) inserida no algoritmo SCE-UA (H<sub>g</sub> = 10 m; L = 100 m; D = 100 mm;).

Na Figura 5.4 estão apresentados os resultados dos anos 0 e 20 para o volume (variável otimizada), a vazão bombeada e o consumo, para um dia de operação. Estes resultados referem-se ao sistema com altura geométrica 10 metros, comprimento 100 metros e diâmetro 150 milímetros, para consumos diários de 3.777 m<sup>3</sup> e 6.157 m<sup>3</sup> nos anos 0 e 20 (Figura 5.1 (c)), respectivamente. Nessa situação o bombeamento do período de ponta foi nulo apenas na operação do ano 0. A vazão média de bombeamento fora do período de ponta foi de 180 m<sup>3</sup>/h e 279 m<sup>3</sup>/h, o volume máximo no reservatório superior foi de 970 e 1.423 m<sup>3</sup>, para início e fim de projeto.

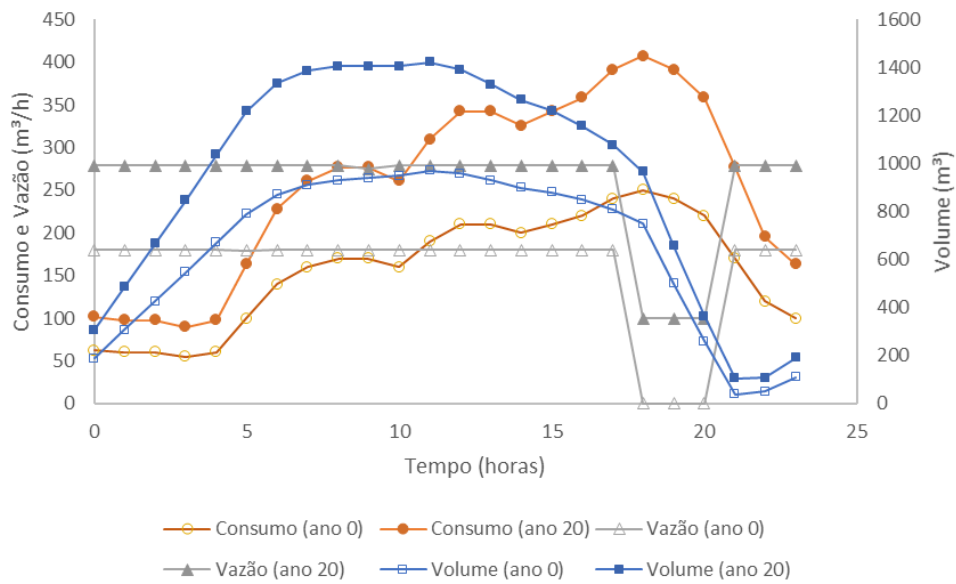


Figura 5.4. Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 1 ( $3.777$  e  $6.157$   $m^3/d$ ) inserida no algoritmo SCE-UA ( $H_g = 10$  m;  $L = 100$  m;  $D = 150$  mm;).

Na Figura 5.5 estão apresentados os resultados dos anos 0 e 20 para o volume (variável otimizada), a vazão bombeada e o consumo, para um dia de operação. Estes resultados referem-se ao sistema com altura geométrica 10 metros, comprimento 100 metros e diâmetro 250 milímetros, para consumos diários de  $7.555$   $m^3$  e  $12.315$  nos anos 0 e 20 (Figura 5.1 (d)), respectivamente. O bombeamento do período de ponta foi nulo na operação do ano 0 e do ano 20. A vazão média de bombeamento fora do período de ponta foi de  $360$   $m^3/h$  e  $586$   $m^3/h$  e o volume máximo no reservatório superior foi de  $1.939$  e  $3.164$   $m^3$ , para início e fim de projeto.

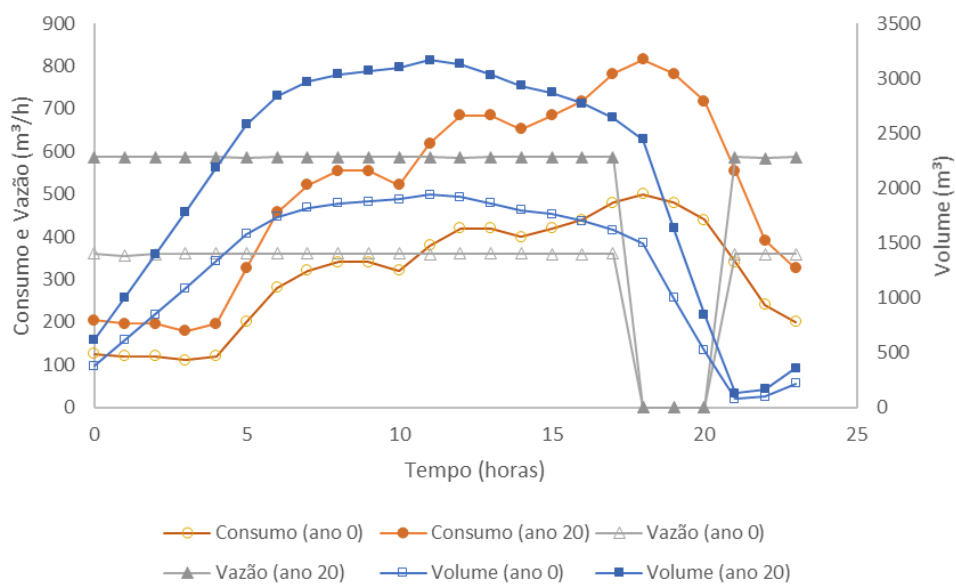


Figura 5.5. Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 1 ( $7.555$  e  $12.315$   $m^3/d$ ) inserida no algoritmo SCE-UA ( $H_g = 10$  m;  $L = 100$  m;  $D = 250$  mm;).

Apesar do sistema ter possibilidade de variar a vazão bombeada ao longo do dia (conversor de frequência), observou-se que a otimização manteve a vazão bombeada com valor próximo ao valor médio para bombeamento ao longo de 21 horas. Provavelmente, isso ocorreu em função de que, com a variação da vazão, o rendimento diminuiu, ou seja, perde-se em eficiência. A variação mais expressiva de vazão ocorreu entre a operação do início e fim de projeto. A existência do reservatório superior é outro fator que contribuiu para a manutenção da operação próxima a um único valor vazão bombeada.

As situações apresentadas na Figura 5.2 até a Figura 5.5 referem-se a uma combinação geométrica ( $H_g \times L \times D$ ) das 96 combinações analisadas. Tem-se, portanto, resultados para todas as combinações, nos 4 volumes, para início e fim de projeto, com síntese apresentada na Tabela 5.1, página 93.

Os resultados para vazão e volume estão apresentados apenas com seus limites, mínimo e máximo. Observa-se que a vazão de bombeamento na ponta apresenta valores diferentes de zero em todas as situações apresentadas, no entanto, quando há bombeamento no período de ponta, a vazão bombeada nesse período foi sempre inferior à vazão média do período fora de ponta. Ou seja, operação otimizada indica, senão o desligamento, a diminuição da vazão bombeada no período de tarifação diferenciada.

Quando há bombeamento no período de ponta, a vazão média bombeada no período fora de ponta assume valores menores, já para os casos em que a vazão do período de ponta é nula, a vazão média do período fora de ponta assume valores maiores, pois o volume consumido durante o dia precisa ser bombeado apenas nas 21 horas restantes. O bombeamento na ponta aconteceu nos casos de menor diâmetro e maior comprimento, ou seja, quando a perda de carga assume valores mais expressivos. Isso significa que nessas situações, diminuir a vazão média fora da ponta foi mais importante na composição do custo do que desligar o bombeamento no período de ponta. Por exemplo: dois sistemas cujo consumo diário é  $755 \text{ m}^3/\text{dia}$ , no primeiro ( $H_g = 10 \text{ m}$ ;  $L = 5000 \text{ m}$ ;  $D = 200 \text{ mm}$ ), foi indicado o desligamento do bombeamento no período de ponta e a vazão média bombeada no período fora de ponta foi de  $35,9 \text{ m}^3/\text{h}$ . Já no segundo sistema ( $H_g = 10 \text{ m}$ ;  $L = 5000 \text{ m}$ ;  $D = 100 \text{ mm}$ ), a vazão do período de ponta foi de  $16,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , logo, a vazão média bombeada no período fora de ponta foi de  $33,6 \text{ m}^3/\text{h}$ , valor inferior ao encontrado para o primeiro sistema.

Tabela 5.1. Síntese dos resultados da curva 1.

Consumo (m <sup>3</sup> /d)	Hg (m)	L (m)	D (mm)	Q <sub>max</sub> <sup>FP</sup> (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>med</sub> <sup>FP</sup> (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>med</sub> <sup>P</sup> (m <sup>3</sup> /h)	VR <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> )
755	10	100	100	33,65	33,63	0	168
			150				
			200				
			250				
1.231	25	500	350	até	até	até	até
			400				
			450				
			500				
1.511	50	1000	500	78,40	58,64	27,57	570
			550				
			600				
			650				
2.463	100	5.000	700	67,18	67,17	0	335
			750				
			800				
			850				
3.777	10	100	100	109,34	109,31	0	545
			150				
			200				
			250				
6.157	25	500	300	até	até	até	até
			350				
			400				
			450				
7.555	50	1000	500	152,54	117,28	55,79	1.079
			550				
			600				
			650				
12.315	100	5.000	700	167,86	167,83	0	837
			750				
			800				
			850				
7.555	10	100	100	226,63	179,88	84,36	1.580
			150				
			200				
			250				
6.157	25	500	300	273,38	273,32	0	1.363
			350				
			400				
			450				
7.555	50	1000	500	352,93	293,21	139,20	2.336
			550				
			600				
			650				
12.315	100	5.000	700	336,87	336,75	0	1.686
			750				
			800				
			850				
12.315	10	100	100	445,88	359,76	161,08	3.052
			150				
			200				
			250				
12.315	25	500	300	547,23	547,17	0	2.731
			350				
			400				
			450				
12.315	50	1000	500	794,20	586,41	274,73	5.842
			550				
			600				
			650				

Q<sub>max</sub><sup>FP</sup>: Vazão máxima fora da ponta;Q<sub>med</sub><sup>FP</sup>: vazão média fora da ponta;Q<sub>med</sub><sup>P</sup>: vazão média na ponta;VR<sub>máx</sub>: volume máximo do reservatório;

Foi criado um indicador dado pela relação entre a altura manométrica ( $H_m$ ) e a altura geométrica ( $H_g$ ) para tentar definir em quais situações foi viável (em relação ao custo) desligar o bombeamento na ponta. Os resultados para esse indicador estão apresentados na Figura 5.6 onde pode-se observar que o bombeamento na ponta ocorreu para situações em que o indicador assumiu valores superiores a 1,82 e que apresentou valor máximo próximo a 30% da vazão nominal do sistema. A relação entre  $H_m$  e  $H_g$  define, de forma indireta, a perda de carga do sistema.

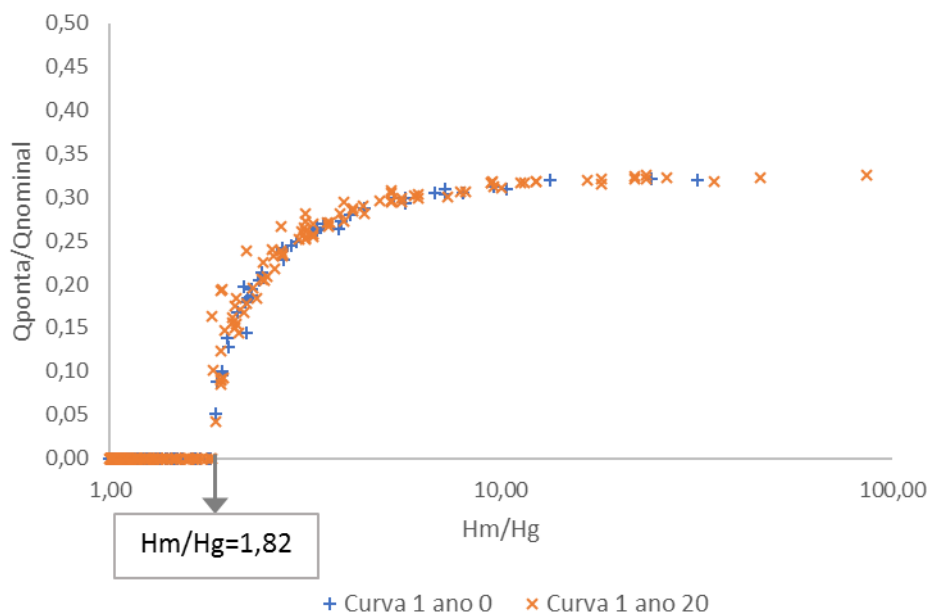


Figura 5.6. Avaliação do bombeamento no período de ponta em função do indicador  $H_m/H_g$  para curva 1.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.6 pode-se concluir que nas situações em que a perda de carga é menor que 82% da altura geométrica, o bombeamento na ponta é nulo. Para a curva 1, o bombeamento foi otimizado para 768 casos, obtidos das 96 combinações de  $H_g \times L \times D$ , nos 4 volumes para início e fim de projeto ( $96 \times 4 \times 2$ ). Dentre todos esses, o bombeamento na ponta foi diferente de 0 em apenas 118 casos, ou seja, 15,4%, e a maioria para a operação no ano 20, quando a perda de carga é maior.

### 5.1.2 Resultados para a curva de consumo 2

A curva de consumo 2 foi apresentada na forma adimensional na Figura 4.5 e seus valores foram transformados em consumo por meio dos consumos máximos apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4, com quatro volumes de consumo diários distintos, para duas situações, ano 0 e ano 20, conforme apresentado na Figura 5.7.

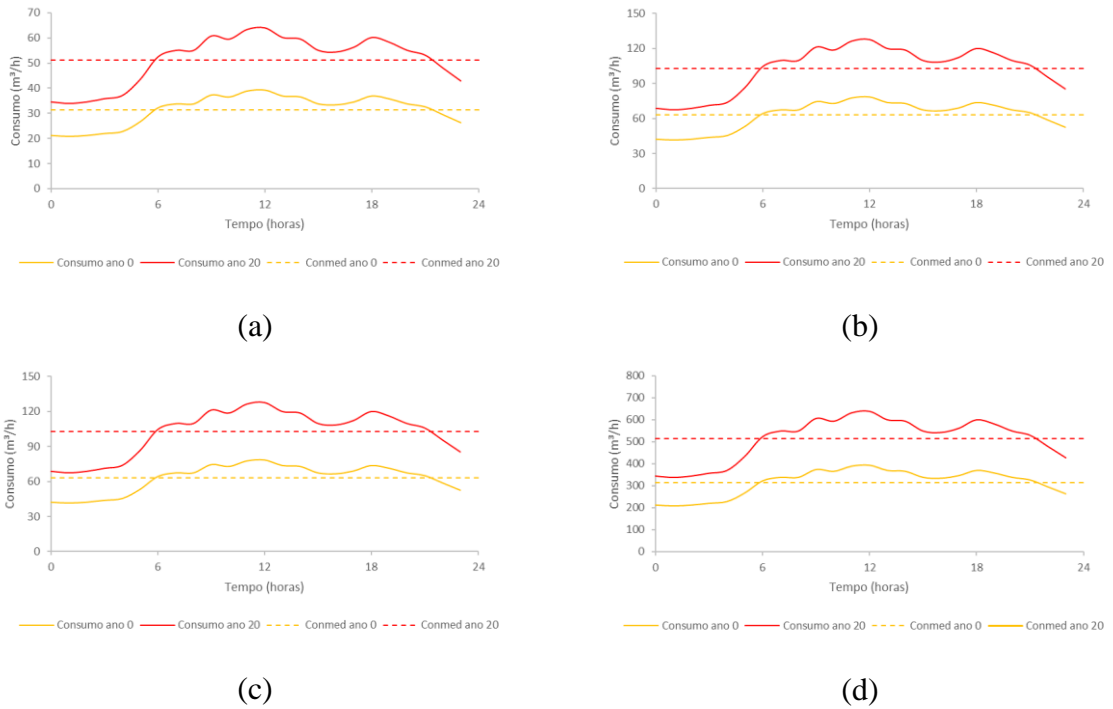


Figura 5.7. Curva de consumo 2 ( $FC = 0,80$ ) com consumo máximo de  $39,2 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $63,9 \text{ m}^3/\text{h}$  (a),  $78,5 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $127,9 \text{ m}^3/\text{h}$  (b),  $196,1 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $319,6 \text{ m}^3/\text{h}$  (c) e  $392,3 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $639,4 \text{ m}^3/\text{h}$  (d), para os anos 0 e 20, respectivamente.

Similar ao que foi feito para a curva 1, a curva de consumo 2 teve sua regra de operação do sistema de bombeamento otimizada para as duas situações de consumo, ano 0 e ano 20.

Os resultados de vazão e volume para a curva 2 estão sintetizados na Tabela 5.2. Os demais resultados dessa curva estão no Apêndice A.



Tabela 5.2. Síntese dos resultados da curva 2.

Consumo (m <sup>3</sup> /d)	Hg (m)	L (m)	D (mm)	Q <sub>max</sub> <sup>FP</sup> (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>med</sub> <sup>FP</sup> (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>med</sub> <sup>P</sup> (m <sup>3</sup> /h)	VR <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> )
755	10	100	100	33,67	35,98	0	106
			150				
			200				
			250				
1.231	25	500	350	até	até	até	até
			400				
			450				
			500				
1.511	50	1000	500	45,42	35,98	16,26	244
			550				
			600				
			650				
2.463	100	5.000	700	74,14	58,65	27,84	420
			750				
			800				
			850				
3.777	10	100	100	67,14	67,11	0	212
			150				
			200				
			250				
6.157	25	500	300	até	até	até	até
			350				
			400				
			450				
7.555	50	1000	500	96,96	71,95	33,85	587
			550				
			600				
			650				
12.315	100	5.000	700	109,33	109,32	0	345
			750				
			800				
			850				
3.777	10	100	150	167,92	167,87	0	530
			200				
			250				
			300				
6.157	25	500	350	229,60	179,85	83,56	1.335
			400				
			450				
			500				
7.555	50	1000	500	273,11	273,08	0	861
			550				
			600				
			650				
12.315	100	5.000	700	370,52	293,16	140,54	2.122
			750				
			800				
			850				
7.555	10	100	300	336,33	336,29	0	1.065
			350				
			400				
			450				
12.315	25	500	500	478,03	359,79	164,55	2.582
			550				
			600				
			650				
12.315	50	1000	700	547,58	547,45	0	1.730
			750				
			800				
			850				
12.315	100	5.000	900	715,74	586,47	273,11	3.710
			950				
			1000				
			1050				

Q<sub>max</sub><sup>FP</sup>: Vazão máxima fora da ponta;Q<sub>med</sub><sup>FP</sup>: vazão média fora da ponta;Q<sub>med</sub><sup>P</sup>: vazão média na ponta;VR<sub>máx</sub>: volume máximo do reservatório;

Do mesmo modo que para a curva 1, a vazão de bombeamento na ponta apresenta valores diferentes de zero em todas as situações apresentadas, no entanto, o bombeamento na ponta ocorreu apenas nos casos em que a perda de carga assumiu valores mais expressivos (menor diâmetro e maior comprimento).

A Figura 5.8 apresenta a relação entre o bombeamento na ponta ( $Q_{\text{ponta}}$ ) e a vazão nominal ( $Q_{\text{nominal}}$ ) *versus* o indicador dado pela relação entre a altura manométrica e a altura geométrica onde pode-se observar que o valor de 1,82, observado para curva 1, também ocorreu para a curva 2.

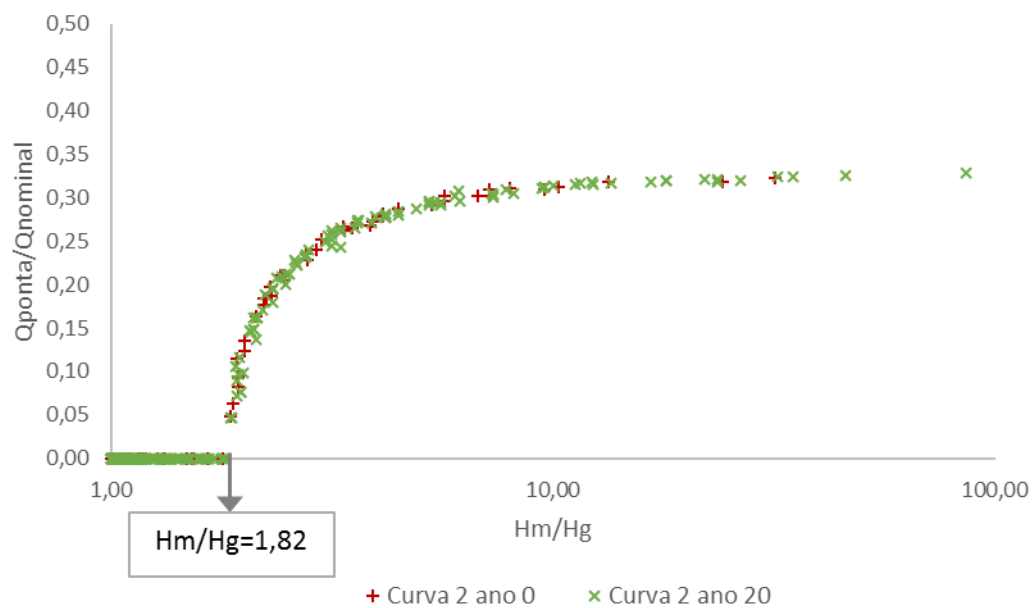


Figura 5.8. Avaliação do bombeamento no período de ponta em função do indicador Hm/Hg para curva 2.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.8 pode-se concluir que nas situações de menor perda de carga, o bombeamento na ponta é nulo. Assim como para a curva 1, para a curva 2 o bombeamento foi otimizado para 768 casos e, dentre todos esses, o bombeamento na ponta foi diferente de 0 em apenas 117 casos, ou seja, 15,2%.

### 5.1.3 Resultados para a curva de consumo 3

A curva de consumo 3 foi apresentada na forma adimensional na Figura 4.6 e seus valores foram transformados em consumo por meio consumos máximos apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4, com quatro volumes de consumo diários distintos, para duas situações, ano 0 e ano 20, conforme apresentado na Figura 5.9.

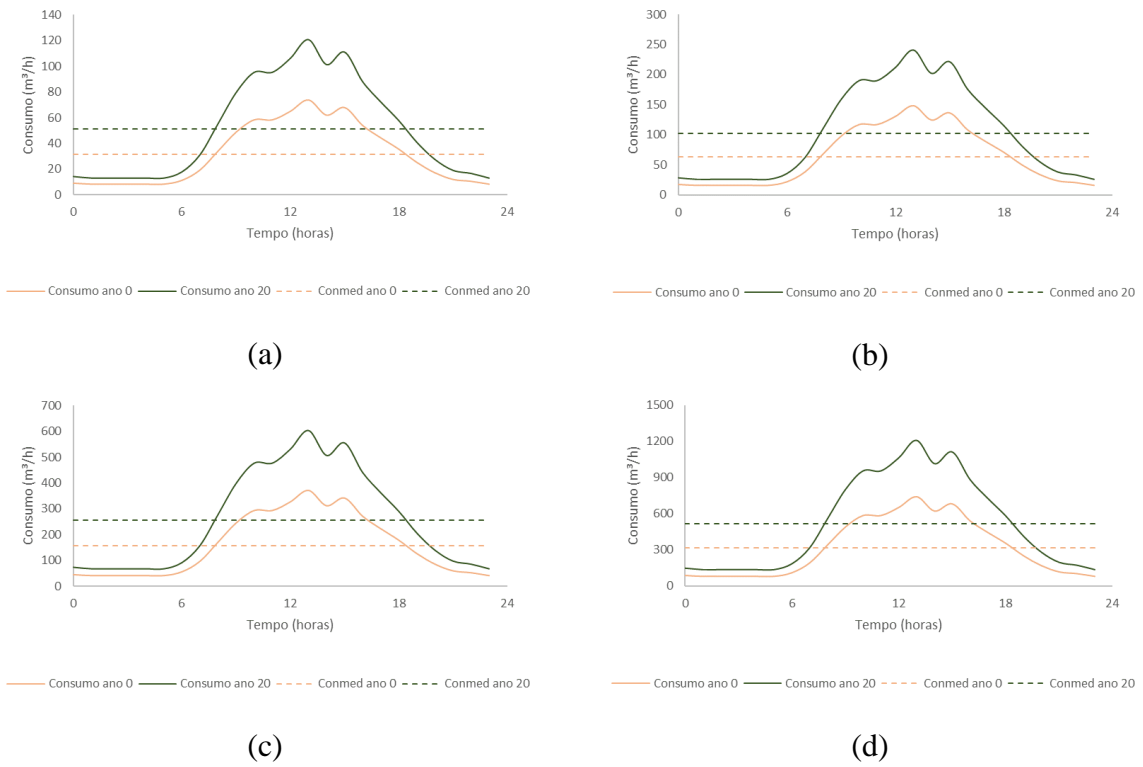


Figura 5.9. Curva de consumo 3 ( $FC = 0,43$ ) com consumo máximo de  $74 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $120,6 \text{ m}^3/\text{h}$  (a),  $148 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $241,2 \text{ m}^3/\text{h}$  (b),  $370 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $603,1 \text{ m}^3/\text{h}$  (c) e  $740 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $1.206,2 \text{ m}^3/\text{h}$  (d), para os anos 0 e 20, respectivamente.

A Tabela 5.3 apresenta uma síntese dos resultados de vazão e volume da curva 3 e os demais resultados estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 5.3. Síntese dos resultados da curva 3.

Consumo (m <sup>3</sup> /d)	Hg (m)	L (m)	D (mm)	Q <sub>max</sub> <sup>FP</sup> (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>med</sub> <sup>FP</sup> (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>med</sub> <sup>P</sup> (m <sup>3</sup> /h)	VR <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> )
755	10	100	100	35,70	33,53	0	242
			150				
			200				
			250				
1.231	25	500	350	até	até	até	até
			400				
			450				
			500				
1.511	50	1000	500	46,49	35,97	17,15	339
			600				
			700				
			800				
2.463	100	5.000	900	58,12	54,60	0	394
			1000				
			1100				
			1200				
3.777	10	100	1300	87,93	58,62	28,28	527
			1400				
			1500				
			1600				
6.157	25	500	1700	71,30	67,00	0	483
			1800				
			1900				
			2000				
7.555	50	1000	2100	83,27	71,94	34,74	590
			2200				
			2300				
			2400				
12.315	100	5.000	2500	116,10	109,08	0	785
			2600				
			2700				
			2800				
3.777	10	100	2900	178,42	167,49	0	1.206
			3000				
			3100				
			3200				
6.157	25	500	3300	213,01	179,86	86,86	1.499
			3400				
			3500				
			3600				
7.555	50	1000	3700	290,34	272,85	0	1.717
			3800				
			3900				
			4000				
12.315	100	5.000	4100	365,77	293,16	142,77	2.332
			4200				
			4300				
			4400				
7.555	10	100	4500	357,17	335,54	0	2.421
			4600				
			4700				
			4800				
12.315	25	500	4900	437,76	359,71	169,77	3.095
			5000				
			5100				
			5200				
12.315	50	1000	5300	580,79	545,72	0	3.934
			5400				
			5500				
			5600				
12.315	100	5.000	5700	685,91	586,33	285,19	4.880
			5800				
			5900				
			6000				

Q<sub>max</sub><sup>FP</sup>: Vazão máxima fora da ponta;Q<sub>med</sub><sup>FP</sup>: vazão média fora da ponta;Q<sub>med</sub><sup>P</sup>: vazão média na ponta;VR<sub>máx</sub>: volume máximo do reservatório;

Do mesmo modo que para as curvas 1 e 2, a vazão de bombeamento na ponta apresenta valores diferentes de zero nos casos em que a perda de carga assumiu valores mais expressivos (menor diâmetro e maior comprimento).

A Figura 5.10 apresenta o bombeamento na ponta ( $Q_{\text{ponta}}$ ) em relação à vazão nominal ( $Q_{\text{nominal}}$ ) versus o indicador dado pela relação entre a altura manométrica e a altura geométrica onde pode-se observar que para valores superiores a 1,82 houve bombeamento na ponta. Esse limite do indicador, para a curva 3, foi análogo ao encontrado para as curvas 1 e 2.

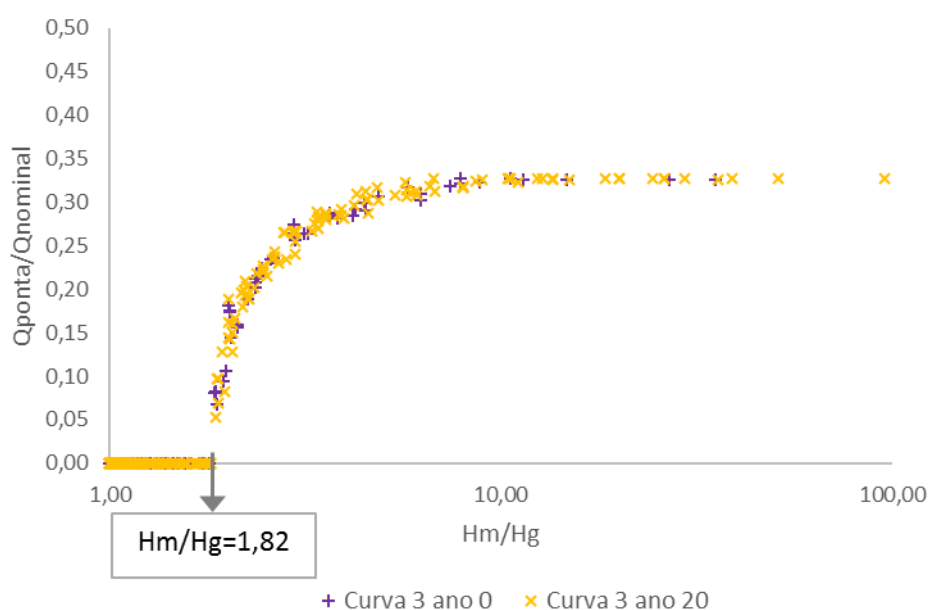


Figura 5.10. Avaliação do bombeamento no período de ponta em função do indicador  $Hm/Hg$  para curva 3.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.10 pode-se concluir que nas situações de menor perda de carga, o bombeamento na ponta é nulo. Dentre todos os 768 casos, o bombeamento na ponta foi diferente de 0 em apenas 120 casos (15,6%).

#### 5.1.4 Considerações sobre a operação de bombeamento otimizada para as três curvas

O algoritmo SCE-UA foi utilizado para determinar a regra de operação otimizada para três diferentes curvas de consumo, conforme exposto anteriormente. Para cada curva, foram avaliados 768 casos distintos, dentre os quais foram variadas as características geométricas, os volumes de consumo diários e as vazões horárias consumidas. De acordo com as sínteses apresentadas na Tabela 5.1 até a Tabela 5.3 pode-se apontar que, para as vazões (máxima e média do período fora de ponta e média do período de ponta), os valores são muito próximos entre si, o coeficiente de variação dado pela relação entre a média e o desvio padrão dos valores das três curvas não foi superior a 10% em nenhuma situação. Já para o volume, os valores

obtidos para curva 2 foram menores que os das curvas 1 e 3, que por sua vez, foram similares entre si.

Ainda, observando o comportamento das variáveis, pode-se concluir que como os volumes de consumo das curvas são análogos, as vazões máximas e médias de bombeamento apresentam valores com pouca variação, no entanto, o formato das curvas de consumo varia e isso, provavelmente, levou a variação do volume do reservatório, já que os consumos máximos se encontram em momentos distintos do dia em cada curva. A análise dessa variável foi realizada com maior detalhamento e está apresentada em item subsequente.

Cabe esclarecer que, dentre as 96 combinações geométricas analisadas, estão incluídas situações de elevada perda de carga, onde a função-objetivo calculada por meio da soma do custo de operação com o custo de instalação é muito superior. Por exemplo, para casos com altura geométrica e comprimento constantes, o custo total variou em função do diâmetro e essa variação tornou algumas combinações inviáveis (muito onerosas). A apreciação dos custos norteou a escolha das melhores combinações geométricas dentre todas e, por conseguinte, a análise dos indicadores utilizados.

A regra de operação otimizada apontou para desligamento ou redução da vazão durante o período de ponta. A vazão de bombeamento na ponta foi avaliada junto a relação entre a altura manométrica e a altura geométrica para estabelecer em quais situações foi indicado o não desligamento do bombeamento nesse período. Para as três curvas, o bombeamento durante o período de ponta ocorreu quando essa relação foi maior que 1,82, o que significa que a perda de carga é maior que 80% da altura geométrica. Também, para cada curva, ocorreram mais bombeamentos durante o período de ponta na operação do ano 20 do que do ano 0, já que, no fim do projeto, a vazão bombeada é maior, o coeficiente de rugosidade (C) é menor e, portanto, aumenta a perda de carga.

A otimização de regras de operação de sistemas de bombeamento é um assunto recorrente na literatura sobre a eficiência energética no saneamento. Solera et al. (2016) propuseram uma solução heurística para minimizar o custo da energia elétrica necessária para o funcionamento de bombas hidráulicas de sistemas de abastecimento de água. A abordagem de solução proposta pelos autores não apontou investimento em infraestrutura ou qualquer alteração na estrutura do sistema de abastecimento existente, exigiu apenas mudanças nas políticas operacionais de bombeamento, as quais são de simples implantação prática e proporcionam economias significativas nos gastos com energia elétrica. O proposto pelos autores é similar ao proposto nesta pesquisa que também buscou a diminuição dos custos de operação por meio da alteração nas regras de operação do sistema de bombeamento.

## 5.2 CUSTO DE OPERAÇÃO E CUSTO DE INSTALAÇÃO

Os custos de operação e instalação foram calculados para determinação da função-objetivo utilizando-se as equações (22) a (26). Determinar os custos de operação é mais simples, pois os valores vigentes para tarifa e impostos são divulgados rotineiramente pelas companhias de energia. Já a estimativa dos custos de instalação mostra-se mais complexa, já que existem muitas fontes de consulta (tabelas do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, planos municipais de saneamento básico, companhias de saneamento, empresas de engenharia, revendedoras de equipamentos, etc).

Costa (2003) apresentou uma metodologia para análise de tarifas de sistemas de abastecimento de água com base nos custos de implantação e operação do sistema com equações para cálculo do custo de implantação de estações elevatórias, adutoras de PVC e ferro fundido, reservatórios apoiados, entre outras. Os valores apresentados por esse autor foram atualizados pelo Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M – 2003 a 2016) e também foram utilizados na comparação.

A Figura 5.11 mostra a comparação entre os valores de custo de implantação da estação elevatória obtidos com a Maquimotor (2016), utilizados no modelo desenvolvido na pesquisa, com os valores propostos por Costa (2003) e, também, com os valores desse autor, atualizados pelo IGP-M.

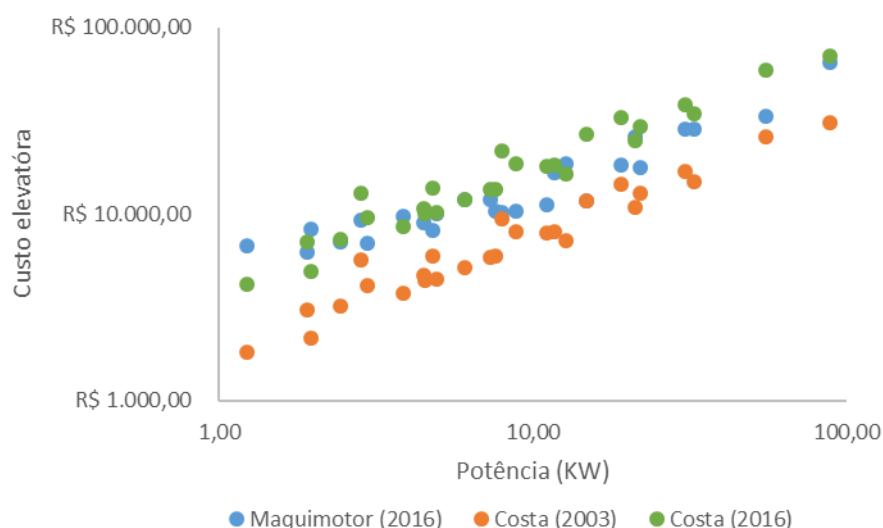


Figura 5.11. Comparação entre os custos de implantação da estação elevatória obtidos com a Maquimotor (2016), com os propostos por Costa (2003) e com os valores desse autor, atualizado pelo IGP-M.

Comparação similar foi feita com os custos de implantação de reservatórios avaliando os valores propostos por Gomes (2016) em relação aos propostos por Costa (2003), e os valores

desse autor, atualizados pelo IGP-M, de acordo com o apresentado na Figura 5.12. Já a comparação entre os custos de implantação da adutora está apresentada na Figura 5.13.

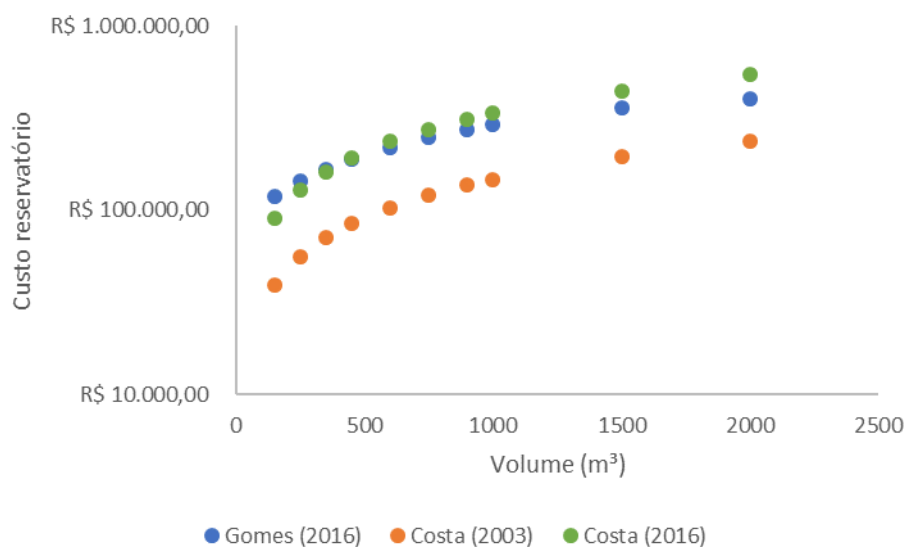


Figura 5.12. Comparação entre os custos de implantação de reservatórios obtidos com Gomes (2016), com os propostos por Costa (2003) e com os valores desse autor, atualizado pelo IGP-M.

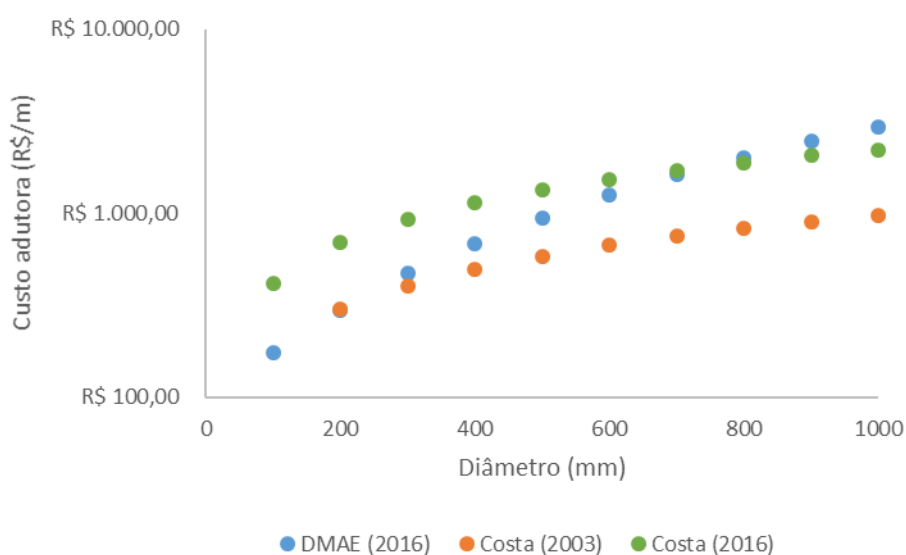


Figura 5.13. Comparação entre os custos de implantação da linha adutora obtidos com DMAE (2016), com os propostos por Costa (2003) e com os valores desse autor, atualizado pelo IGP-M.

Os valores para custo de implantação de estações elevatórias, reservatórios e adutoras, utilizados nesta pesquisa, foram superiores aos propostos por Costa (2003), entretanto, são bastante similares aos valores atualizados pelo IGP-M e apresentaram, em geral, a mesma tendência daqueles apresentados pelo autor, o que corrobora a validade das análises de custo desenvolvidas.



Sabe-se que os custos de instalação e operação variam de modo inversamente proporcional, os custos de operação diminuem e os de instalação aumentam com a ampliação do diâmetro da tubulação. O custo total, em valor presente, é dado pela soma destes dois custos, no entanto, para que possam ser somados deve-se aplicar o fator de atualização aos custos de operação, conforme explicado anteriormente.

Por meio das figuras na sequência, Figura 5.14 a Figura 5.17, pode ser visualizado a composição do custo total ( $C_{tot}$ ) pelos custos de operação ( $C_{op}$ ) e instalação ( $C_{ins}$ ). Estes resultados são para a curva 1, com volume de consumo de  $755\text{m}^3/\text{d}$  e foram apresentados de forma gráfica para exemplificar o comportamento dos custos em função das dimensões de Hg, L e D. Poderiam ser feitas composições semelhantes para todas as curvas e volumes, contudo, foi apresentada somente essa, pois atende ao objetivo de exemplificar a composição do custo total pelos custos de operação e instalação.

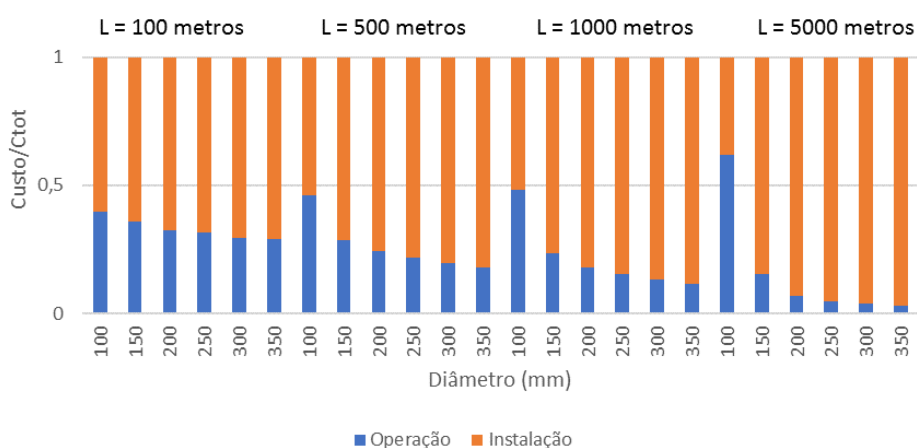


Figura 5.14. Composição do custo total pelos custos de operação e instalação para curva 1 ( $FC = 0,63$ ), com consumo de  $755\text{m}^3/\text{d}$  e altura geométrica de 10 metros.

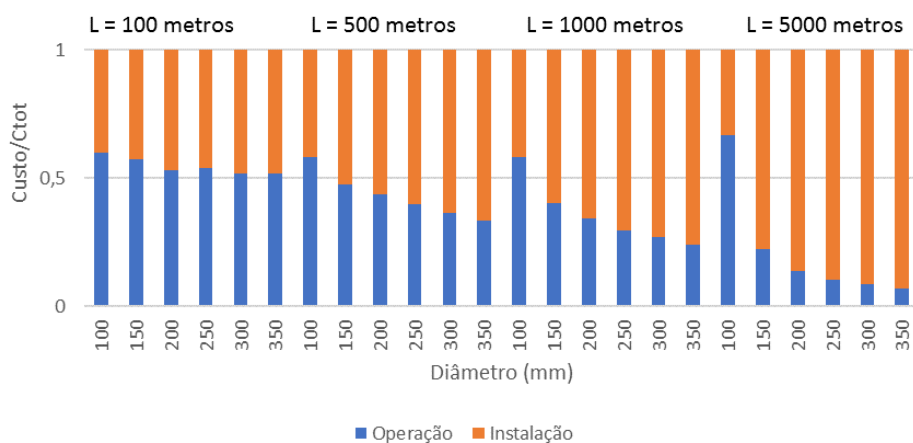


Figura 5.15. Composição do custo total pelos custos de operação e instalação para curva 1 ( $FC = 0,63$ ), com consumo de  $755\text{m}^3/\text{d}$  e altura geométrica de 25 metros.

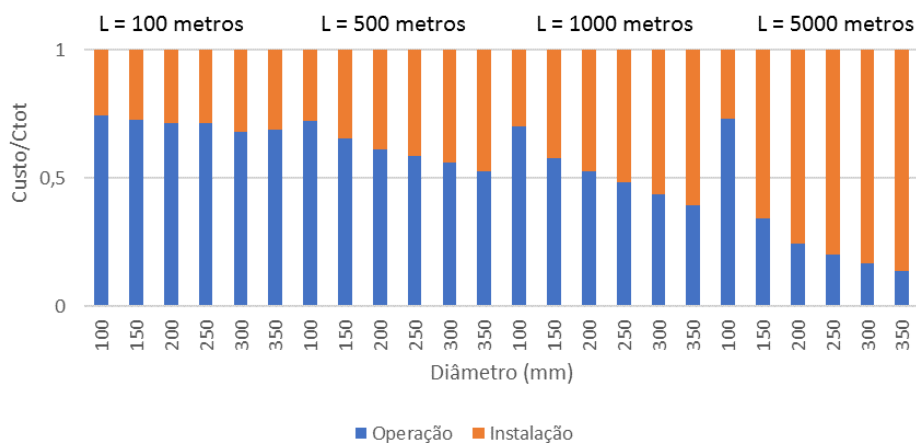


Figura 5.16. Composição do custo total pelos custos de operação e instalação para curva 1 ( $FC = 0,63$ ), com consumo de  $755\text{m}^3/\text{d}$  e altura geométrica de 50 metros.

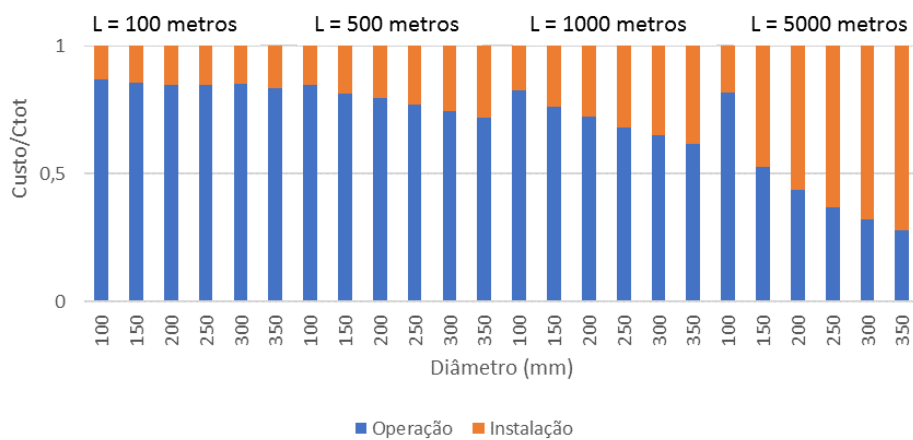


Figura 5.17. Composição do custo total pelos custos de operação e instalação para curva 1 ( $FC = 0,63$ ), com consumo de  $755\text{m}^3/\text{d}$  e altura geométrica de 100 metros.

Os custos de instalação foram mais significativos na situação de menor altura geométrica (Figura 5.14), quando a altura manométrica é menor e, portanto, a potência e a energia são menores, ou seja, a operação custa menos. Conforme a altura geométrica aumenta, os custos de operação se tornaram mais representativos para o custo total, mesmo quando se comparam situações análogas para comprimento e diâmetro.

A Figura 5.18 mostra a composição do custo total para diferentes diâmetros. A situação exibida na figura refere-se à curva 1, com consumo de  $755\text{m}^3/\text{d}$ , altura geométrica de 100 metros e comprimento de 5.000 metros. Nessa configuração, o custo de operação foi maior que o de instalação para os diâmetros de 100 e 150mm e a partir de 200mm o custo de instalação superou os de operação.

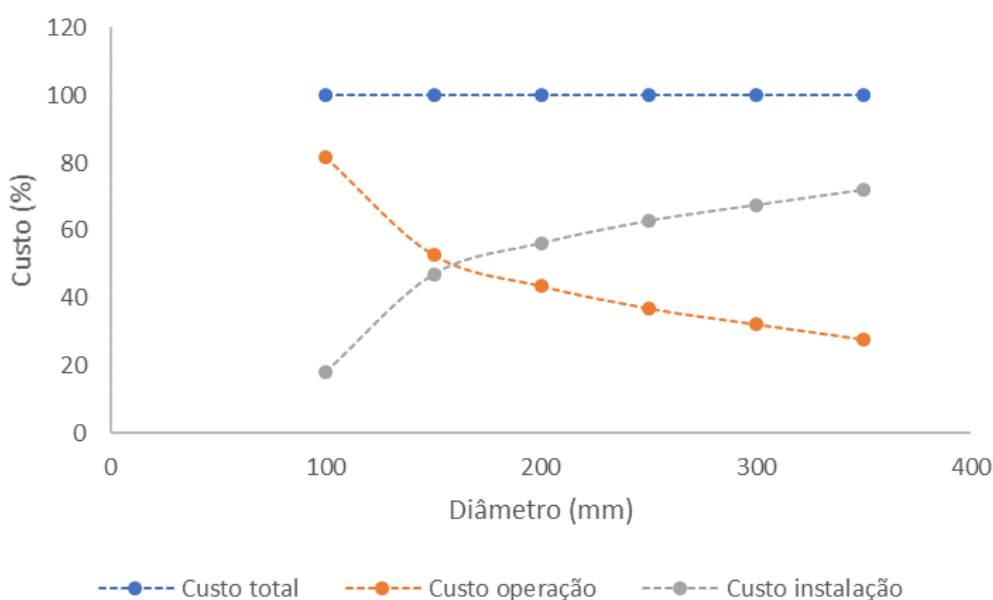


Figura 5.18. Representação da composição do custo total pelos custos de instalação e operação, em percentual, para curva 1, com volume de  $755\text{m}^3/\text{d}$ , altura geométrica de 100 m e comprimento de 5.000m.

Os custos de operação e instalação precisam ser analisados, pois permitem inferir sobre qual diâmetro deve ser adotado em cada situação. A Figura 5.19 mostra os custos de instalação, operação e total para a mesma situação apresentada anteriormente, mas com valores absolutos.

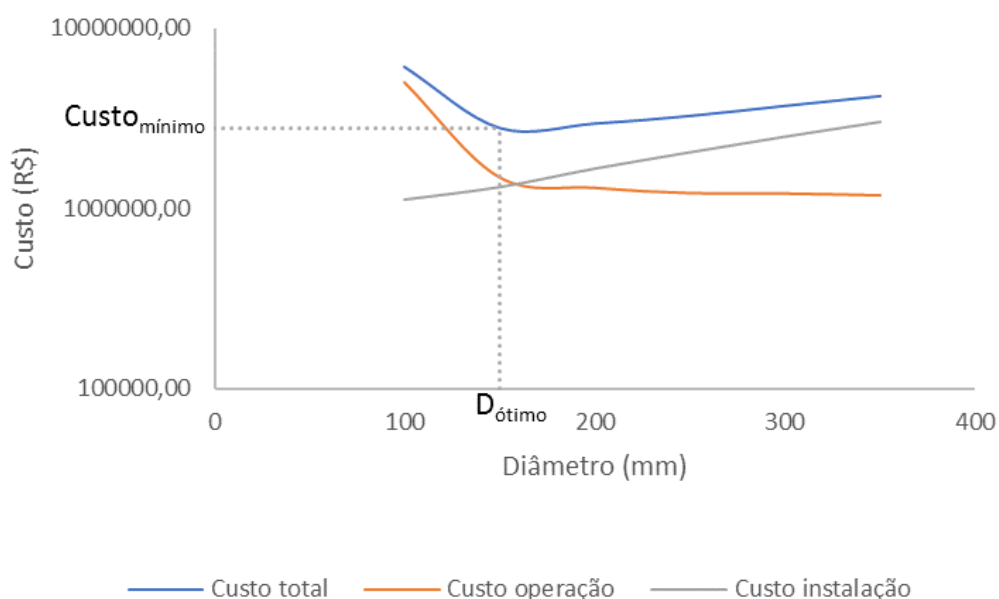


Figura 5.19. Representação dos custos de operação, instalação e total, para curva 1, com volume de  $755\text{m}^3/\text{d}$ , altura geométrica de 100 m e comprimento de 5.000m.

Na situação demonstrada, o menor valor para o custo total foi R\$2.796.334,00, no diâmetro 150 mm, ou seja, esse foi o diâmetro ótimo para esse caso. Esse diâmetro apresentou menor custo total nas demais alturas geométricas avaliadas, para comprimento de 5.000 metros, como apresentado na Figura 5.20.

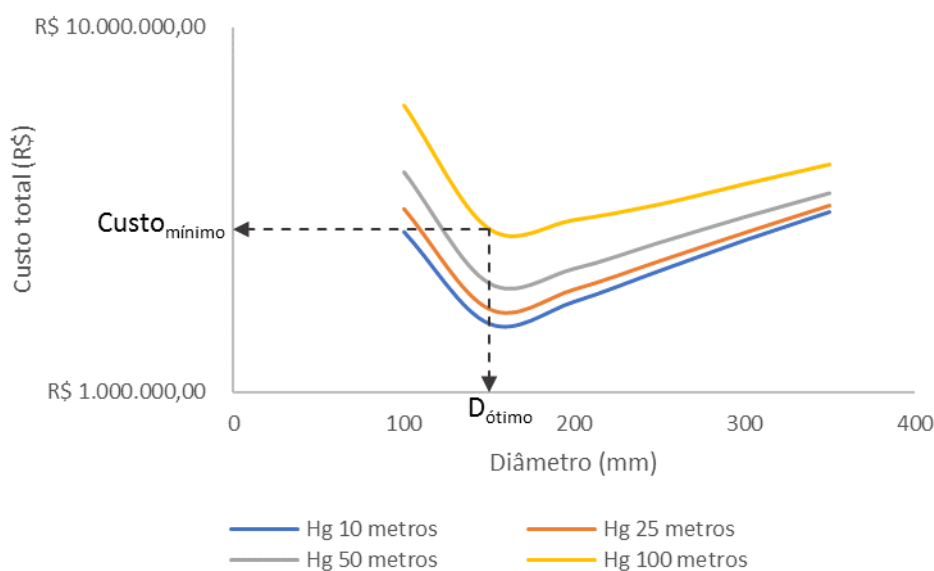


Figura 5.20. Custo total para sistemas com adutora de 5.000 metros, em diferentes alturas geométricas e diâmetros, para curva 1, com volume de  $755\text{m}^3/\text{d}$ .

O critério exibido na Figura 5.20 foi utilizado para ponderar sobre os custos de operação, instalação e total para todas as curvas e volumes estudados. Assim, para cada altura geométrica e comprimento, foi selecionado o diâmetro ótimo, cujo custo total era inferior aos demais.

Como a otimização ocorreu para as situações de início e fim de projeto, a escolha do diâmetro ótimo levou em consideração ambas situações. Na prática, o diâmetro adotado deve levar em consideração toda a vida útil de um projeto. Destaca-se que, em geral, apesar de existir um diâmetro cujo custo é menor, existiu uma faixa de diâmetro cuja variação do custo total foi pequena (inferior a 10%).

A avaliação do custo resultou em um diâmetro ótimo para cada um dos volumes avaliados. Estes resultados estão apresentados na Tabela 5.4 e são válidos para as três curvas.

Tabela 5.4. Diâmetros ótimos (menor custo total) para cada um dos volumes avaliados.

Volume (m <sup>3</sup> /d)	Diâmetro ótimo (mm)
755	150
1.231	200
1.511	200
2.463	250
3.777	300
6.157	350
7.555	400
12.315	450

Ainda que os diâmetros sejam análogos para as três curvas, quando o volume de consumo é igual, as vazões bombeadas e, por conseguinte, as velocidades, foram diferentes, pois os valores para o consumo horário, ao longo do dia, são diferentes em cada curva. A análise do custo foi utilizada para determinar o diâmetro ótimo e, com isso, nortear a análise sobre a capacidade do reservatório e os indicadores, já que, a partir disso, as 96 combinações geométricas foram reduzidas para somente 16 (4Hgx4Lx1D).

### 5.3 CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO SUPERIOR

A capacidade dos reservatórios deve ser determinada levando-se em consideração fatores como o volume para atender às variações de consumo de água, volume para combate à incêndios e volume para emergências (TSUTIYA, 2006b). Nesta pesquisa, a capacidade do reservatório foi calculada de forma indireta pelo algoritmo SCE-UA já que a variável de decisão foi o volume contido no reservatório superior a cada intervalo de tempo horário. Além disso, como o limite máximo foi definido igual ao volume consumido em um dia de operação e o limite mínimo foi definido em 0, o algoritmo pode percorrer um amplo espaço de busca durante

o processo de otimização, ou seja, pode-se concluir que a capacidade do reservatório, além da regra de operação, também foi otimizada pelo algoritmo.

A capacidade total do reservatório foi dada a partir do maior valor dentre os calculados pelo algoritmo para um dia de operação, acrescido de 20% para representar os volumes de combate a incêndio e emergência, o que está de acordo com o sugerido na NBR 12217:1994 da ABNT.

O volume do reservatório foi avaliado em função do volume de consumo diário já que Tsutiya (2006b) propõem que o volume deve ser igual ou maior que 1/3 do volume distribuído no dia de consumo máximo. A Figura 5.21 apresenta o volume do reservatório em relação ao volume consumido para as três curvas de consumo estudadas.

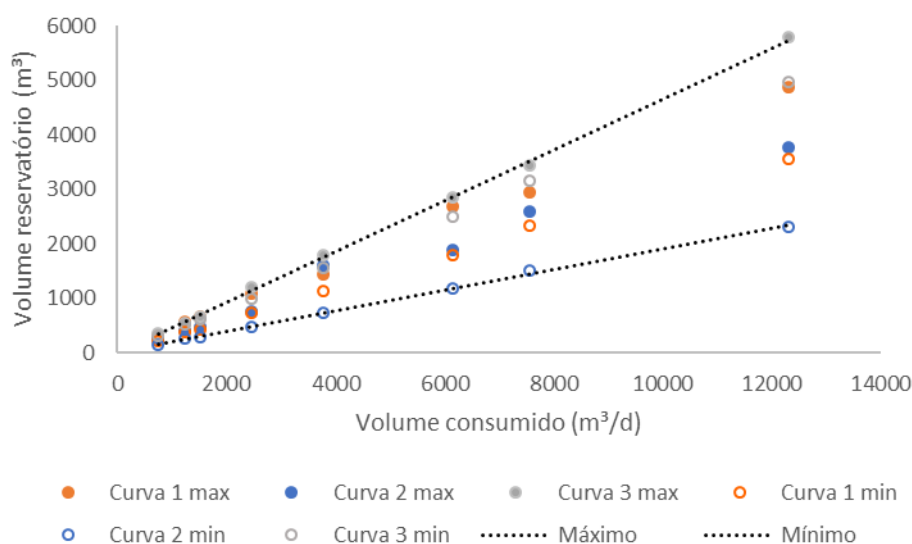


Figura 5.21. Variação do volume do reservatório (m³) em função do volume consumido (m³/d) para as curvas 1, 2 e 3.

Dentre os resultados apresentados, a curva de consumo 3 (FC = 0,43) apresentou os maiores valores enquanto a curva de consumo 2 (FC = 0,80) apresentou os menores valores e isso se deve, provavelmente, ao formato das curvas de consumo.

Tsutiya (2006b) apresenta um método para determinar o volume útil quando se dispõe da curva de consumo através de métodos gráficos, por meio da equação (36) ou pela tabela dos volumes diferenciais.

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q dt - \bar{Q}(t_2 - t_1) \quad (36)$$

Onde:

V = volume de reservação;

Q = vazão consumida;

$\bar{Q}$  = vazão média do dia;

$t_2$  = instante em que o consumo é menor que a vazão fornecida;

$t_1$  = instante em que o consumo é maior que a vazão fornecida;

A partir do exposto na Figura 5.21, constata-se que não só o consumo total, mas também a forma da curva de consumo, influenciaram na capacidade do reservatório superior. As curvas estudadas na pesquisa tiveram sua forma descrita por meio do adimensional fator de consumo (FC) dado pela relação entre os consumos máximo e médio. Os valores para o FC das curvas foram apresentados na Tabela 4.3. A Figura 5.22 apresenta a razão entre o volume do reservatório (VR) e o volume consumido (VC) *versus* o fator de consumo como tentativa de demonstrar a influência da forma da curva de consumo no volume do reservatório.

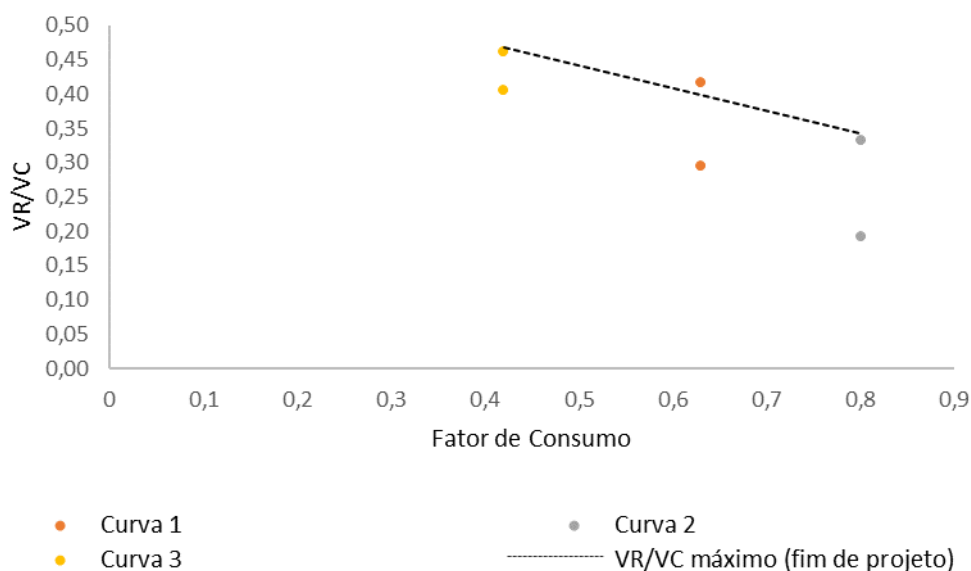


Figura 5.22. Razão entre o volume do reservatório (VR) e o volume consumido (VC) para as curvas 1, 2 e 3 em função do fator de consumo.

Utilizando-se os dados obtidos e os ajustes apresentados nas figuras pode-se determinar a equação (37), cujo coeficiente  $R^2$  foi igual a 0,9985, para cálculo do volume do reservatório (valor máximo e mínimo) e a equação (38), com coeficiente  $R^2$  igual a 0,9463, para estimativa do volume máximo, se o fator de consumo (FC) for conhecido.

$$0,4655 \times VC \leq VR \leq 0,1903 \times VC \quad (37)$$

$$\frac{VR}{VC} = -0,3336 \times FC + 0,6088 \quad (38)$$

Onde:

VR = volume do reservatório ( $m^3$ );

VC = volume consumido ( $m^3/d$ );

FC = fator de consumo (adimensional).

Para ilustrar, se um sistema fosse projetado para atender a um consumo de  $7000m^3/d$ , utilizando a equação (37), o reservatório teria que ter entre  $1332$  e  $3258 m^3$ . Agora, se no mesmo projeto fosse conhecido, além do consumo total, o FC da curva, igual a  $0,7$ , a capacidade do reservatório seria calculada utilizando a equação (38), e seria  $2627 m^3$ .

#### 5.4 INDICADORES

Os indicadores de desempenho presentes na literatura, contemplam de forma superficial o uso da energia elétrica, geralmente por meio do cálculo de consumos específicos (intensidades energéticas) globais. Nessa abordagem, a unidade de análise hidráulica/energética é o próprio sistema, e seus indicadores constituem, na verdade, índices resultantes de inúmeros processos intermediários que fornecem poucos subsídios para o gerenciamento, uma vez que as variáveis associadas ao uso da energia elétrica e da água não são discretizadas (VILANOVA, 2012).

Diante disso, um dos objetivos desta tese é definir valores de referência para índices e indicadores que possam ser utilizados para auxiliar no dimensionamento e análise de projetos de sistemas de bombeamento de água que tenham a eficiência energética como princípio. Logo, para as três curvas, foram calculados e avaliados diversos índices e indicadores centrados nos resultados dos diâmetros ótimos apresentados anteriormente (Tabela 5.4, página 108).

##### 5.4.1 Consumo de energia

O consumo de energia em sistemas reais pode ser obtido por meio das faturas de energia ou com medições em campo, utilizando-se equipamentos como, por exemplo, o analisador de energia portátil que permite a medição, em tempo real, da tensão, corrente, potência, energia, entre outros (GOMES e CARVALHO, 2012).

Nesta pesquisa, foi utilizada uma concepção de sistema de bombeamento genérica com diferentes dimensões geométricas e diferentes curvas de consumo com volumes distintos a serem atendidos em duas situações, início e fim de projeto. Cada curva teve a operação do sistema de bombeamento otimizada por meio da avaliação da função-objetivo, dada pelo custo total (operação + instalação). Como o custo de operação faz parte da função-objetivo, o consumo de energia, por consequência, também faz.



Nas figuras subsequentes, Figura 5.23 e Figura 5.24, estão apresentados os resultados para os consumos de energia mensais médios (kWh/mês) para todas as curvas, volumes, alturas geométricas e comprimentos, para os diâmetros ótimos apresentados na Tabela 5.4. Cada figura apresenta as situações de início e fim de projeto, logo, pode-se observar o aumento do consumo de energia devido ao crescimento do volume consumido e ao envelhecimento da população.

A título de exemplo, na Figura 5.23 (a), o consumo mensal de energia para altura geométrica de 10 metros e comprimento 5.000 metros passou de 2.674 kWh/mês para 3.820 kWh/mês, ou seja, um acréscimo de 43% entre o início e o fim do projeto. Pode-se comparar também a influência do comprimento, por exemplo, o consumo para altura geométrica 100, comprimento 1.000, volume 1.231 m<sup>3</sup>/d foi de 19.176 kWh/mês, e para altura geométrica 100, comprimento 5.000, volume 1.231 m<sup>3</sup>/d foi de 23.151 kWh/mês, isto é, uma diferença de 21% devido à variação do comprimento.

Do mesmo modo, comparando os valores de consumo mensal para altura geométrica de 25 metros, comprimento de 5.000 metros, volume 1.231 m<sup>3</sup>/d e para altura geométrica de 50 metros, comprimento de 5.000 metros, volume 1.231 m<sup>3</sup>/d, observa-se que o consumo passou de 3.820 kWh/mês para 6.529 kWh/mês, o que representou um aumento de 71%.

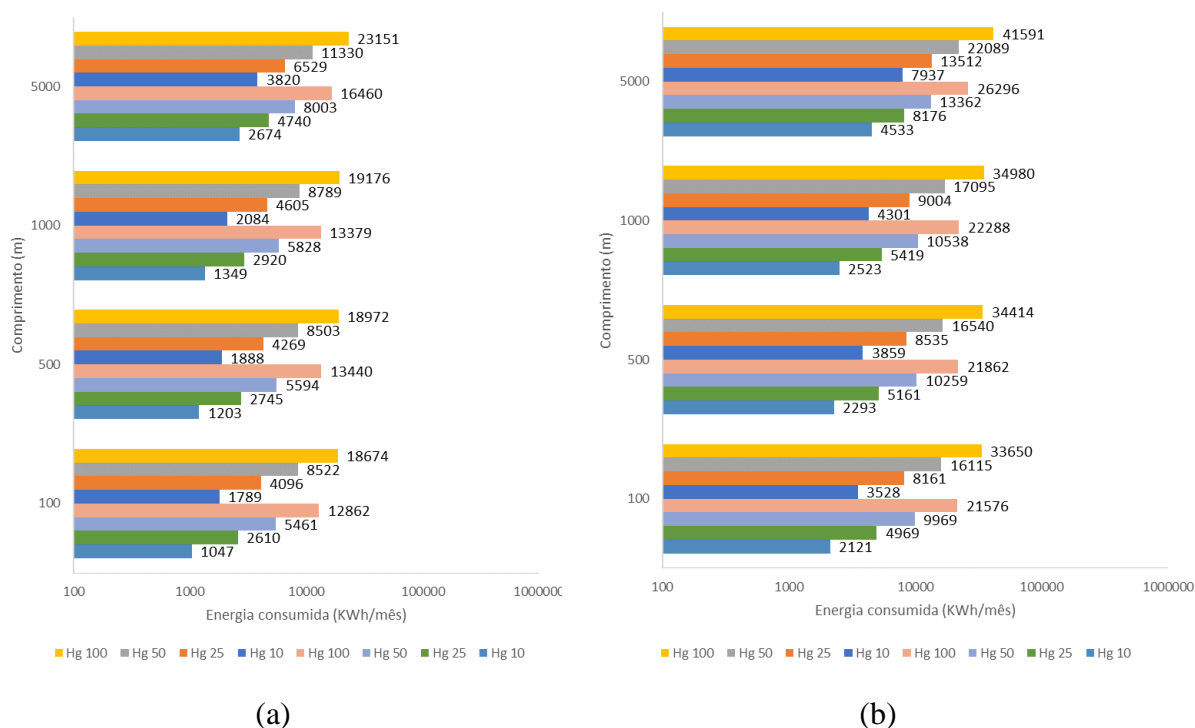


Figura 5.23. Consumo de energia médio (kWh/mês) para as curvas 1, 2 e 3, com volumes de 755 (início) e 1.231 (fim) m<sup>3</sup>/d (a) e 1.511 (início) e 2.463 (fim) m<sup>3</sup>/d (b), para situações com diâmetro ótimo.

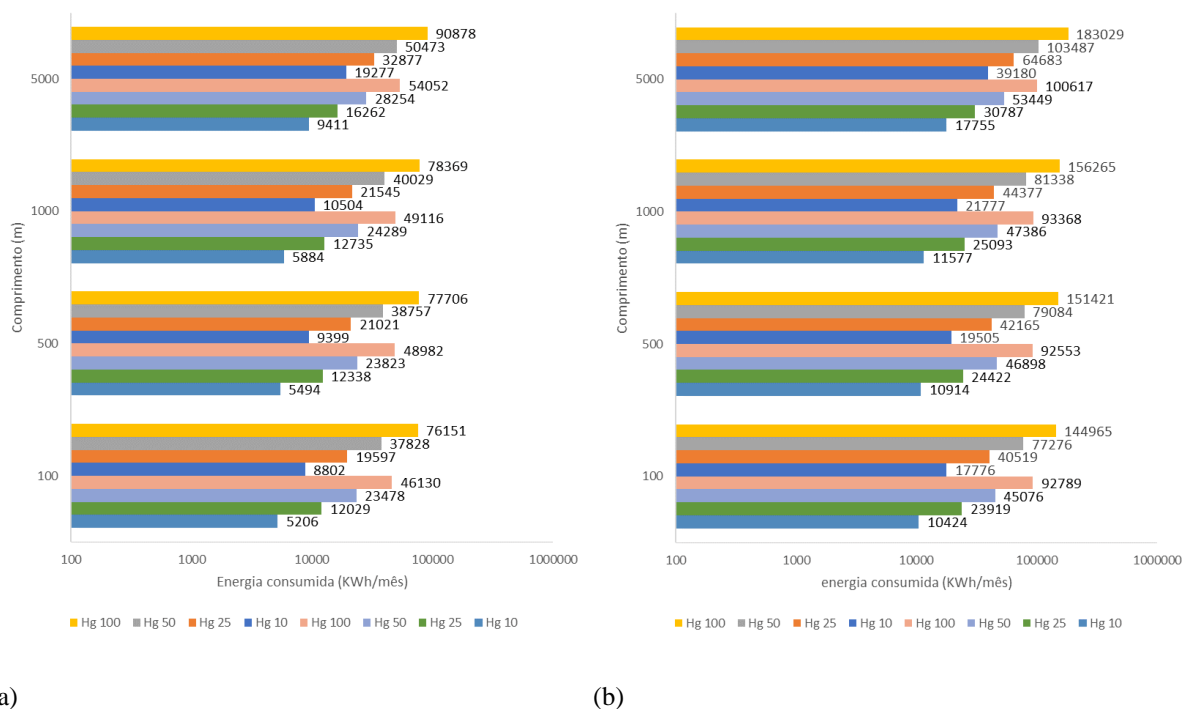


Figura 5.24. Consumo de energia médio (kWh/mês) para as curvas 1, 2 e 3, com volumes de 3.777 (início) e 6.157 (fim)  $\text{m}^3/\text{d}$  (a) e 7.555 (início) e 12.315 (fim)  $\text{m}^3/\text{d}$  (b), para situações com diâmetro ótimo.

A partir do exame dos valores apresentados, constata-se que o consumo de energia cresceu conforme aumenta a altura geométrica, e/ou o comprimento, e/ou o volume da curva de consumo.

A Figura 5.25 mostra a diferença entre o consumo de energia para os cenários de início e fim de projeto. Dentre todos as situações avaliadas, os menores acréscimos foram de 38 e 42% para os menores consumos ( $1.231\text{m}^3/\text{d}$  e  $755\text{m}^3/\text{d}$ ), comprimento de 5.000 metros e altura geométrica de 25 e 10 metros, respectivamente. Já os maiores acréscimos também foram encontrados para este comprimento e alturas geométricas e apresentaram valor de 110 e 121%. Destaca-se que o aumento do consumo de energia se deu em função do crescimento do consumo e também do envelhecimento da tubulação (coeficiente de rugosidade passou de 130 para 105 entre os cenários de início e fim de projeto).

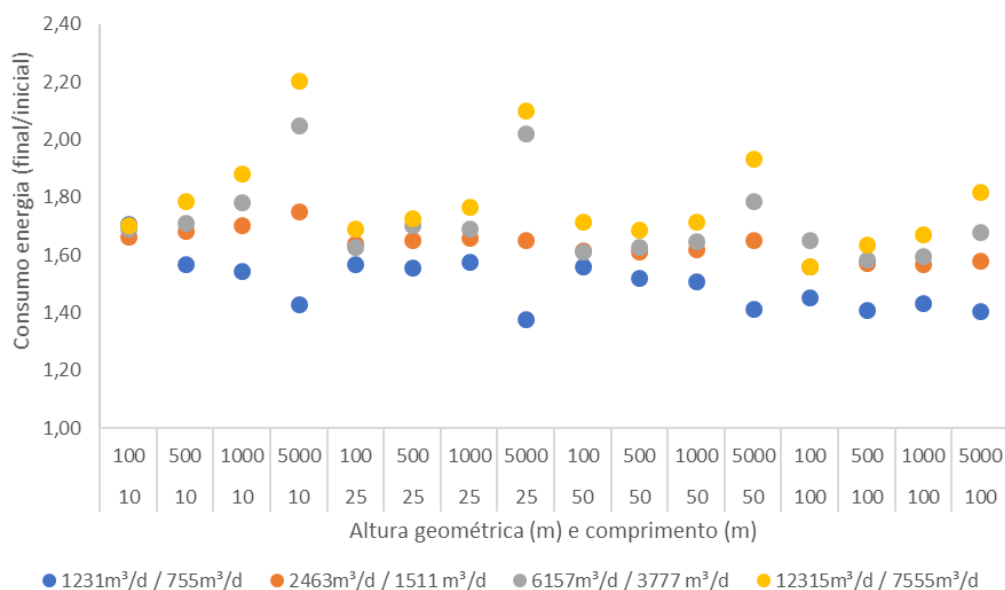


Figura 5.25. Variação entre o consumo de energia mensal para os cenários de início e fim de projeto nas diferentes alturas geométricas e comprimentos avaliados.

Os resultados para esse indicador foram utilizados para complementar a análise de energia mínima realizada na pesquisa e apresentada no capítulo 6.

#### 5.4.2 Consumo específico e consumo específico normalizado

O consumo específico e o consumo específico normalizado são indicadores que expressam a relação entre o consumo de energia e o volume bombeado. Esses indicadores foram calculados para todos os casos estudados nessa pesquisa.

O consumo específico expressa a relação entre o consumo de energia e o volume bombeado, já o consumo específico normalizado representa essa mesma relação, no entanto, trata-se do consumo de energia para elevar  $1\text{m}^3$  de água a 100 metros de altura manométrica. Essa adaptação foi proposta pela *International Water Association* na tentativa de permitir comparações entre sistemas de bombeamento com alturas geométricas distintas (GOMES, 2012).

No Brasil, o único indicador operacional do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), relacionado diretamente à eficiência energética de sistemas de abastecimento de água, é o índice consumo específico (VILANOVA, 2012).

Na Figura 5.26 e Figura 5.27 estão apresentados os resultados para o consumo específico para as situações de início e fim de projeto.

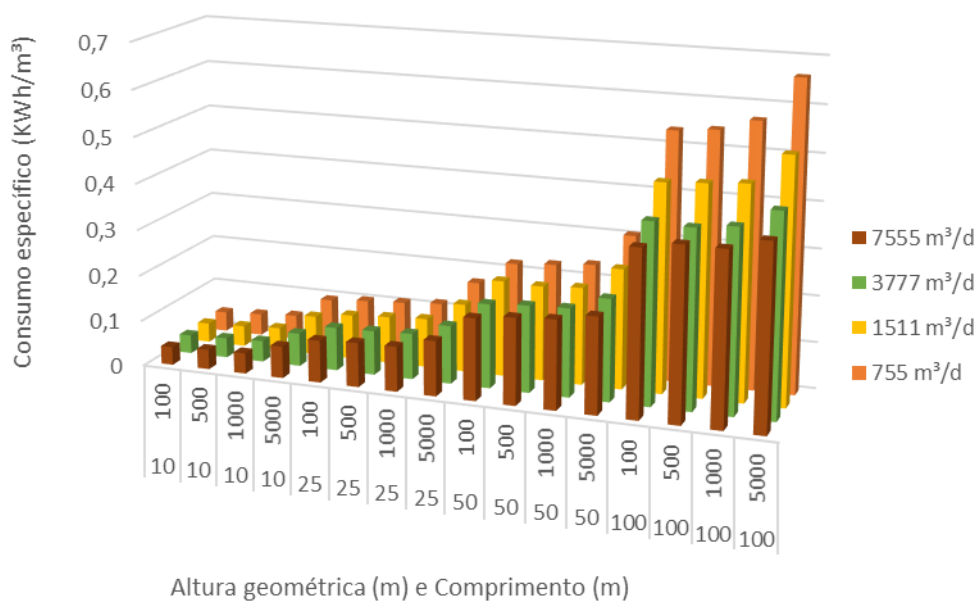


Figura 5.26. Consumo específico (kWh/m<sup>3</sup>) para as situações de início de projeto.

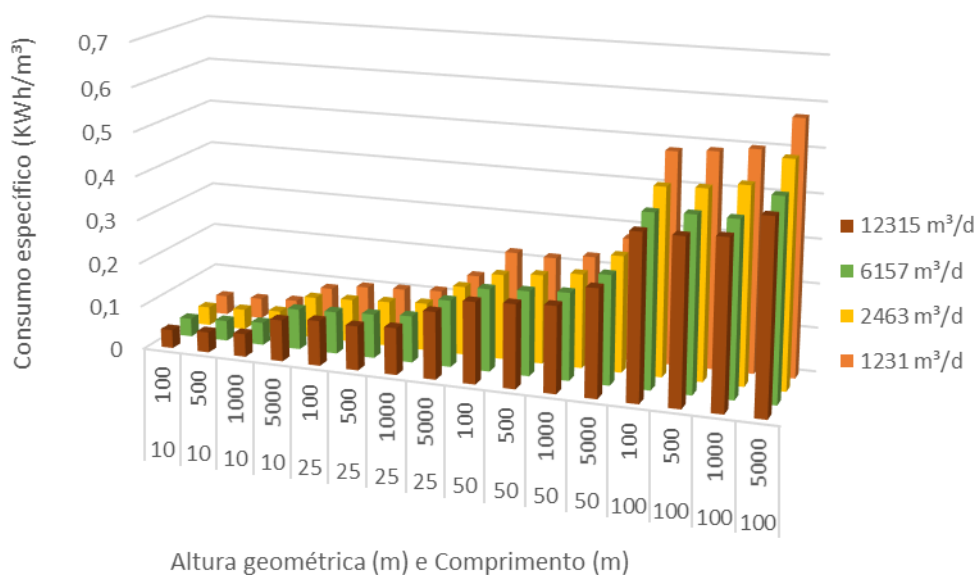


Figura 5.27. Consumo específico (kWh/m<sup>3</sup>) para as situações de final de projeto.

Na a Figura 5.28 e na Figura 5.29 estão apresentados os resultados para o consumo específico normalizado e a classificação para esse indicador, proposta pela Sabesp (2014), que diz que a eficiência energética é considerada ótima para o consumo específico normalizado

entre 0,27 a 0,40, mediana para 0,40 a 0,54 e insatisfatória para consumos maiores que 0,54,. Todos os resultados apresentados estão nas faixas boa ou mediana, o que se justifica por serem resultados para os diâmetros ótimos, com regra de operação otimizada.

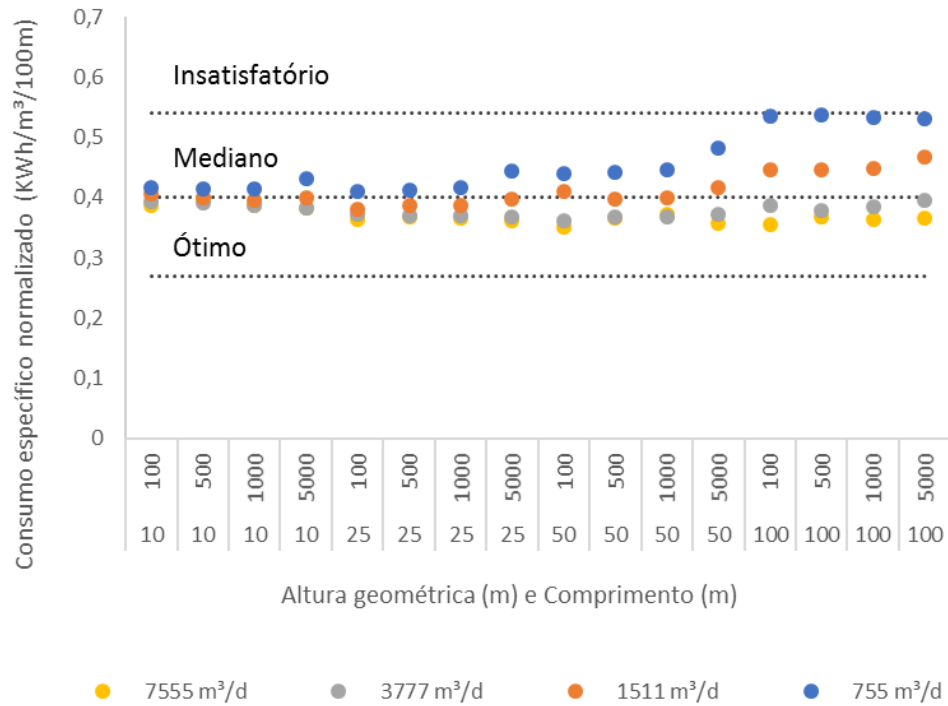


Figura 5.28. Consumo específico normalizado (kWh/m³/100m) para as situações de início de projeto.

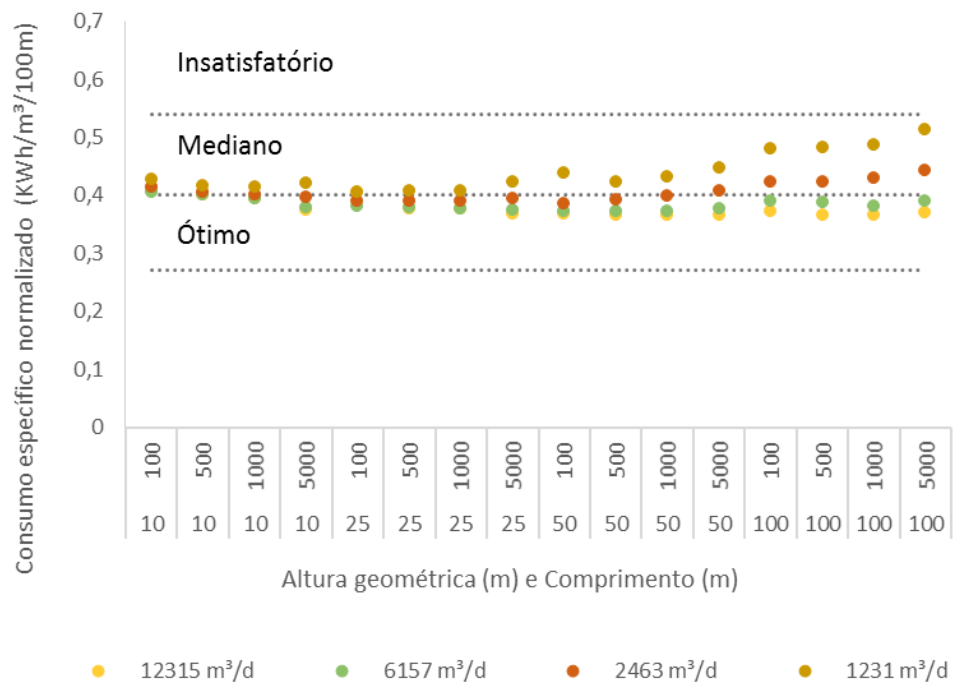


Figura 5.29. Consumo específico normalizado (kWh/m³/100m) para as situações de final de projeto.

Verifica-se que o indicador normalizado apresenta valores mais próximos, variando entre 0,3 e 0,5, ao contrário do outro indicador cujos valores estão entre 0,03 e 0,5, ou seja, o indicador sem a normalização mostra-se ineficiente para a comparação de sistemas com diferentes alturas geométricas.

Ao confrontar os resultados apresentados para os indicadores CE e CEN com os resultados do item anterior, que versou sobre o consumo de energia mensal, observa-se que os casos cujo volume de consumo diário é menor, apesar de apresentarem valor de consumo de energia mensal também menor, apresentam maior valor dos indicadores CE e CEN. Isso ocorre em virtude de que nesses casos o rendimento da bomba foi menor, conforme demonstrado no item 5.4.4.

#### 5.4.3 Vazão nominal

A vazão nominal pode ser considerada a vazão de projeto calculada para o consumo de projeto que deve ser atendido ao longo de toda a vida útil do sistema de bombeamento. Nesta pesquisa, foi adotado que a vazão nominal do sistema atenderia ao início e fim do projeto alterando-se a rotação e, por consequência, a vazão, com uso de conversor de frequência. Assim, a partir das regras de operação otimizada para o início e o fim do projeto foi calculada qual a vazão nominal que atenderia ambas situações, respeitando-se os limites de 70 a 120% de variação da rotação.

A Figura 5.30 apresenta os resultados para as vazões de início e fim de projeto e sua respectiva vazão nominal. O ajuste apresentado resultou na equação (39) que permite calcular a vazão nominal para outros projetos.

$$Q_{nominal} = 0,0696 \times V \quad (39)$$

Onde:

$Q_{nominal}$  = vazão nominal da bomba, em m<sup>3</sup>/h;

V = volume consumido, em m<sup>3</sup>/d.

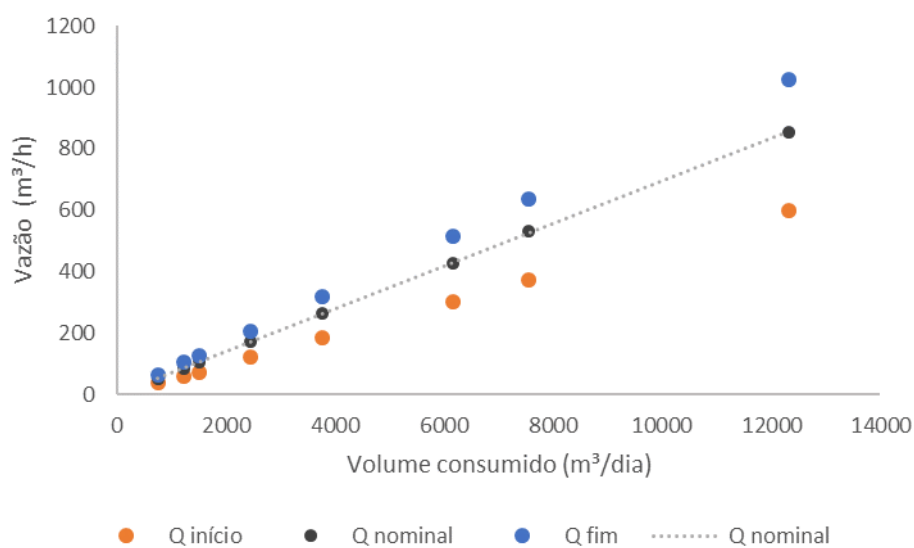


Figura 5.30. Vazão de início e fim de projeto junto a vazão nominal.

O valor obtido com a equação pode ser utilizado como estimativa inicial da vazão nominal em projetos de sistemas de bombeamento e foi utilizada na composição do indicador de energia mínima conforme apresentado no capítulo 6.

#### 5.4.4 Rendimento do conjunto motobomba

O rendimento da bomba e do motor foram calculados por meio das equações (19) e (21). A metodologia proposta na pesquisa calcula o rendimento da bomba a partir da velocidade de rotação específica que, por sua vez, é função da vazão e da altura manométrica nominais.

Os rendimentos apresentados na Figura 5.31 exemplificam o comportamento dessa variável em função do volume (e por consequência, vazão), comprimento e altura geométrica. Observa-se que, comparando-se os rendimentos entre os diferentes volumes, os maiores valores se encontram para o maior volume, quando a vazão bombeada é maior, ou seja, a velocidade de rotação específica também é maior. Já para uma série de mesmo volume, a vazão bombeada não varia tanto quanto a altura manométrica já que os valores de altura geométrica e comprimento se alteram. Nesses casos, os melhores rendimentos se encontram para os casos com menor altura geométrica, que resultaram em menor altura manométrica e maior velocidade de rotação específica.

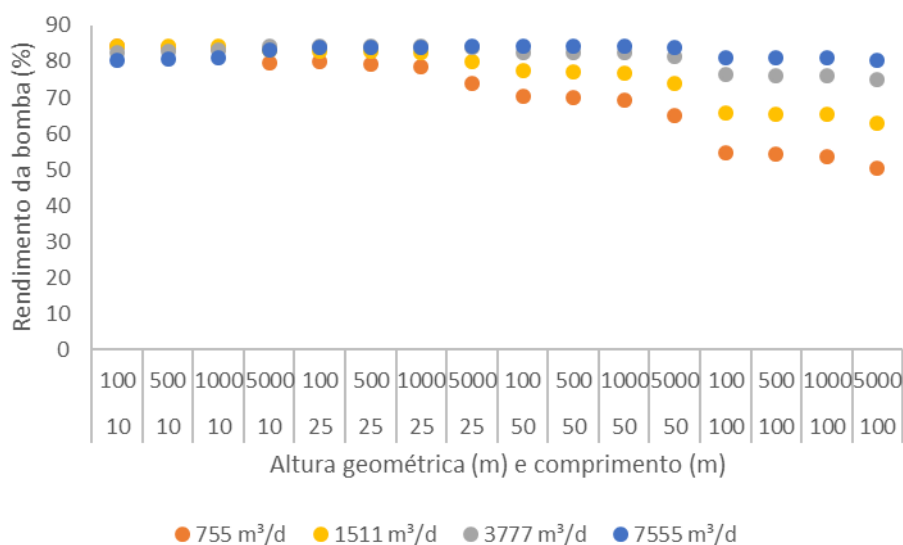


Figura 5.31. Rendimentos da bomba, estimados a partir da metodologia desenvolvida nesta pesquisa.

Dentre os resultados para o rendimento da bomba o menor valor encontrado foi 50,5% para o sistema com altura geométrica 100 metros, comprimento 5.000 metros e volume 755 m<sup>3</sup>/d. Assim, pode-se observar que as situações de menor volume de consumo diário foram as que apresentaram os menores rendimentos, fato que justifica os resultados para o consumo específico e o consumo específico normalizado piores nesses casos do que nas situações de maior volume. Ainda, destaca-se que o maior rendimento foi de 84%, consoante ao previsto na literatura para rendimento máximo de bombas centrífugas (Macintyre, 1987).

A metodologia proposta para cálculo do rendimento do motor calcula-o a partir do valor da potência motriz. Os valores calculados para o rendimento do motor estão apresentados na Figura 5.32 onde é possível verificar uma variação de 82 a 94%.



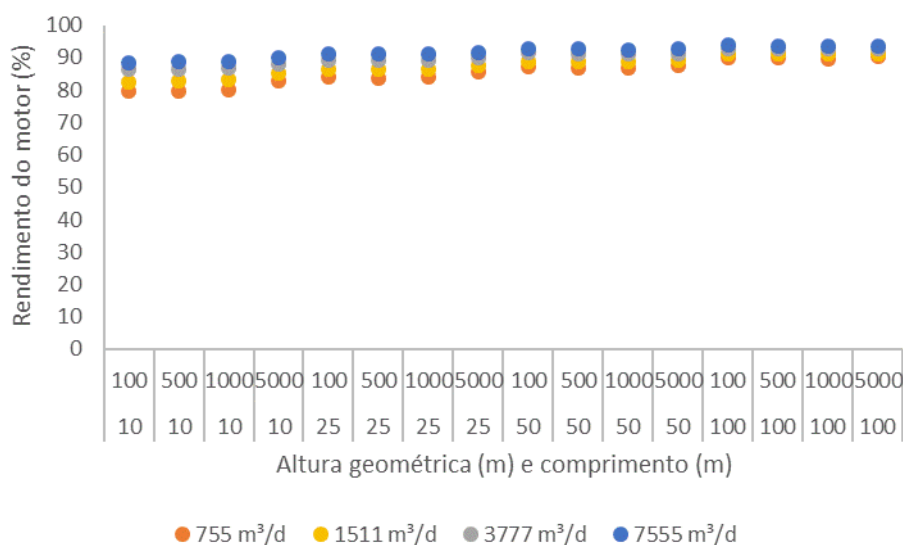


Figura 5.32. Rendimentos do motor, estimados a partir da metodologia desenvolvida nesta pesquisa

Ao contrário do rendimento da bomba, o rendimento do motor manteve valores com menor variação. Nesse sentido, Gomes (2012) afirma que, enquanto os rendimentos de bombas de grande porte podem atingir valores superiores a 85% e pequenas unidades podem chegar a menos de 40%, os motores elétricos são máquinas bastante eficientes, cujos rendimentos estão normalmente próximos a 90%.

#### 5.4.5 Velocidade máxima e mínima

A velocidade do escoamento pode ser utilizada como critério de dimensionamento em sistemas de abastecimento de água. Segundo a ABNT NBR 12214:1992, a velocidade no barrilete deve ser de no mínimo 0,6m/s e no máximo 3m/s.

As velocidades foram calculadas a partir da regra de operação otimizada para cada um dos casos estudados. Os resultados apresentados nesse item são para os diâmetros cuja diferença de custo total foi inferior a 10% em relação ao resultado do diâmetro imediatamente superior ou inferior. Esse critério para a análise do diâmetro com menor custo foi utilizado para ampliar a faixa de diâmetros adotados na etapa de estimativa inicial de projeto. Além disso, retrata uma avaliação da sensibilidade dos resultados da velocidade e do diâmetro à variação do custo total.

Os valores de velocidade foram relacionados a um coeficiente adimensional dado pela relação entre o comprimento da tubulação e a altura geométrica do sistema ( $L/Hg$ ), na tentativa de criar indicadores que possam ser propostos como regra em projetos futuros, conforme apresentado na Figura 5.33. A adimensionalização de grandezas é bastante difundida, pois viabiliza a comparação dessas em situações variadas, o que não é possível quando se observam

apenas os valores absolutos. As velocidades máximas e mínimas foram calculadas para o início e fim de projeto.

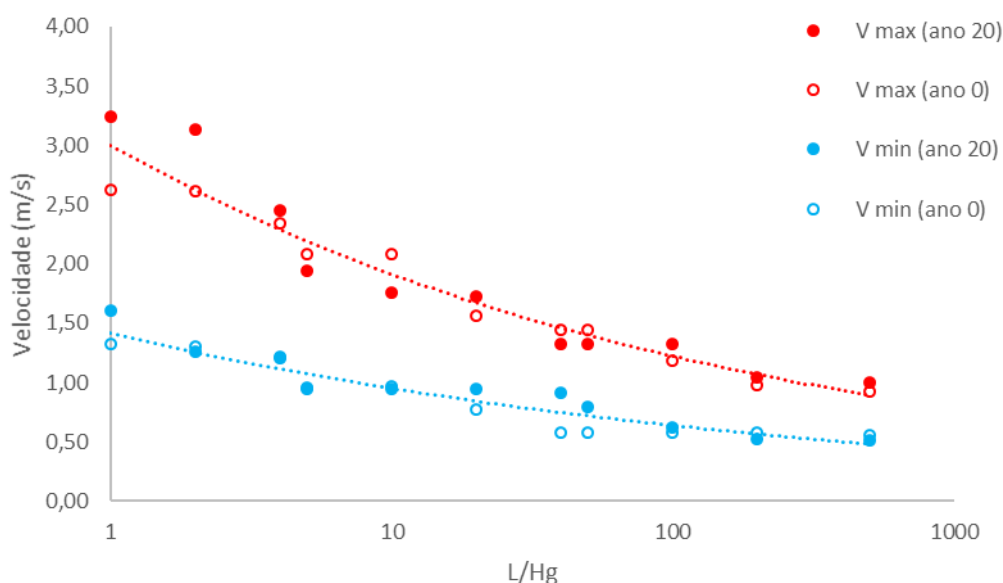


Figura 5.33. Velocidade máxima e mínima em função do adimensional L/Hg.

Nota-se que os valores mínimos e máximos, apresentados na Figura 5.33, respeitam os valores propostos pela norma (0,6 a 3 m/s) com a vantagem de relacionar a velocidade a outros aspectos geométricos do sistema (comprimento e altura geométrica). Assim, conclui-se que para sistemas com menor comprimento, a velocidade poderia assumir valores maiores, já que a perda de carga seria menos expressiva e, portanto, teria menor importância nos custos de operação. Já nos sistemas com maior comprimento, a velocidade deve ser menor, inclusive a faixa entre a velocidade máxima e mínima, indicada na Figura 5.33, é mais restrita nesses casos.

A partir do ajuste dos pontos foram obtidas as equações (40) e (41) que permitem calcular as velocidades máxima e mínima, respectivamente.

$$v_{\max} \approx 2,99961 \times \frac{L}{Hg}^{-0,184} \quad (40)$$

$$v_{\min} \approx 1,41155 \times \frac{L}{Hg}^{-0,184} \quad (41)$$

A literatura apresenta diversas indicações sobre a velocidade de escoamento em sistemas de abastecimento de água. Em sistemas de distribuição de água em geral, Granados (1990) admite valores de velocidades máximas de até 2m/s para diâmetros menores ou iguais a 250mm, para os diâmetros entre 300 e 1000 recomenda velocidades entre 2,1 e 3m/s e para os

diâmetros acima de 1000 propõe que a velocidade máxima seja igual a  $2+D$ , para  $D$  em metros. Clement e Gallant (1986) *apud* Formiga (1999) recomendam valores entre 1,8 e 3m/s, enquanto Walski (1985) admite velocidades máximas menores que 2,4m/s na hora de pico da vazão em sistemas de abastecimento urbano. Alzamoea e Tárrega (1987) propõe velocidades entre 0,6 e 2,25m/s. A metodologia desenvolvida nesta pesquisa complementa essas faixas de variação, pois relaciona a velocidade ao adimensional  $L/Hg$  o que facilita sua utilização como critério de eficiência energética.

Além do critério da velocidade do escoamento, o diâmetro de uma linha adutora pode ser determinado pela fórmula de Bresse. Assim, para os cenários estudados, onde se obteve o diâmetro pelo critério do menor custo, foi calculado o valor do coeficiente  $K$ , da fórmula de Bresse, que resultaria nesse diâmetro, a partir da vazão nominal de cada caso, conforme apresentado na Figura 5.34, onde pode-se observar que o valor de  $K$  não é constante e variou entre 0,7 e 1,4.

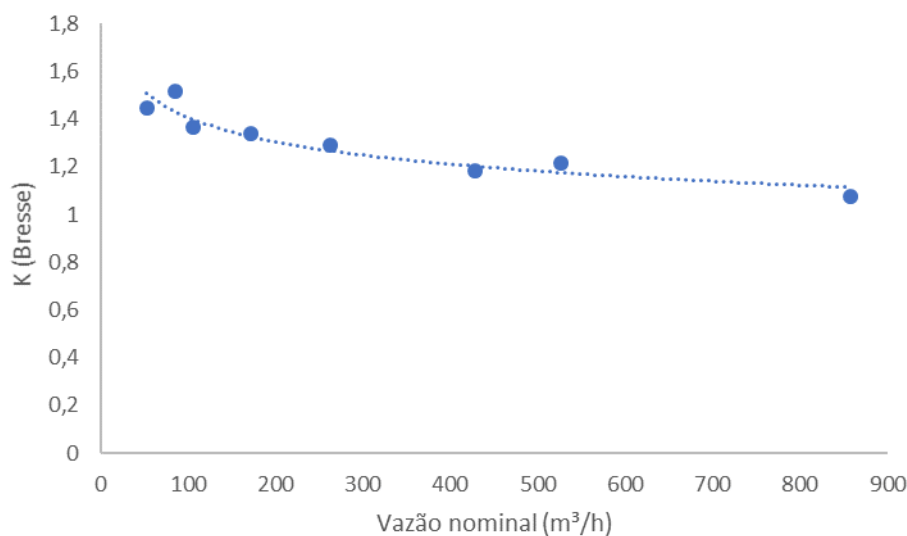


Figura 5.34. Coeficiente  $K$  de Bresse calculado para os diâmetros ótimos adotados na pesquisa.

Azevedo Netto (1998) apresenta limites para velocidade entre 0,57 e 2,60 m/s e para o coeficiente  $K$  entre 0,7 e 1,5. Similarmente, os limites para o coeficiente  $K$ , foram 0,7 e 1,4. A literatura indica que a escolha do coeficiente  $K$  deve ser feita a partir da experiência do projetista e precisa considerar fatores econômicos da operação e instalação do sistema.

As faixas de velocidade foram utilizadas para calcular os diâmetros máximo e mínimo para determinada vazão de bombeamento. Posteriormente, foram calculados os valores do coeficiente  $K$ , de modo a relacionar esse coeficiente ao adimensional  $L/Hg$  e, com isso, facilitar sua escolha. Essa comparação está apresentada na Figura 5.35.

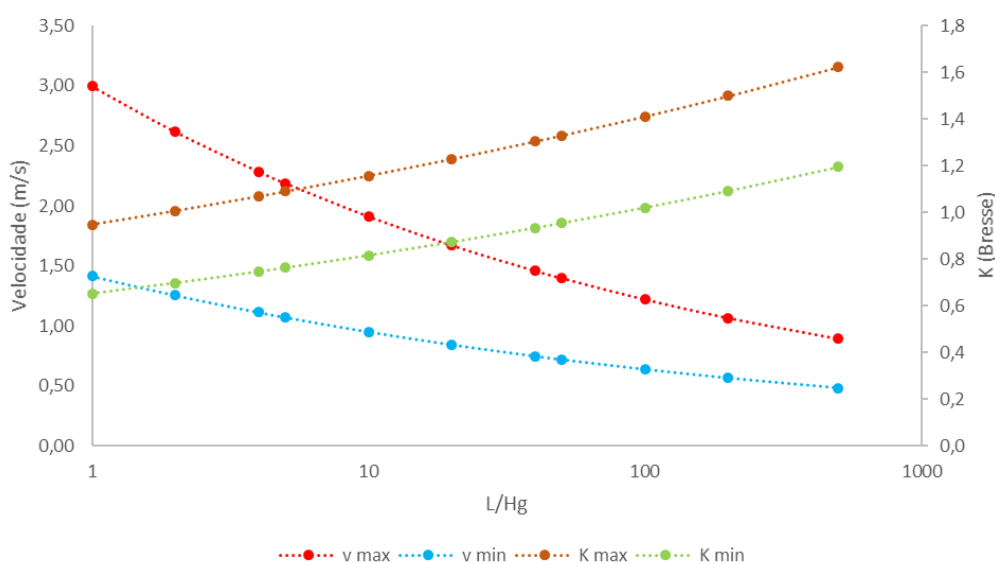


Figura 5.35. Velocidade máxima e mínima com seu respectivo coeficiente K, de Bresse, em função do adimensional L/Hg.

Com o objetivo de analisar o comportamento do coeficiente K em relação às várias possibilidades de operação e implantação de instalações de recalque, Bezerra et al. (2005) realizaram um estudo comparativo de dimensionamento entre seis elevatórias através da fórmula de Bresse, variando-se o valor de K. Os autores encontraram valores situados entre 1,0 e 1,3, diferindo do intervalo citado, normalmente, na literatura (compreendido entre 0,7 e 1,5) e concluíram que para os casos estudados a amplitude de variação do valor de “K” é menor que a indicada na literatura. As conclusões dos autores corroboram o proposto na Figura 5.35 que mostra que o coeficiente K precisa ser escolhido com parcimônia para cada sistema.

Para exemplificar a utilização da faixa de velocidades para o dimensionamento da tubulação foi calculada a faixa de diâmetro indicada para uma vazão de bombeamento igual a 250m<sup>3</sup>/h. Os resultados estão apresentados na Figura 5.36.

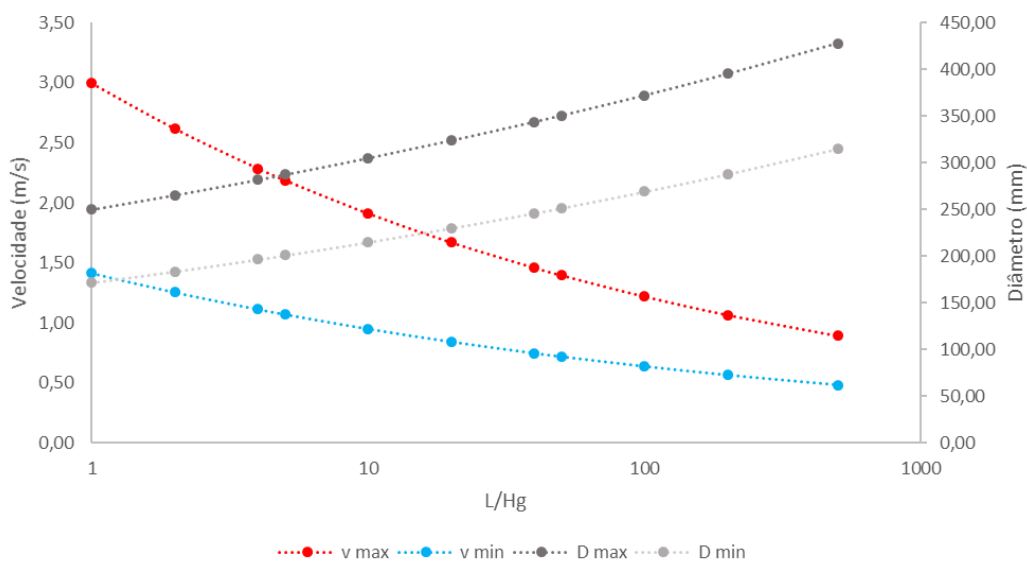


Figura 5.36. Velocidade mínima e máxima e seus respectivos diâmetros para uma vazão de bombeamento de 250 m<sup>3</sup>/h.

Para o caso apresentado na Figura 5.36, se um sistema tivesse comprimento de 100 metros e altura geométrica de 10 metros o diâmetro deveria estar entre 215,03 e 305,02 mm ou, em valores comerciais, 250 e 350 mm. Já para um sistema cujo comprimento fosse 1000, o diâmetro deveria estar entre 269,15 e 372,25 mm, ou, 300 e 400 mm.

Ainda para o mesmo exemplo, o diâmetro de recalque poderia ser calculado pela fórmula de Forchheimer (equação (13), página 36). A vazão de bombeamento de 250 m<sup>3</sup>/h, aduzida continuamente ao longo do dia, foi transformada para 285,7 m<sup>3</sup>/h, para adução ao longo de 21 horas (excluindo-se período de ponta) e o diâmetro de recalque calculado foi de 354 mm. Esse valor poderia ser adequado e inclusive é análogo ao calculado anteriormente, para linha adutora de 1000 metros, contudo, poderia estar superdimensionado caso o comprimento fosse inferior. Ou seja, apesar de sua simples utilização, o método não traz consigo considerações sobre os custos e/ou consumo de energia. Por outro lado, o método desenvolvido, que utiliza o critério da velocidade máxima e mínima em conjunto ao adimensional L/Hg permite que o diâmetro seja estabelecido de forma mais cautelosa e segura.

#### 5.4.6 Perda de carga

A perda de carga em sistemas de bombeamento é função da vazão bombeada, do comprimento, diâmetro e material da tubulação. Na prática, representa a energia que se perde com o escoamento.

A definição do traçado e dimensionamento da tubulação, escolha do material e da vazão nominal de bombeamento são feitas por meio de critérios de projeto estabelecidos em normas,

e também, advindos da experiência do profissional responsável, no entanto, podem ser bastante esparsos, dificultando estas definições, por exemplo, a velocidade no barrilete pode estar entre 0,5 e 3m/s, ou seja, não representa um critério otimizado.

Essas escolhas influenciam muito nos custos de operação e instalação dos sistemas. A eficiência hidroenergética nem sempre está em pauta nos projetos, o que leva a existência de sistemas ineficientes, onerosos e até ineficazes, quando há, por exemplo, restrições no abastecimento.

A perda de carga compõe a altura manométrica, dada pela soma desta com a altura geométrica. Logo, quanto maior a perda de carga, maior a potência que deve ser instalada e, conseqüentemente, mais energia é gasta no bombeamento e maior o custo de operação.

Para ampliar as possibilidades de análise, a perda de carga foi calculada como um percentual da altura geométrica e relacionada com o adimensional dado pela razão entre o comprimento da tubulação e a altura geométrica do sistema, análogo ao que foi proposto para análise da velocidade.

Ressalta-se que a perda de carga foi calculada para cada curva, volume e combinação geométrica de dimensionamento. Foram avaliados os resultados para os diâmetros ótimos de cada curva e volume (Tabela 5.4). Além disso, tem-se os resultados para início e fim de projeto. Assim, os resultados apresentados nesse item são resultantes da seguinte sequência de cálculos: média entre os valores de perda de carga de cada curva para situações análogas de volume, altura geométrica, comprimento e diâmetros; definição dos valores máximos e mínimos, dentre os valores médios, para os anos 0 e 20.

Os resultados para perda de carga percentual, em função do adimensional  $L/Hg$ , estão apresentados na Figura 5.37.

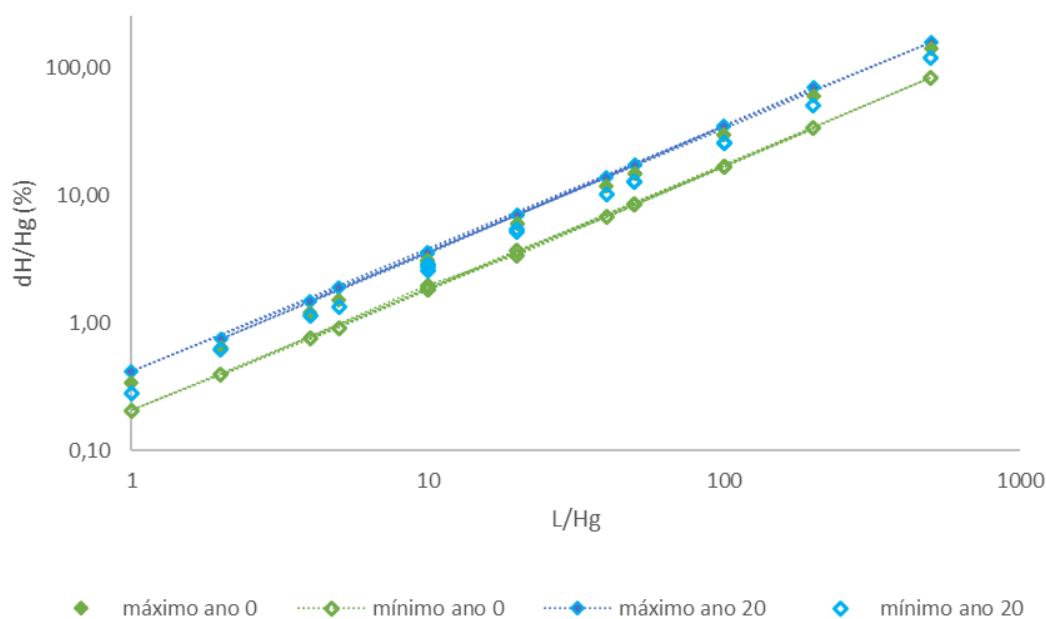


Figura 5.37. Perda de carga como percentual da altura geométrica em função do adimensional L/Hg.

Foram ajustadas as equações (42) e (43) que permitem calcular a perda de carga (%), máxima e mínima, a partir do adimensional L/Hg.

$$\frac{dH}{Hg} \max(\%) = 0,39 \times \frac{L}{Hg}^{0,9696} \quad (42)$$

$$\frac{dH}{Hg} \min(\%) = 0,2 \times \frac{L}{Hg}^{0,9696} \quad (43)$$

Para exemplificar, supõe-se um sistema com comprimento 1000 metros e altura geométrica 10 metros. A perda de carga poderia estar entre 18% e 34% da sua altura geométrica, ou seja, 1,8 a 3,4 metros.

#### 5.4.7 Operação do bombeamento no período de ponta

A relação entre a altura manométrica e a altura geométrica foi utilizada para elucidar sobre quais casos a regra de operação otimizada, determinada pelo algoritmo SCE-UA, indicou que o bombeamento no período de ponta não fosse desligado, como apresentado na Figura 5.6, Figura 5.8 e Figura 5.10. Anteriormente, foram apresentados os resultados para todas as opções geométricas avaliadas (786 casos para cada curva), contudo, a análise desse índice pode ser feita apenas para os casos com diâmetro ótimo (Tabela 5.4) definido a partir da análise de custo apresentada no item 5.2. Assim, para cada curva, tem-se 16 casos ótimos (4Hg x 4L x 1D). Como foram avaliados 4 volumes para curva em situação de início e fim de projeto, tem-se 128 casos (16 x 4V x 2).

Na Figura 5.38 estão apresentados os valores da altura manométrica adimensional e da relação entre o bombeamento na ponta ( $Q_{\text{ponta}}$ ) e a vazão nominal ( $Q_{\text{nominal}}$ ), para os casos com diâmetro ótimo.

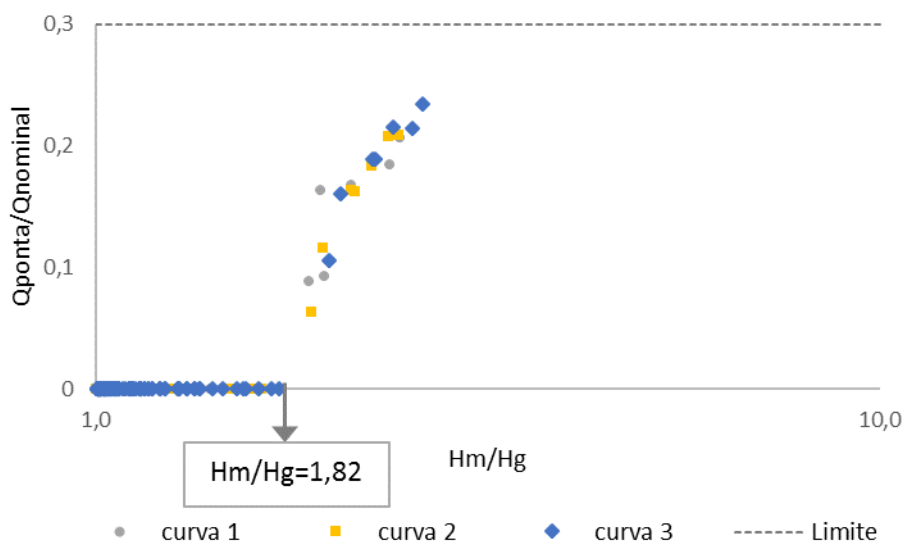


Figura 5.38. Avaliação do bombeamento no período de ponta em função do indicador  $Hm/Hg$  para os casos otimizados das três curvas.

Observa-se que, para os casos otimizados, o bombeamento no período de ponta ocorre para a minoria dos sistemas. Para cada curva, foi indicado desligamento do bombeamento para 95,3% dos casos, enquanto que, na análise com todos os resultados, esse valor foi de 85%. Isso ocorre porque, nos sistemas com diâmetro ótimo, a perda de carga também pode ser considerada otimizada, ou seja, não existem tantos sistemas com perda de carga excessiva. Em todas as curvas o bombeamento na ponta ocorreu para altura geométrica de 10 metros e comprimento de 5.000 metros, ou seja,  $L/Hg = 500$ , como apresentado na Figura 5.39.

É possível afirmar que para  $L/Hg < 200$  não há indicação de bombeamento no período de ponta e, para  $L/Hg > 500$ , a regra de operação otimizada aponta para o bombeamento nesse período, contudo, para  $200 < L/Hg < 500$  não foram feitas avaliações, logo, não se pode afirmar sobre a situação do bombeamento durante o período de ponta nessas situações.



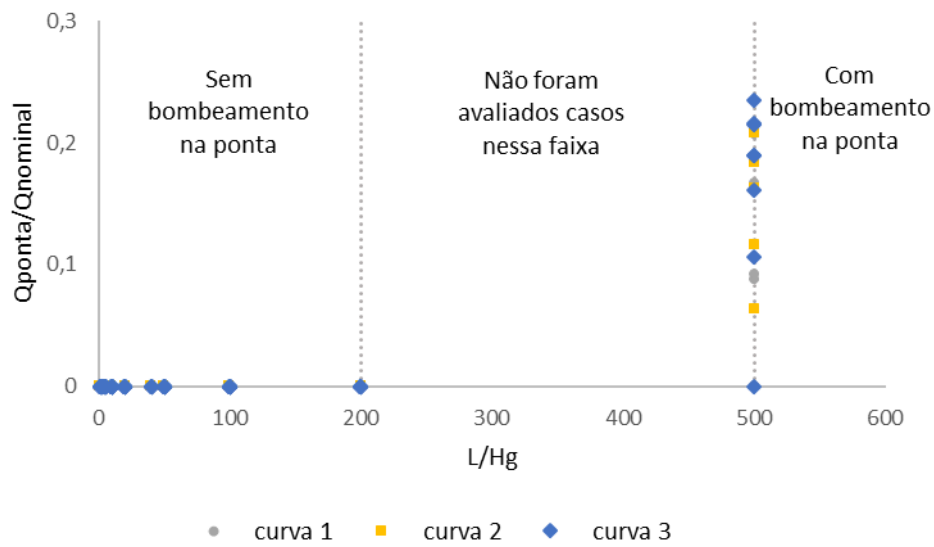


Figura 5.39. Operação do bombeamento no período de ponta em função do adimensional  $L/Hg$ .

Todos os resultados apresentados neste capítulo foram utilizados para estabelecer o indicador de energia mínima apresentado no capítulo 6 e utilizado em duas situações: avaliação da eficiência energética de projetos de sistemas de bombeamento e diagnóstico de operação de sistemas de bombeamento existentes.

## 6 ENERGIA MÍNIMA

A análise de eficiência hidroenergética pode ser bastante complexa, principalmente pela grande quantidade de grandezas que compõem os sistemas e pela diversidade de dimensões que estas grandezas podem assumir. Contudo, apesar de complexa, esta análise precisa ser realizada para nortear a escolha das medidas de economia de energia que podem ser empregadas, conforme descrito no item 3.4.

Segundo Gomes e Carvalho (2012) o diagnóstico hidroenergético pode ser realizado para definir as ações de eficiência a serem implantadas e os estudos que serão executados em determinado sistema de saneamento para sua melhoria e tem por finalidade detectar pontos de desperdício de energia elétrica e perdas de água, indicando as soluções, custos de implantação das medidas e ganhos financeiros e energéticos obtidos, além de reduzir o consumo de eletricidade, perdas de água e, conseqüentemente, seus custos, sem interferir na qualidade da produção.

No entanto, mesmo com a realização do diagnóstico hidroenergético, pode ser difícil inferir sobre a eficiência do sistema, pois é preciso definir a linha base, referência para metas e objetivos no que diz respeito às boas práticas, visando uso racional de água e energia elétrica. Para defini-la, é necessária a utilização de indicadores de desempenho, provenientes da sistematização de dados brutos gerados no monitoramento hidroenergético.

O conceito de energia mínima foi proposto nesta pesquisa com objetivo similar ao da linha base, ou seja, para demonstrar a mínima energia que um sistema de bombeamento pode consumir, e a partir disso, juntamente com a avaliação das condições hidroenergéticas do sistema, estabelecer um indicador de eficiência.

A energia consumida por um sistema de abastecimento é dada pela equação (44). Se todos as grandezas da equação forem estabelecidas a partir de critérios de otimização, pode-se dizer que a energia calculada é a energia mínima que o sistema de bombeamento irá consumir com seu funcionamento.

$$E_{\min} = \frac{\gamma \times Q_b \times Hm}{\eta_{bomba} \times \eta_{motor}} \times \Delta t \quad (44)$$

Onde:

$E_{\min}$  = energia mínima consumida pelo sistema (kWh);

$\gamma$  = peso específico da água (N/m<sup>3</sup>);

$Q_b$  = vazão nominal otimizada (m<sup>3</sup>/s);

$Hm$  = altura manométrica nominal otimizada (m);

$\eta_{\text{bomba}}$  = rendimento máximo da bomba;

$\eta_{\text{motor}}$  = rendimento máximo do motor;

$\Delta t$  = tempo de bombeamento otimizado (h).

Assim, a energia mínima de um sistema é aquela obtida quando as grandezas da equação (44) foram escolhidas, dimensionadas ou estabelecidas utilizando critérios de eficiência hidroenergética. Nesta pesquisa a energia mínima foi calculada utilizando as equações apresentadas no item 4.5, página 69, para estimativa dos rendimentos do motor e da bomba, e item 5.4, página 111, para estimativa das velocidades e diâmetros, vazão nominal, perda de carga e altura manométrica. O fluxograma da Figura 6.1 apresenta a sequência de cálculos e equações utilizadas para a obtenção da energia mínima de um sistema.

Vilanova (2012) também discorre sobre a análise de eficiência energética de sistemas de bombeamento. Para o autor, essa análise pode ser relativa (comparação entre sistemas semelhantes) e absoluta (nível de eficiência individual de cada sistema, em relação à sua condição ótima). No caso da eficiência relativa, um valor alvo pode ser representado por um *benchmark*, a partir do momento em que se opta por buscar os mesmos níveis de eficiência de outro sistema, considerado referência em determinado indicador. Em termos absolutos, o valor alvo relaciona-se à sua otimização tecnológica e operativa, como por exemplo, o uso de equipamentos eficientes, implantação de regras operativas ótimas e eliminação de desperdícios através de correta manutenção preventiva e corretiva. A análise absoluta de eficiência, proposta pelo autor, é consoante à análise da energia mínima proposta nesta pesquisa.

Duarte et al. (2008) apresenta o indicador denominado E3 – excedente de energia no sistema, dado pela razão entre a energia fornecida e a energia mínima, e que pode ser aplicado em sistemas de adução cujos pontos de abastecimento se encontram em diferentes cotas topográficas. Para esses autores, a energia mínima é aquela consumida para abastecer os pontos da rede com a pressão mínima requerida, de modo a satisfazer os respectivos consumos (excluindo as perdas). Entretanto, os autores não consideram o rendimento dos conjuntos motobomba no cálculo do indicador, nem nenhum critério de otimização das perdas de carga (velocidade e diâmetros otimizados). Com isso, percebe-se que a abordagem para determinação da energia mínima proposta por Duarte et al. (2008) é bastante diferente da abordagem desenvolvida nesta pesquisa, centrada no sistema de bombeamento e que considera critérios de otimização para todas as variáveis envolvidas na determinação da energia consumida por esses sistemas.

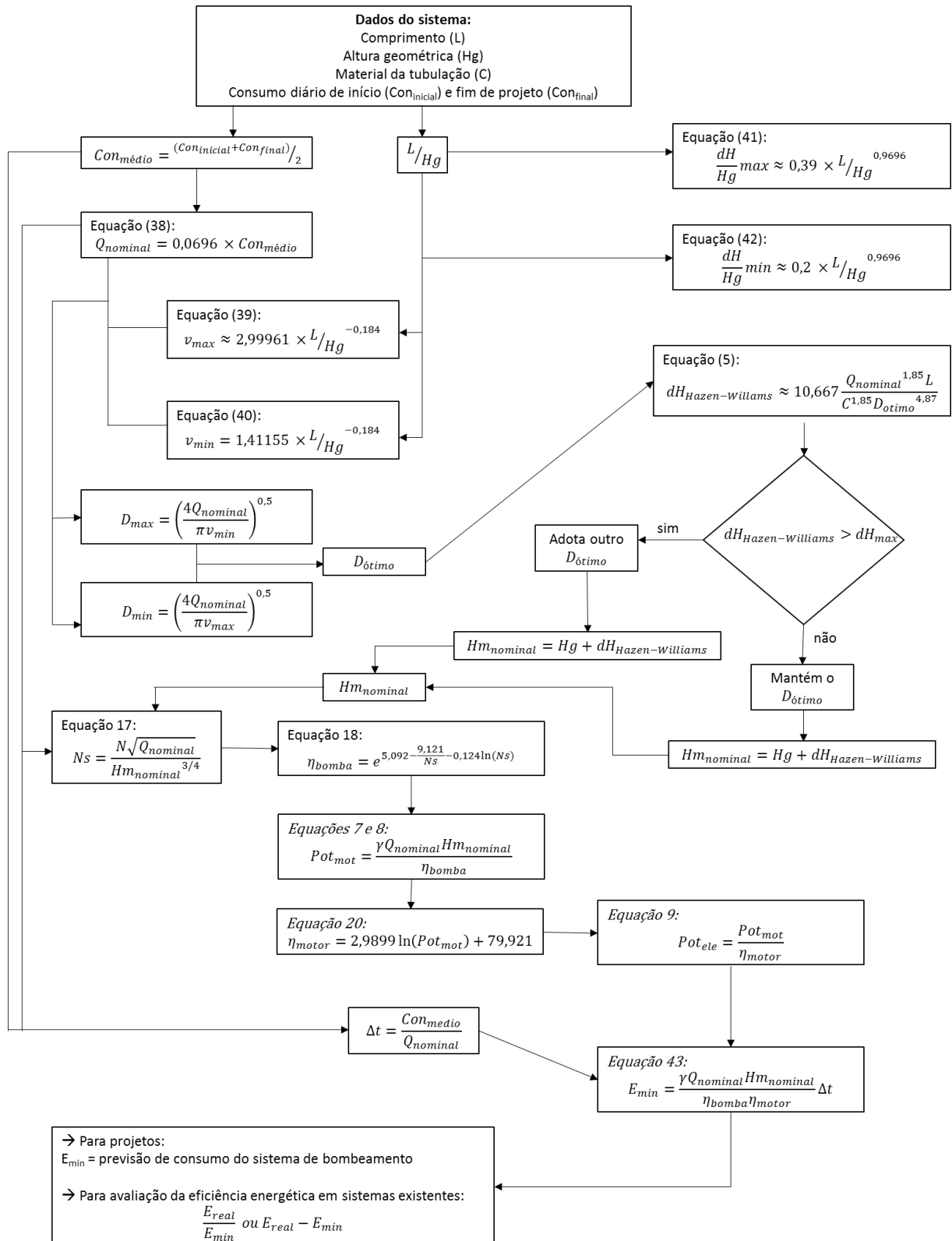


Figura 6.1. Fluxograma para cálculo da energia mínima de um sistema de bombeamento qualquer.

A energia mínima calculada pela equação (44) pode ser comparada ao indicador de consumo de energia (kWh/mês) obtido com o modelo de simulação acoplado ao algoritmo de

otimização. Ambos foram utilizados como critério para análise dos estudos de caso realizados na pesquisa.

Ressalta-se que energia mínima significa menor consumo de energia em kWh, no entanto, este consumo pode estar com custo mais ou menos elevado em virtude da modalidade tarifária e do modo como se dá a operação (com ou sem operação no período de ponta, por exemplo). Ou seja, o indicador de energia mínima (kWh) é diferente de um indicador de custo mínimo (R\$).

Também, destaca-se que a energia mínima pode ser calculada para duas situações: fase de projeto do sistema de bombeamento e diagnóstico de sistemas existentes. Para a aplicação como diagnóstico em sistemas existentes a metodologia da Figura 6.1 é aplicada de forma adaptada já que, como o sistema já está instalado, não é possível escolher um diâmetro otimizado.

Na fase do projeto, os termos da equação (44) podem ser estimados para fornecer uma previsão de quanto será dispendido com a operação do sistema de bombeamento. Essa informação pode ser útil durante os estudos de concepção, onde são estudados diferentes arranjos, sob os pontos de vista qualitativo e quantitativo, das diferentes partes de um sistema, organizadas de modo a formarem um todo integrado, para a escolha da concepção básica, que é a melhor solução sob os pontos de vista técnico, econômico, financeiro e social (ABNT, 1992).

Por outro lado, quando se analisam sistemas já instalados, a energia pode ser medida utilizando-se equipamentos de medição como o analisador de energia portátil ou as contas de energia e esse dado pode ser confrontado com a energia mínima calculada para este sistema, de modo a averiguar quão próximo ou distante o consumo de energia do sistema está do seu consumo mínimo. Para exemplificar a abordagem da aplicação em sistemas existentes foram realizados 8 estudos de caso em sistemas de bombeamento do Departamento Municipal de Água e Esgoto da cidade de Porto Alegre, RS.

As duas propostas de utilização do indicador (projeto e sistemas já instalados) estão apresentadas nos itens subsequentes.

#### 6.1.1 Energia mínima em situação de projeto

Supõe-se um projeto de sistema de bombeamento onde são conhecidos a altura geométrica, o comprimento e o material de construção da linha adutora e foram estimados os volumes de consumo para início e fim de projeto, conforme apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Sistema hipotético para análise da energia mínima em situações de projeto.

Dados	Valores
Altura geométrica (m)	12,6
Comprimento (m)	1.750
C (Hazen-Williams)	130
Consumo diário inicial (m <sup>3</sup> /d)	1.350
Consumo diário final (m <sup>3</sup> /d)	2.200
Rotação nominal (RPM)	3.500

A partir do adimensional  $L/Hg$ , calculam-se as velocidades (equações (40) e (41)) e as perdas de carga (equações (42) e (43)) máximas e mínimas. A vazão nominal pode ser estimada pela equação (39) utilizando-se como volume a média entre os consumos inicial e final. Ao longa da vida útil do projeto os limites de operação da bomba são definidos pelos limites de variação da rotação (70 a 120%). A partir da vazão nominal e das velocidades, obtém-se o diâmetro.

Conhecida a perda de carga e a altura geométrica, calcula-se a altura manométrica que também pode ser obtida utilizando-se a equação de Hazen-Williams, pois todos os termos da equação são conhecidos. Caso a perda de carga calculada por Hazen-Williams seja maior que a perda de carga estimada pelo adimensional pode-se modificar o diâmetro adotado, aumentando-o.

O rendimento ótimo da bomba pode ser calculado a partir da velocidade de rotação específica (equações (18) e (19)) já que são conhecidos os valores da vazão e da altura manométrica. Depois, calcula-se a potência motriz, estima-se o rendimento do motor (equação (21)) e calcula-se a potência elétrica.

O tempo de bombeamento médio é calculado pela razão entre o consumo diário médio e a vazão nominal.

Assim, todos os termos da equação são conhecidos e pode-se calcular a energia mínima estimada para o projeto do sistema hipotético apresentado na Tabela 6.1.

A sequência de cálculos explicitada acima está apresentada no fluxograma da Figura 6.2. A partir dos termos destacados, calcula-se a energia mínima para o sistema da Tabela 6.1, estimada em 3302kWh/mês.

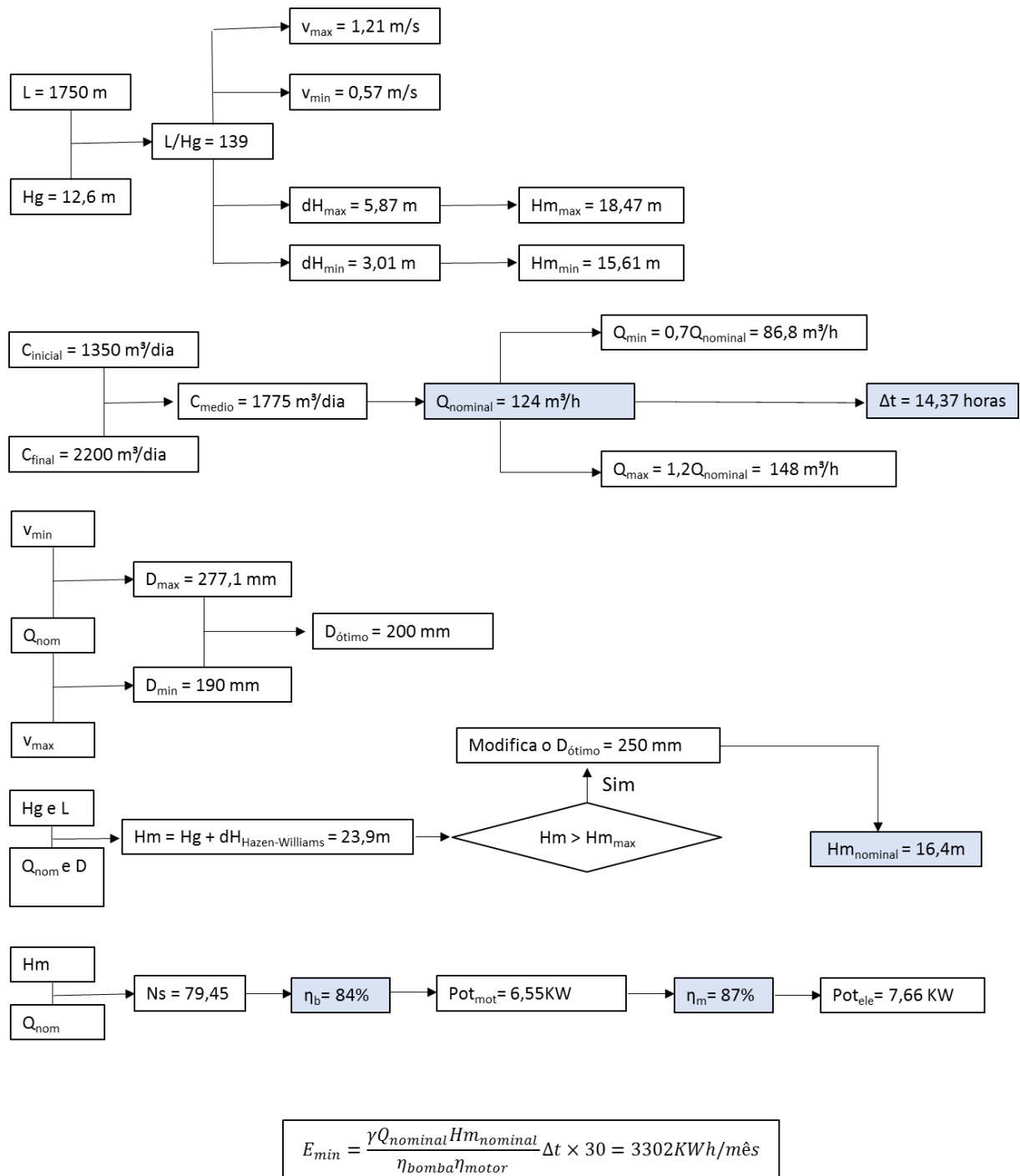


Figura 6.2. Fluxograma de exemplo para cálculo da energia mínima para o sistema hipotético da Tabela 6.1.

A partir da energia mínima pode-se estimar também o consumo específico (CE) e o consumo específico normalizado (CEN) do sistema. Além disso, o volume de consumo final pode ser utilizado para determinar a capacidade do reservatório superior (equação (37)). A Tabela 6.2 apresenta a síntese dos indicadores calculados para o sistema da Tabela 6.1.

Tabela 6.2. Resultado dos indicadores calculados para o sistema hipotético da tabela 6.1.

Indicador	Valor
Consumo de energia ou Energia mínima (kWh/mês)	3.302
Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	0,062
Consumo específico normalizado (kWh/m <sup>3</sup> /100m)	0,38
Capacidade do reservatório (m <sup>3</sup> )	419 a 1.024

O algoritmo SCE-UA e o modelo de simulação desenvolvido poderiam ser utilizados para calcular o consumo de energia mensal da mesma forma como apresentado no item 5.4.1. A energia consumida por mês, calculada pelo programa, seria de 3404 kWh/mês, valor próximo ao estimado por meio da metodologia proposta para cálculo da energia mínima de sistemas de bombeamento.

### 6.1.2 Energia mínima aplicada a sistemas reais como forma de estudo de caso

O indicador de energia mínima também pode ser utilizado para diagnóstico hidroenergético de sistemas existentes. Nesse contexto, o sistema possui dados reais, coletados *in loco* por meio de medição e o diâmetro da adutora, em princípio, não pode ser modificado.

Para exemplificar esta forma de utilização do indicador foram realizados estudo de caso em 8 sistemas de bombeamento da cidade de Porto Alegre. Os dados para realização dos estudos de caso foram coletados junto à equipe do setor de Gerência de Projetos e Obras (GEPO), documentos oficiais e sistemas de informação, do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE).

O principal documento utilizado foi o Plano Diretor de Água (PDA), 4. ed., publicado em 2010, que apresenta um diagnóstico da situação do abastecimento de água da cidade, define os objetivos e metas estabelecidos para curto e médio prazos para a universalização dos serviços de abastecimento.

No PDA estão apresentadas informações sobre os se sistemas de abastecimento de Porto Alegre, são eles: Sistema Moinhos de Vento, Sistema São João, Sistema Menino Deus, Sistema Belém Novo, Sistema Lomba do Sabão, Sistema Ilha da Pintada e Sistema Tristeza. Cada sistema contém uma Estação de Tratamento de Água e é dividido em diversos subsistemas que, por sua vez, contam com inúmeras estações elevatórias de água (bruta – EBAB e tratada – EBAT). A época da publicação do PDA, o DMAE contava com 96 estações elevatórias divididas entre os 7 sistemas de abastecimento.

Também, foi utilizado o sistema ‘Coletor DMAE’, que disponibiliza informações georreferenciadas e foi criado pela Companhia de Processamento de Dados do Município de



Porto Alegre (PROCEMPA). Nesse sistema foi possível coletar informações sobre as adutoras dos sistemas de bombeamento estudados.

Outras informações foram obtidas diretamente com a equipe da GEPO, a saber: dados sobre o consumo de energia e os volumes de água produzidos e bombeados em cada subsistema.

Foram escolhidas 8 estações elevatórias de água tratada, de 3 sistemas de abastecimento distintos, para os estudos de caso desta pesquisa. A Tabela 6.3 apresenta as informações gerais de cada uma das elevatórias avaliadas.

Tabela 6.3. Identificação das Estações Elevatórias utilizadas no estudo de caso da pesquisa.

Nome da Estação Elevatória	Sistema	Endereço
EBAT Bordini	Moinhos de Vento	Rua Coronel Bordini, 1.703
EBAT Luzitana	São João	Rua Luzitana, 571
EBAT Ipiranga I	São João	Rua Itapeva, 273
EBAT Ipiranga II	São João	Pça Engo Paulo Bozano, 50
EBAT Carlos Gomes	Menino Deus	Rua Alfa, 140
EBAT Santa Teresa I	Menino Deus	Rua Dona Gabriela, 51
EBAT Santa Teresa II	Menino Deus	Rua Dona Gabriela, 350
EBAT Gutemberg	Menino Deus	Av. Senador Tarso Dutra, 3.005

Para cada EBAT foram reunidas informações como altura geométrica, comprimento da linha adutora, energia consumida e volume bombeado. As informações coletadas sobre a energia e o volume foram para cada mês do ano de 2014. Para análise de energia mínima foi feita a média desses valores de modo a obter um valor representativo do ano. Essas informações estão apresentadas na Tabela 6.4, onde também está apresentado o valor para o consumo específico (CE) e consumo específico normalizado (CEN) de cada EBAT.

Tabela 6.4. Informações coletadas para as estações elevatórias utilizadas no estudo de caso da pesquisa.

EBAT	Hg (m)	L (m)	Energia (kWh/mês)	Volume (m <sup>3</sup> /mês)	CE (kWh/m <sup>3</sup> )	CEN (kWh/m <sup>3</sup> /100m)
EBAT Bordini	27,71	450	25.153	172.659	0,15	0,50
EBAT Luzitana	48,46	1.096	59.379	254.611	0,23	0,45
EBAT Ipiranga I	38,62	2.150	77.786	512.782	0,15	0,36
EBAT Ipiranga II	23,76	1.098	46.175	320.218	0,14	0,52
EBAT Carlos Gomes	18,18	130	9.891	86.835	0,11	0,64
EBAT Santa Teresa I	29,79	545	51.635	302.615	0,17	0,54
EBAT Santa Teresa II	33,79	1.233	53.672	252.880	0,21	0,56
EBAT Gutemberg	22,35	545	33.540	344.509	0,10	0,40

A sequência de cálculos para obtenção da energia mínima para sistemas existentes é similar ao apresentado para situações de projeto, contudo, não há necessidade da avaliação da velocidade para determinação do diâmetro.

Todas as EBAT's analisadas apresentam como peculiaridade adotarem distribuição em marcha ao longo da adutora. Essa distribuição ocorre conforme a necessidade de consumo da rede e não foi mensurada durante a pesquisa. Assim, para incluir a distribuição em marcha na análise de energia mínima foram estabelecidas duas estimativas, uma como se o sistema não tivesse distribuição em marcha e outra como se toda a vazão fosse consumida ao longo do comprimento, caso em que a extremidade de jusante é chamada ponta seca. Para esse caso particular a perda de carga é igual a terça parte da que ocorreria se toda a vazão de montante fosse transportada até a extremidade de jusante, sem distribuição em marcha (PORTO, 2006). Ou seja, foram calculadas as duas situações extremas para representar a situação intermediária real, dada por meio da média entre os extremos.

Na Figura 6.3 está apresentado o fluxograma de cálculo para energia mínima da EBAT Bordini. Os termos destacados em azul são para estimativa sem distribuição em marcha e os termos destacados em alaranjado são para a estimativa com ponta seca. Ressalta-se que os valores finais foram próximos entre si para todas as EBAT's.

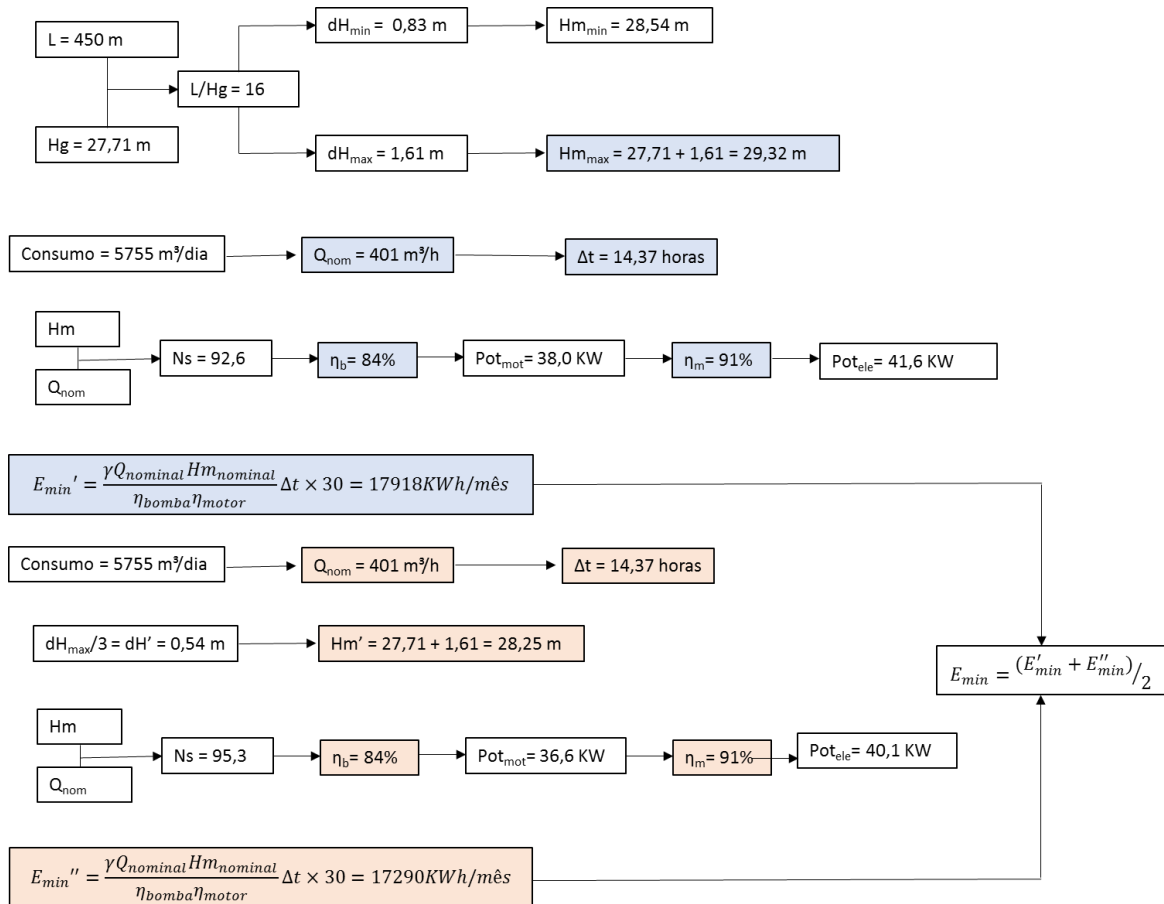


Figura 6.3. Fluxograma de exemplo do cálculo da energia mínima para a EBAT Bordini.

A partir dos termos destacados na Figura 6.3 a energia mínima ( $E_{\min}$ ) calculada para a EBAT Bordini foi 17.918 kWh/mês na situação sem distribuição em marcha e 17.290 kWh/mês para a situação de distribuição com ponta seca. A média entre esses valores foi considerada a energia mínima do sistema.

A partir da relação desse valor com o consumo real ( $E_{\text{real}}$ ) da EBAT, apresentado na Tabela 6.4, pode-se calcular o indicador de energia mínima deste caso, ou seja, pode-se inferir sobre sua eficiência energética absoluta. O resultado desse indicador, para cada uma das EBAT's analisadas, está apresentado na Tabela 6.5. Além disso, pode-se calcular a diferença entre o consumo real ( $E_{\text{real}}$ ) e a energia mínima ( $E_{\min}$ ), também apresentada na Tabela 6.5.

Tabela 6.5. Resultado do indicador de energia mínima para as estações elevatórias utilizadas no estudo de caso da pesquisa.

EBAT	$E_{real}$ (kWh/mês)	$E_{min}$ (kWh/mês)	$E_{real}/E_{min}$ (médio)	$E_{real}-E_{min}$ (médio) (kWh/mês)
EBAT Bordini	25.153	17.918 17.290	1,43	7.549
EBAT Luzitana	59.379	46.109 43.867	1,32	14.391
EBAT Ipiranga I	77.786	75.001 66.621	1,10	6.975
EBAT Ipiranga II	46.175	31.315 28.601	1,54	16.217
EBAT Carlos Gomes	9.891	5.630 5.534	1,77	4.309
EBAT Santa Teresa I	51.635	33.784 32.476	1,56	18.505
EBAT Santa Teresa II	53.672	33.634 31.196	1,66	21.257
EBAT Gutemberg	33.540	29.974 28.494	1,15	4.306

Os indicadores  $E_{real}/E_{min}$  e  $E_{real}-E_{min}$  poderiam ser utilizados para avaliar, dentro de um programa de investimento com vistas a eficiência energética, qual EBAT poderia ter prioridade. Ou seja, mostra-se como uma ferramenta de gestão que pode auxiliar na tomada de decisão de uma companhia de saneamento. A Tabela 6.6 mostra os indicadores utilizados como critério de classificação da eficiência energética das EBAT's analisadas.

Tabela 6.6. Resultados para os indicadores de energia mínima e classificação das EBAT's analisadas na pesquisa.

EBAT	$E_{real}/E_{min}$ (médio)	Classificação	$E_{real}-E_{min}$ (médio) (kWh/mês)	Classificação
EBAT Bordini	1,43	4	7.549	4
EBAT Luzitana	1,32	3	14.391	5
EBAT Ipiranga I	1,10	1	6.975	3
EBAT Ipiranga II	1,54	5	16.217	6
EBAT Carlos Gomes	1,77	8	4.309	2
EBAT Santa Teresa I	1,56	6	18.505	7
EBAT Santa Teresa II	1,66	7	21.257	8
EBAT Gutemberg	1,15	2	4.306	1

Dentre os sistemas analisados, a EBAT Carlos Gomes apresenta pior valor para a relação entre o consumo real e a energia mínima ( $E_{real}/E_{min} = 1,77$ ), no entanto, é a EBAT com menor consumo de energia, a diferença entre o consumo real e a energia mínima é de apenas 4.309kWh, ou seja, investimentos nesse sistema poderiam resultar em uma economia de energia

mais modesta se comparado a outros sistemas como, por exemplo, as EBAT's Santa Tereza I e II.

Ao comparar os indicadores de energia mínima apresentados na Tabela 6.5 com o consumo específico apresentado na Tabela 6.4 observa-se que todos os sistemas têm CE próximos entre si, ou seja, esse indicador não permite conclusões para a comparação de sistemas, como aponta a literatura. Já o consumo CEN representa uma adaptação do CE e é um indicador que pode ser utilizado para comparar sistemas. Na Figura 6.4 estão apresentados os valores do CEN e as faixas de classificação desse indicador (0,27 a 0,40 ótima, 0,40 a 0,54 mediana e acima de 0,54 insatisfatória) e na Figura 6.5 e Figura 6.6 estão apresentados os valores dos indicadores de energia mínima de cada EBAT.

Os valores do CEN possibilitam comparar os sistemas entre si e os resultados são análogos aos obtidos com o indicador de energia mínima, pelo menos para estabelecer uma ordem classificatória dos sistemas em relação a eficiência energética. Já os indicadores de energia mínima, além de classificar os sistemas, retratam quão longe cada um está da sua linha de base. Por exemplo, a EBAT Ipiranga I tem CEN de 0,36, está na faixa ótima, entretanto, não se pode afirmar, olhando apenas esse resultado, se este sistema não poderia ser mais eficiente. Quando se observam os resultados dos indicadores de energia mínima deste sistema, contudo, seu valor de 1,10 simboliza que a EBAT está apenas 10% longe do seu mínimo, ou 6.975 kWh/mês.

Outra situação que mostra a vantagem do indicador proposto nesta pesquisa é a comparação entre as EBAT's Santa Tereza I e II. O CEN apresentou valores muito próximos para esses sistemas, 0,54 e 0,56, respectivamente. Contudo, os indicadores de energia mínima foram de 1,56 e 1,66, para  $E_{\text{real}}/E_{\text{min}}$  e de 18.505 kWh/mês e 21.257 kWh/mês, para  $E_{\text{real}}-E_{\text{min}}$ , para as EBAT's Santa Tereza I e II, respectivamente.

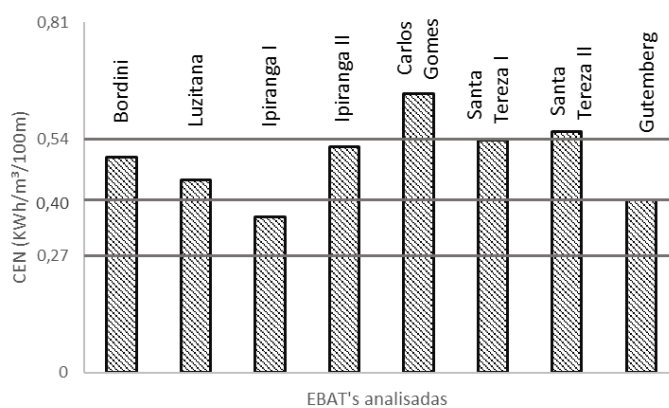


Figura 6.4. Resultado do consumo específico normalizado para as EBAT's analisadas.

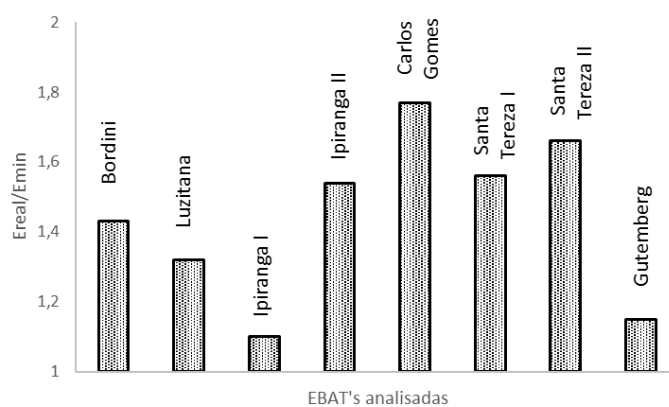


Figura 6.5. Resultado do indicador  $E_{real}/E_{min}$  para as EBAT's analisadas.

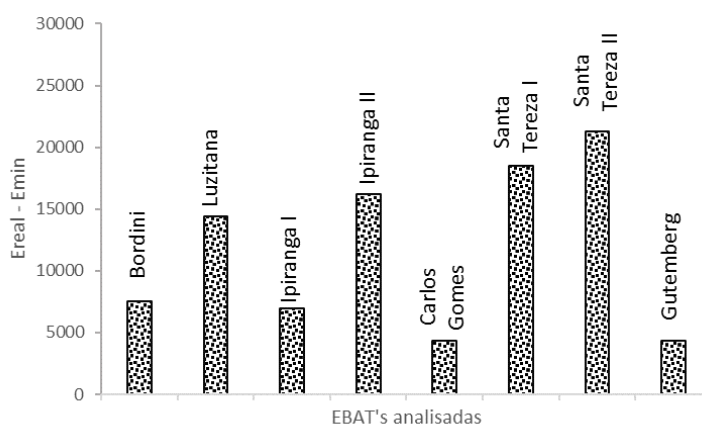


Figura 6.6. Resultado do indicador  $E_{real}-E_{min}$  para as EBAT's analisadas.

Vale destacar que os valores utilizados para estimativa da energia mínima foram obtidos junto ao DMAE e podem conter equívocos de medição ou estimativa. Os resultados foram apresentados para exemplificar a possibilidade de utilização das equações e indicadores

propostos nesta pesquisa o que está de acordo com o objetivo principal da pesquisa que trata do desenvolvimento de uma metodologia para análise geral da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal desta tese foi desenvolver uma metodologia para análise geral da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água na fase de projeto, ou para diagnóstico de operação, por meio do uso de índices e indicadores e do uso do algoritmo evolucionário SCE-UA. Nesse capítulo serão apresentadas as principais conclusões para cada um dos objetivos propostos no capítulo 2 bem como as recomendações para estudos futuros.

Os aspectos investigados ao longo da pesquisa estiveram relacionados com a otimização da regra de operação de modo a diminuir os custos de operação e instalação, avaliação desses custos para diferentes características hidráulicas e geométricas, definição sobre quais condições hidráulicas de operação fornecem melhor eficiência energética, estabelecimento de índices e indicadores que possam ser utilizados como critério para dimensionamento e análise de projetos e que, assim, permitam inferir sobre a eficiência hidroenergética de sistemas de bombeamento de água.

Para cumprir esses objetivos foi desenvolvido um modelo de simulação para cálculo dos custos de operação e instalação de sistemas de bombeamento, acoplado ao algoritmo de otimização SCE-UA que foi utilizado para obter a regra de operação otimizada desses sistemas. Foram variadas algumas características geométricas dos sistemas como: altura geométrica, comprimento e diâmetro e foram avaliados três formatos de curva de consumo, com quatro volumes de consumo diários distintos, em duas situações, início e fim de projeto. Para cada sistema foram calculados indicadores de desempenho para avaliar a eficiência energética do sistema. Assim, os resultados foram avaliados e discutidos e foram estabelecidos critérios e equações que podem ser utilizados para a análise geral da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água.

Em relação a otimização da operação de sistemas de bombeamento de água, o algoritmo evolucionário SCE-UA foi capaz de otimizar as variáveis de decisão em todos os cenários avaliados. O critério de convergência adotado em 1000 gerações (ou ciclos) foi suficiente já que, em geral, a função-objetivo atingia seu ótimo global com menos de 300 gerações. Via de regra, a operação otimizada pelo algoritmo indicou o desligamento do sistema de bombeamento durante o período de ponta, quando a tarifação é mais onerosa, no entanto, como foram avaliadas combinações com elevada perda de carga, pequenos diâmetros com grandes comprimentos, em algumas situações o bombeamento durante este período foi apenas diminuído ao invés de desativado. A análise de todas as curvas, consumos e combinações geométricas indicou que o bombeamento na ponta se mostrou vantajoso quando a relação entre



a altura manométrica e a altura geométrica foi maior que 1,82, ou seja, quando a perda de carga é maior que 82% da altura geométrica. Quando o bombeamento durante o período de ponta é nulo, a vazão média do período fora de ponta é maior, logo, nesses cenários de elevada perda de carga, esse acréscimo de vazão foi mais oneroso ao custo total do que o bombeamento no período de ponta. Entretanto, mesmo nos casos cuja regra de operação otimizada determinou bombeamento no período de ponta, a vazão bombeada foi no máximo 30% da vazão nominal.

A regra de operação do sistema de bombeamento foi obtida a partir das variáveis de decisão que representavam o volume horário contido no reservatório superior. A partir desses resultados, foi definida a capacidade do reservatório superior que apresentou variação para os diferentes formatos de curva de consumo da seguinte forma: a curva que possuía o menor Fator de Consumo (0,43) foi a que teve o reservatório com maior capacidade, enquanto a curva com maior FC (0,80) foi a que teve o reservatório com menor capacidade. Isso mostrou que, durante o projeto de sistemas de bombeamento, a capacidade do reservatório precisa ser definida não só a partir do consumo, mas também, da distribuição desse ao longo do dia.

No que tange aos custos de operação e instalação, ficou evidente que há maior facilidade para estimativa dos custos de operação do que de instalação. Esses resultados foram utilizados para determinar, para cada curva, consumo e cenário, qual melhor diâmetro deveria ser adotado. *A priori*, foram avaliadas 96 combinações geométricas (4 Hg x 4L x 6D) que, após a análise dos custos, foram reduzidas para 16 (4Hg x 4L x 1D) para cada curva e consumo do sistema de bombeamento.

Outro objetivo da pesquisa dizia respeito a verificação de quais características geométricas eram mais significativas na composição dos custos. Nesse sentido, os custos de instalação foram mais significativos nas situações de menor altura geométrica, quando a altura manométrica é menor, e, portanto, a potência e a energia são menores, ou seja, a operação custa menos. Conforme a altura geométrica aumentava, os custos de operação se tornaram mais representativos para o custo total, mesmo quando se comparavam situações análogas para comprimento e diâmetro. Assim, ficou claro que a avaliação dos custos se trata de uma etapa primordial em projetos de sistemas de bombeamento e precisa ser realizada com parcimônia.

Sobre as condições hidráulicas de operação, os índices e os indicadores, foram analisados resultados para o consumo de energia, consumo específico e consumo específico normalizado, rendimento do motor e da bomba, velocidade do escoamento e perda de carga.

O consumo de energia pode ser obtido para um mês ou um ano de operação. Nesta pesquisa foi utilizado o valor mensal, calculado por meio do modelo de simulação acoplado ao algoritmo evolucionário. A avaliação desses resultados permitiu definir qual a variação do

consumo de energia em função da variação do consumo de água entre os cenários de início e fim de projeto, ou então com relação a variação da altura geométrica e/ou do comprimento. O consumo de energia no cenário de fim de projeto foi até 121% maior do que no cenário inicial devido ao aumento do consumo e também à mudança do coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams que passou de 130 para 105 entre os anos 0 e 20 (início e fim de projeto).

Em relação aos indicadores consumo específico e consumo específico normalizado foi notória a diferença entre eles já que o primeiro não se presta a comparação de sistemas distintos. Os resultados para o indicador normalizado, em todos os sistemas avaliados, ficaram nas faixas de classificação mediana e/ou ótima, o que corrobora que os diâmetros escolhidos como ótimos para cada consumo são realmente os com maior eficiência.

Para a vazão nominal foi estabelecida uma relação entre as vazões de início e fim de projeto de modo que fossem respeitados os limites de operação do conversor de frequência, definido em norma como 50 a 120%. Nesta pesquisa, os limites foram fixados em 70 e 120%. A partir dos resultados otimizados para os cenários inicial e final, foi definida a vazão nominal para cada consumo diário, ou seja, foi criado um critério para estimativa inicial da vazão nominal em projetos de sistemas de bombeamento de água.

O rendimento do conjunto motobomba foi obtido por meio de uma metodologia desenvolvida ao longo da pesquisa que se mostrou bastante simples e de fácil utilização. Os resultados encontrados para o rendimento da bomba justificaram as diferenças entre os resultados para o consumo específico normalizado.

As velocidades máxima e mínima do escoamento também foram determinadas e analisadas com vistas ao estabelecimento de um critério de eficiência energética. Esta grandeza pode ser utilizada para determinação do diâmetro ótimo de linhas adutoras e está presente na norma brasileira sobre “Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público” (NBR 12214:1992). A referência normativa traz os limites válidos para a velocidade, no entanto, não os associa a nenhuma outra grandeza, dificultado sua utilização como critério de dimensionamento em projetos que priorizem eficiência energética, logo, a experiência dos profissionais projetistas da área acaba sendo indispensável nesses casos. Nesta pesquisa a faixa de velocidades foi relacionada ao adimensional dado pela relação entre o comprimento e a altura geométrica e foi perceptível que, quanto maior for o adimensional, menor deve ser a velocidade. Ainda, nesses casos, a faixa de velocidades foi mais restritiva, para  $L/H_g$  igual a 500 a velocidade variou de 0,50 a 1,00m/s enquanto para  $L/H_g$  igual a 50 a variação encontrada foi de 0,70 a 1,32m/s.

Outra grandeza importante para a eficiência energética de um sistema de bombeamento é a perda de carga já que representa, na prática, a parcela de energia perdida com o escoamento. A perda de carga foi estudada como um percentual da altura geométrica e também foi considerada em função do adimensional  $L/Hg$ . Para cada valor do adimensional foram estabelecidos valores máximo e mínimo para a perda de carga percentual. Esses limites podem ser utilizados como critério em projetos e também para avaliação da eficiência energética de sistemas de bombeamento cujos sejam feitas medições para determinação da perda de carga real.

A partir dos critérios e equações desenvolvidos ao longo da análise dos indicadores, foi criado um novo indicador, denominado energia mínima, que representa o menor consumo de energia de um sistema a partir de sua otimização tecnológica e operativa. Este indicador foi proposto para duas possibilidades de utilização: projetos de sistemas de bombeamento e diagnóstico de sistemas de bombeamento existentes.

Para a utilização em projetos, o indicador pode fornecer uma previsão de quanto será dispendido com a operação do sistema de bombeamento, ou seja, qual será o menor consumo de energia possível a partir de que todas as grandezas que compõem o cálculo da energia tenham sido determinadas com critérios de eficiência energética. Na situação de projeto, pode-se utilizar o indicador, inclusive, para definir o diâmetro ótimo da linha adutora.

Já para a utilização para diagnóstico de sistemas de bombeamento existentes, o diâmetro da adutora, em princípio, não pode ser modificado. O indicador pode ser utilizado como linha de base do sistema, ou seja, demonstrar quanto de energia além do mínimo possível o sistema está consumindo. Para estes casos, os sistemas possuem dados cadastrais e também de medição. A energia real consumida pelo sistema é determinada por meio da análise das tarifas de energia, por exemplo, e a energia mínima é determinada por meio da metodologia proposta nesta tese. A razão e a diferença entre a energia real e a energia mínima podem ser utilizadas como critérios de classificação da eficiência energética do sistema. Além disso, se calculadas para vários sistemas de bombeamento inseridos em um sistema de abastecimento, podem ser utilizadas como ferramenta gerencial da companhia de saneamento, pois indica qual sistema deve ter prioridade para ações de efficientização.

Esta pesquisa em momento algum visou esgotar as possibilidades de estudo acerca deste contexto. Portanto, inúmeras recomendações podem ser sugeridas para estudos futuros, a destacar:

- Desenvolver o procedimento metodológico para outra tipologia de sistema de bombeamento, por exemplo, bombeamento direto na rede;
- Testar outras equações para os custos de instalação, outros materiais para a linha adutora e/ou outras modalidades tarifárias;
- Avaliar a influência da posição do consumo de pico da curva de consumo para os resultados;
- Incluir no modelo as perdas de água que pode ocorrer na linha adutora;
- Realizar uma análise de sensibilidade dos resultados para a variação dos custos de operação e instalação;
- Testar outros intervalos para o adimensional L/Hg, além dos testados nesta pesquisa, por exemplo, entre 200 e 500 e/ou acima de 500;

## 8 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. A. Análises e Métodos de Otimização para Eficiência Energética em Estações Elevatórias em Sistemas de Abastecimento de Água. 2007. 113 f. (Doutorado em Recursos Naturais) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2007.

ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J. M.; PARENA, R. Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água: versão portuguesa de Performance indicators for water supply services. Tradução Patrícia Duarte, Helena Alegre, Jaime Melo Baptista. Londres: IWA/IRAR/LNEC, 2004.

ALLIANCE TO SAVE ENERGY. *Água e energia: Aproveitando as oportunidades de eficientização de água e energia não exploradas nos sistemas e água municipais*. Washington: ALLIANCE, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12211: Estudo de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. NBR 12213: Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

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

\_\_\_\_\_. NBR 12215: Projeto de adutora de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. NBR 12217: Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

\_\_\_\_\_. NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

\_\_\_\_\_. NBR 6400: Bombas hidráulicas de fluxo (Classe C) – Ensaios de desempenho e de cavitação. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ALZAMORA, F. M. e TARREGA, F. S. Curso de Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Cátedra de Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia, Madrid, 1987.

AZEVEDO NETTO, FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. *Manual de Hidráulica*. 8 ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1998. 335 p.

BAHIA, S. R. Eficiência Energética nos Sistemas de Saneamento; Rio de Janeiro: IBAM/DUMA, 1998. Cap. 2.

BAPTISTA, M. B.; COLEHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A. *Hidráulica Aplicada*. Porto Alegre: ABRH, 2001. 619p.

BARDALES, K. L. N. Otimização Energética da Operação de um Sistema Adutor de Água Tratada Utilizando Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo. 2007. 147 f. (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2007.

BEZERRA, S.T.M, GOMES, H.P., PAIVA, J.S.O., SANTOS, D.S. Análise do parâmetro K da fórmula de Bresse, em função das variáveis que influenciam o dimensionamento econômico de estações de recalque, in Anais do V SEREA - Seminário Iberoamericano: Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua, Valência, 2005.

BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento. Avaliação de Sistemas de Bombeamento de Água: Manual de Eficiência Energética. Disponível em: <<https://publications.iadb.org/handle/11319/2830?locale-attribute=en>>. Acesso em 18 de ago. 2016.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Retifica a Resolução Normativa ANEEL n° 414, de 2010. Resolução Normativa n°418, de 23 de novembro de 2010.

\_\_\_\_\_. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Módulo 8: Qualidade de Energia. 2010. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8\\_Revisão\\_6\\_Retificação\\_1.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_6_Retificação_1.pdf)>. Acesso em: 18 de ago. 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério da Saúde. Portaria n. 2914, de 12 de dezembro de 2011.

\_\_\_\_\_. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Estabelecer os procedimentos comerciais para a aplicação do sistema de bandeiras tarifárias. Resolução Normativa n° 547, de 16 abril de 2013.

\_\_\_\_\_. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 21° Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2015. Brasília: Ministério das Cidades, 2017.

BRAVO, J. M. Otimização da Operação de um Reservatório para Controle de Cheias com Base na Previsão de Vazão. 2006. 155 f. (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BRAVO, J.; WALTER, C.; TUCCI, C. E. M. Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n. 1, p. 181-196, Jan/Mar 2008.

CABRERA, E.; PARDO, M. A.; COBACHO, R.; CABRERA JR., E. Energy audit of water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Washington, v. 136, n. 6, p. 669-677, nov. 2010.

CARDOSO, R. B.; NOGUEIRA, L. A. H.; BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; SOUZA, E. P. Avaliação da economia de energia, atribuída a ações de etiquetagem energética, em motores de indução no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, v.15, p.29-47, 2009.

CEEE - Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1782>. Acesso em: 10 de jul. 2016.

COLEHO, M. M. L. P. Estações Elevatórias. In: HELLER, P.; PÁDUA, V. L. (Org.). *Abastecimento de Água para Consumo Humano*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. p. 471-518.

COLEHO, M. M. L. P.; BAPTISTA, M. M. Adução. In: HELLER, P.; PÁDUA, V. L. (Org.). *Abastecimento de Água para Consumo Humano*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. p. 427-470.

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. G. Efficiency achievement in water supply system – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 30, p. 59-84, 2014.

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. G. A new approach for the prediction of speed-adjusted pump efficiency curves. *Journal of Hydraulic Research* v. 54, n. 5, 2016. p. 586–593.

COELHO, M. M. L. P.; LIBÂNIO, M. Reservação. In: HELLER, P.; PÁDUA, V. L. (Org.). *Abastecimento de Água para Consumo Humano*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. p. 571-602.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Calibração automática global do modelo IPH2. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14, 2001, Aracaju. Anais: Aracaju, 2001, CD.

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.

COSTA, A. J. Metodologia para Análise de Tarifas de Sistemas de Abastecimento de Água – SAA com Base nos Custos de Implantação e Operação do Sistema. 2003. 124 f. (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

DAKHLAOUI, H.; BARGAOUI, Z.; BÁRDOSSY, A. Toward a more efficient Calibration Schema for HBV rainfall–runoff model. *Journal of Hydrology*. v. 444, p. 161-179, 2012.

DE ROLT, M. I. P. O Uso de Indicadores para a Melhoria da Qualidade em Pequenas Empresas. 1998. 193 f. (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

DINIZ, L. S. Calibragem de Modelos Hidrológicos. In: *Sistemas Inteligentes: Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS/ABRH, 1999. p. 151-164.

DONG, J.; ZHENG, C.; KAN, G.; LI, Z.; ZHAO, M. Application of SCE-UA Approach to Economic Load Dispatch of Hydrothermal Generation System. v. 448, p. 4296-4303, 2013.

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre. Plano Diretor de Água. 4 ed. 2010.

\_\_\_\_\_. Informações obtidas em visita ao Setor de Gerenciamento de Projetos e Obras em 15 de julho de 2016.



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

DUARTE, P.; ALEGRE, H.; COVAS, D. I. C. Avaliação do Desempenho Energético em Sistemas de Abastecimento de Água. In: SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO E DRENAGEM, 8, Portugal. 2008. Disponível em: <[http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/resumo\\_viiiiserea.pdf](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/resumo_viiiiserea.pdf)>. Acesso em: 18 de set. 2017.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras. Guia Técnico - Motor de alto rendimento. Programa de combate ao desperdício de energia elétrica - PROCEL. Rio de Janeiro: PROCEL, 2002. 28p.

FERREIRA, L. A.; ANTUNES, A.; PICADO-SANTOS, L. Using genetic algorithms on a PMS segment optimization mode. In: EUROPEAN PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEMS CONFERENCE, 1, 2000, Budapest. Proceeding: Budapest, 2000, CD.

FILHO, D. O.; SAMPAIO, R. P.; MORAES, M. J.; PISSIOLO, T. A.; DAMIÃO, J. H. A. C. Metodologia de diagnóstico energético em estação de captação de água. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 15, n. 10, p. 1097-1103, 2011.

FORMIGA, K. T. M. Dimensionamento Econômico de Instalações de Recalque. Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1997.

FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M.; MAISANO, D. *Management by measurement: Designing key indicators and performance measurement systems*. Heidelberg: Springer, 2007. 250p.

GIBSON, I. H. *Variable-speed drives as flow control elements*. ISA Transactions, Amsterdam, v. 33, n. 2, p. 165-169, 1994.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, Mass, 1989. 412 p.

GOMES, A.S. Custos de instalação em sistemas de abastecimento de água. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <[joicekuritza@gmail.com](mailto:joicekuritza@gmail.com)> em 25 de setembro de 2016.

GOMES, H. P. *Sistemas de Bombeamento: eficiência energética*. 2 ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2012. 459 p.

GOMES, H. P. *Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes Elevatórias*. 3 ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009. 272p.

GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. *Manual de Sistemas de Bombeamento: eficiência energética*. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2012. 189p.

GOPALAKRISHNAN, K.; CEYLAN, H. Application of Shuffled Complex Evolution Optimization Approach to Concrete Pavement Backanalysis. In: 7th International DUT-Workshop on Design and Performance of Sustainable and Durable Concrete Pavements, Carmona, Spain, October 9-12, 2010.

GRAVE, M. Simulação e Controle de Enchentes Usando as Equações de Águas Rasas e a Teoria do Controle Ótimo. 2016. 105 f. (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2016.

GRANADOS, A. Infraestructuras de Regadíos – Redes Colectivas de Riego a Presión Servicio de Publicacion de la E.T.S.I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1990.

GRUNDFOS. Manual de Engenharia: estações elevatórias de águas residuais. Lisboa. 1996.

HELLER, L. Concepção de Instalações para o Abastecimento de Água. In: HELLER, P.; PÁDUA, V. L. (Org.). *Abastecimento de Água para Consumo Humano*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. p. 65-106.

IBGE. Censo 2010. Disponível em: < <http://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html> > Acesso em: 15 jan. 2017.

INMETRO. Tabelas de consumo/eficiência energética. Motores Elétricos Trifásicos - Rendimentos e Fator de Potência - Edição 01 / 2002. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/pbetab10.asp>> Acesso em: 20 ago. 2016.

KAYA, D.; YAGMUR, E. A.; YIGIT, K. S.; KILIC, F. C.; EREN, S.; CELIK, C. Energy efficiency in pumps. *Energy Conversion and Management*. v. 49, n.6, p. 1662-1673, 2008.

KANG, M.; PARK, S.; Modeling water flows in a serial irrigation reservoir system considering irrigation return flows and reservoir operations. *Agricultural Water Management*. v. 143, p. 131-141, 2014.

KOUTSOYIANNIS, D.; EFSTRATIADIS, A.; KARAVOKIROS, G. A Decision Support Tool for the Management of Multi-Reservoir Systems. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 38, n. 4, p. 945-958, Agosto 2002.

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*. v. 22, 2017.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. Introdução aos Algoritmos Genéticos. In: *Sistemas Inteligentes: Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS/ABRH, 1999. p. 99-150.

LAMBERT, A.; WIRNER, W. International Water Data Comparasions Ltd. Llandudno, LL 30 ISL, UK. Losses from Water Suply System: Standard Terminology and Performance Measures, IWA (International Water Association). The Blue Pages - The IWA information source on drinking water issue, 2000.

LERMA, N.; PAREDES-ARQUIOLA, J.; ANDREU, J.; SOLERA, A.; SECHI, G. M. Assessment of evolutionary algorithms for optimal operating rules design in real Water Resource Systems. *Environmental Modelling & Software*. v 69, p. 425 – 436, 2015

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Holanda: UNESCO, v. I, 2005.

MACINTYRE, A. J. *Bombas e Instalações de Bombeamento*. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1987. 782 p.

MAQUIMOTOR – Comercial e Técnica LTDA. Custos de instalação de sistemas de bombeamento. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <joicekuritza@gmail.com> em 10 de agosto de 2016.

NAOUM-SAWAYA, J.; GHADDAR, B.; ARANDIA, E.; ECK, B. Simulation-optimization approaches for water pump scheduling and pipe replacement problems. *European Journal of Operation Research*. v. 246, p. 293-306, 2015.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for functional minimization, *The Computer Journal*. v. 4, n. 7, p. 308-313, 1965.

NUNOO, C.; MRAWIRA, D. Suffled complex evolution in infrastructure works programming. *Journal of Computing in Civil Engineering*. v. 18, n. 3, p. 257-266, 2004.

OLIVEIRA, R. M. Gerenciamento de energia elétrica em uma empresa de saneamento ambiental. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6, 2002, Vitória. Anais: Vitória, 2002.

PEDROSA FILHO, L. Um modelo de operação de sistemas adutores de abastecimento de água com vistas a minimização dos custos energéticos. 2006. 160f. (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2006.

PORTO, R. M. *Hidráulica Básica*. 4 ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 519p.

PRINCE, A. Rede de distribuição. In: HELLER, L. e PÁDUA, V.L. *Abastecimento de água para consumo humano*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006, cap. 14, pg. 603-681.

RAMOS, H. M.; VIEIRA, F.; COVAS, D. I. C. Energy efficiency in a water supply system: energy consumption and CO2 emission. *Water Science and Engineering*. v. 3, n. 3, p. 331-340, 2010.

RODRIGUES, C. M. Adutoras na Cidade de Porto Alegre. 2014. 145 f. (Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SABESP (2014). “Eficiência Energética e Gestão de Energia na Sabesp”. <[www2.fiescnet.com.br/web/recursos/VUVSR05EZzRNQT09](http://www2.fiescnet.com.br/web/recursos/VUVSR05EZzRNQT09)> Acesso em 23 de junho de 2017.

SALLA, M. R.; ARQUIOLA, J. P.; ELVIRA, N. L.; FILHO, J. E. A.; PEREIRA, C. E.; COSTA, E. S. Aplicação da ferramenta EVALHID para calibração de parâmetros e simulação de vazões no alto curso do rio Araguari, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 20, n. 1, p. 276 – 285, 2015.

SANTOS, S. L. *Bombas e Instalações Hidráulicas*. São Paulo: LCTE, 2007. 253 p.

SOLERA, E. M.; TOLEDO, F. M. B.; SANTOS, M. O.; ARENALES, M. N. Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água. *Production*, v. 26, n. 2, p. 385-401, 2016.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. *Mecânica dos Fluidos*. 7 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: ABRH Editora da UFRGS, 1998. 669 p.

TSUTIYA, M. T. *Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água*. São Paulo: ABES Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2006.

TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de Água*. 3. ed. São Paulo: EESC-USP, 2006. 643p.

VILANOVA, M. R. N. Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões. (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

WANG, L.; NYUNT, C. T.; SAP, T. V. Development of an integrated modeling system for improved multi-objective reservoir operation. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, v. 4, n. 1, p. 47-55, 2010.

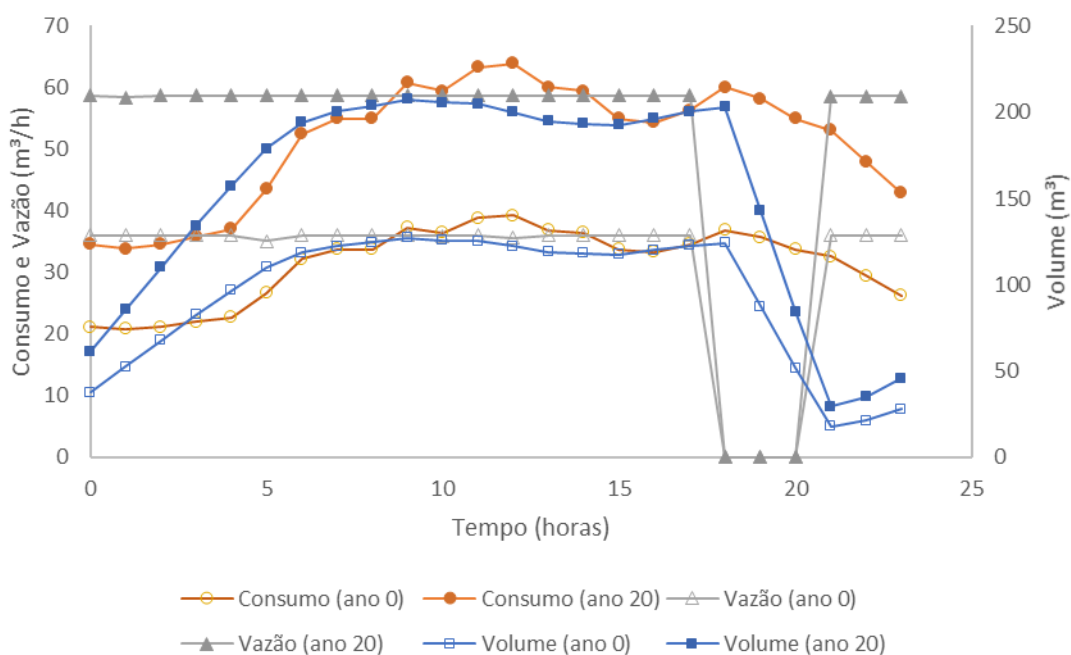
WALSKI, T. M. et al. Battle of the Network Models: Epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 113, n. 2, p. 191-203, 1987.

WU, P.; LAI, Z.; WU, D.; WANG, L. Optimization research of parallel pump system for improving energy efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 141, n. 8, 2015.

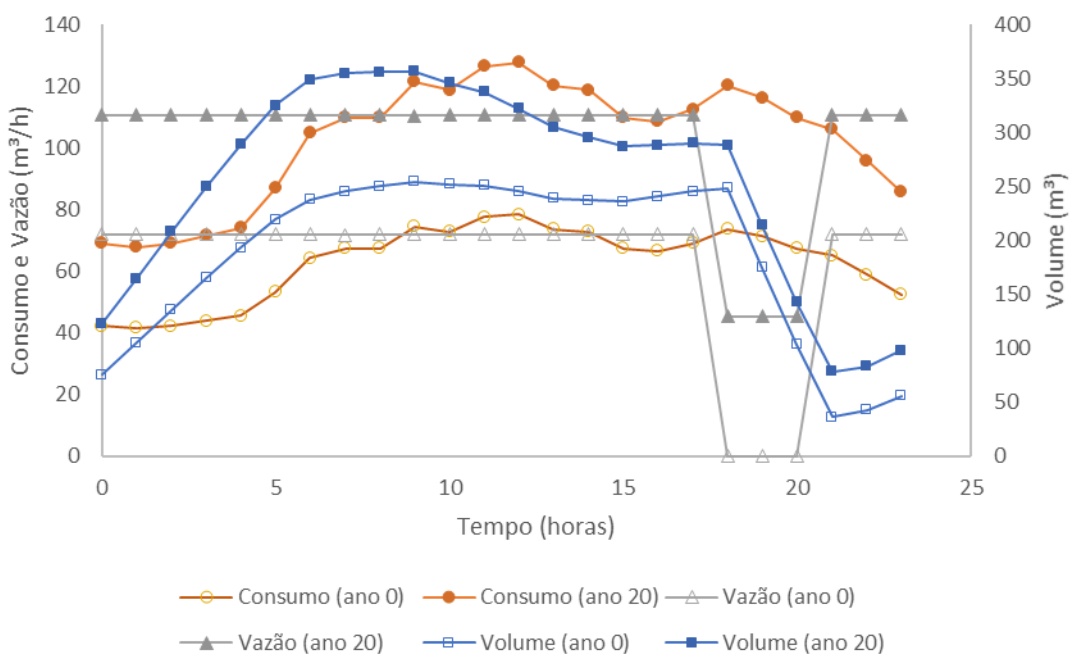
WU, W.; SIMPSON, A. R.; MAIER, H. R.; MARCHI, A. Incorporation of variable-speed pumping in multiobjective genetic algorithm optimization of the design of water transmission systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 138, n. 5, p. 543-552, 2012.

WU, Z. Y.; SIMPSON, A. R. Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution system. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, v. 15, p. 89-101, 2001.

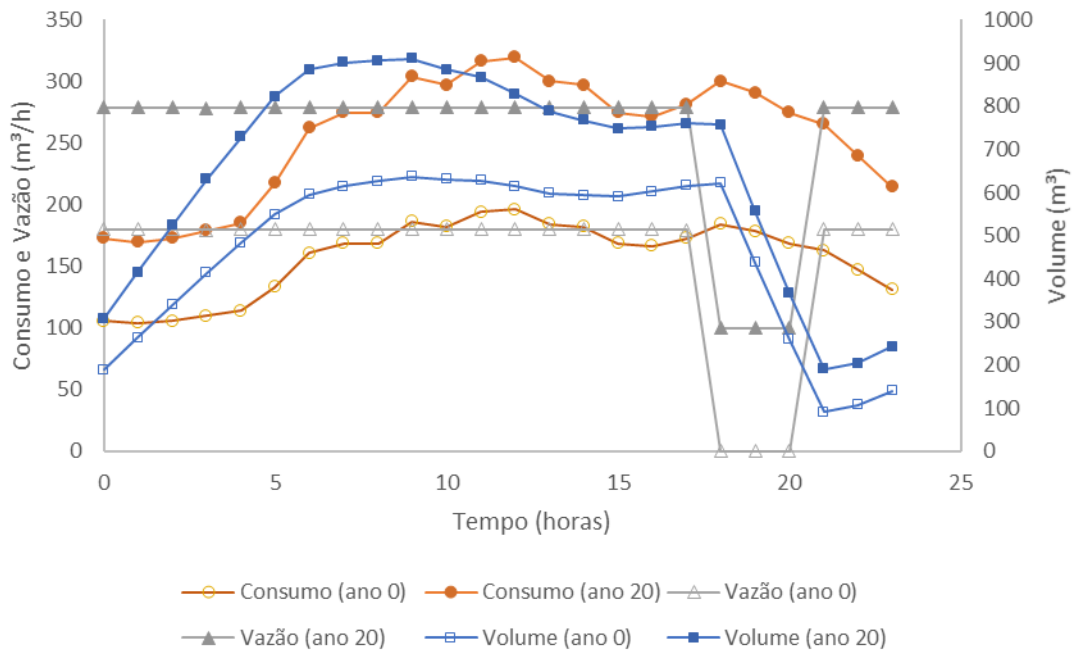
## APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS PARA A CURVA 2



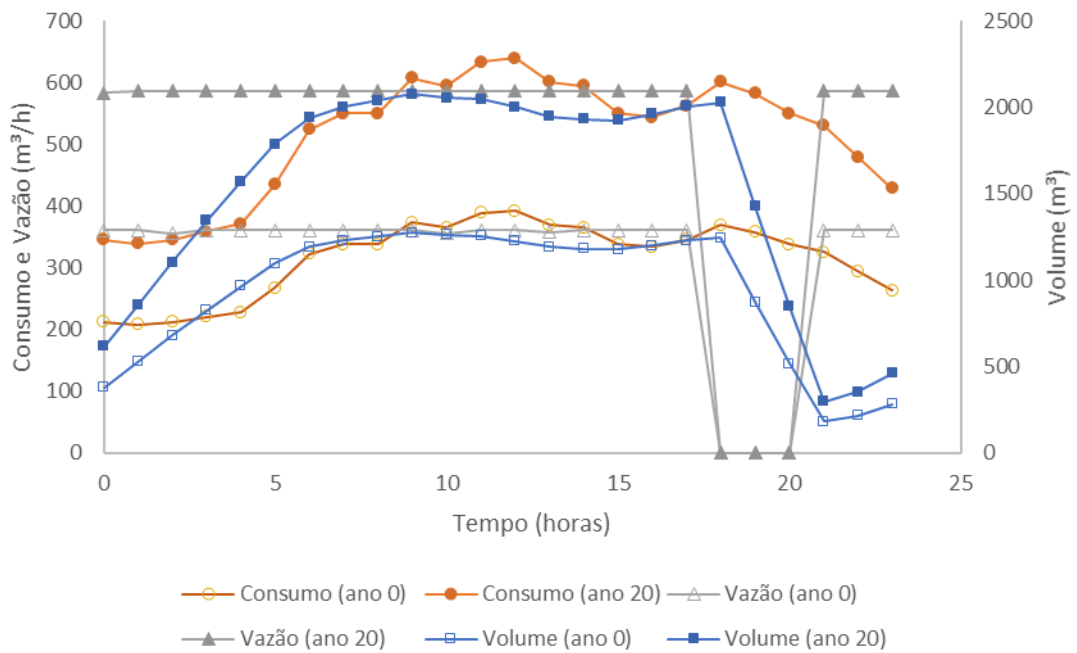
Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 2 (755 e 1.231 m³/d) inserida no algoritmo SCE-UA ( $H_g = 10$  m;  $L = 100$  m;  $D = 100$  mm;).



Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 2 (1.511 e 2.463 m³/d) inserida no algoritmo SCE-UA ( $H_g = 10$  m;  $L = 100$  m;  $D = 100$  mm;).

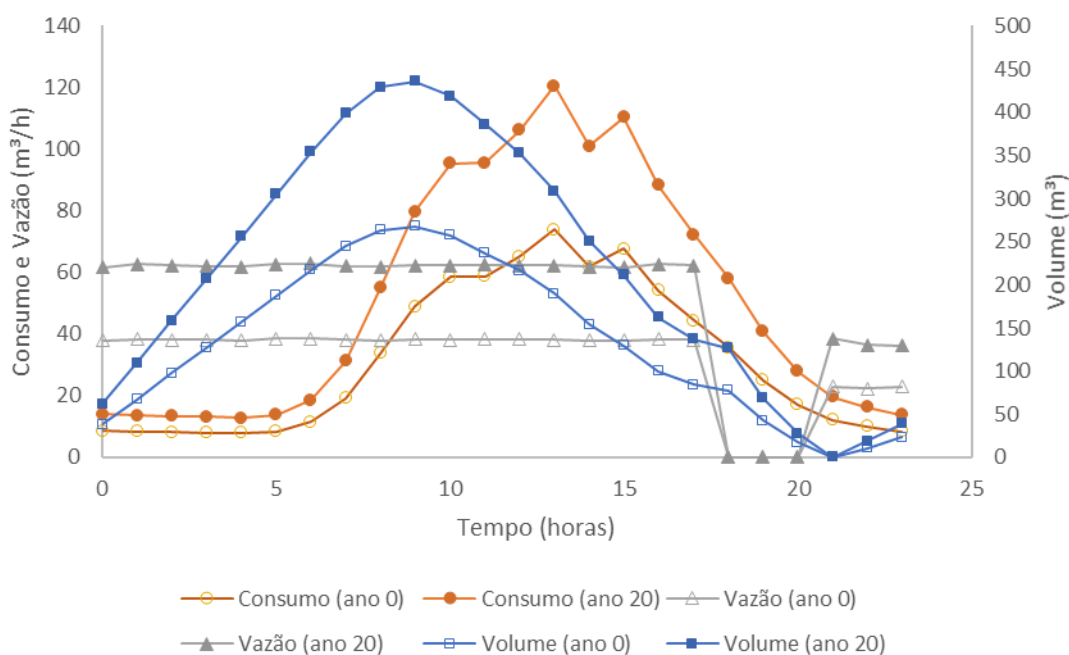


Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 2 (3.777 e 6.157 m<sup>3</sup>/d) inserida no algoritmo SCE-UA (Hg = 10 m; L = 100 m; D = 150 mm;).

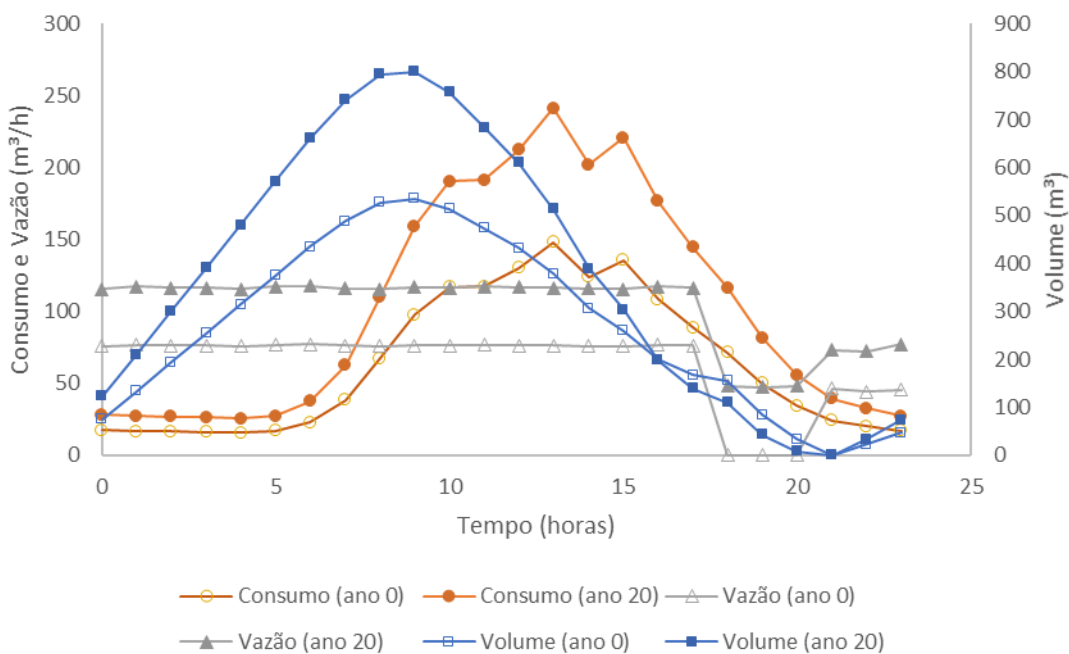


Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 2 (7.555 e 12.315 m<sup>3</sup>/d) inserida no algoritmo SCE-UA (HG = 10 m; L = 100 m; D = 250 mm;)

## APÊNDICE B - RESULTADOS OBTIDOS PARA A CURVA 3

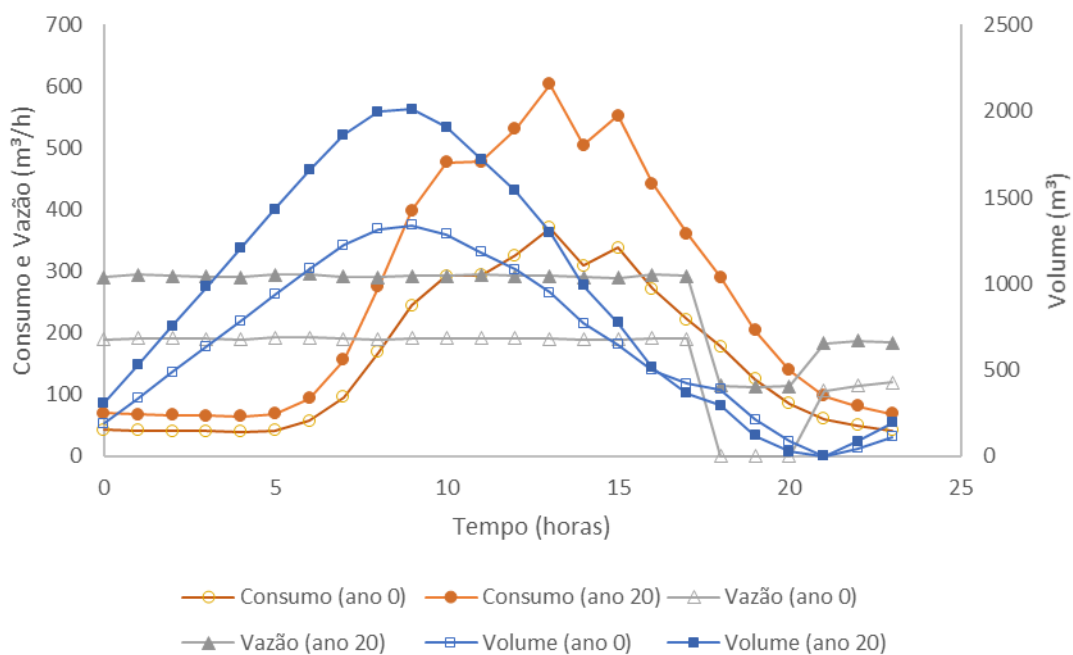


Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 3 (755 e 1.231 m³/d) inserida no algoritmo SCE-UA ( $H_g = 10$  m;  $L = 100$  m;  $D = 100$  mm;).

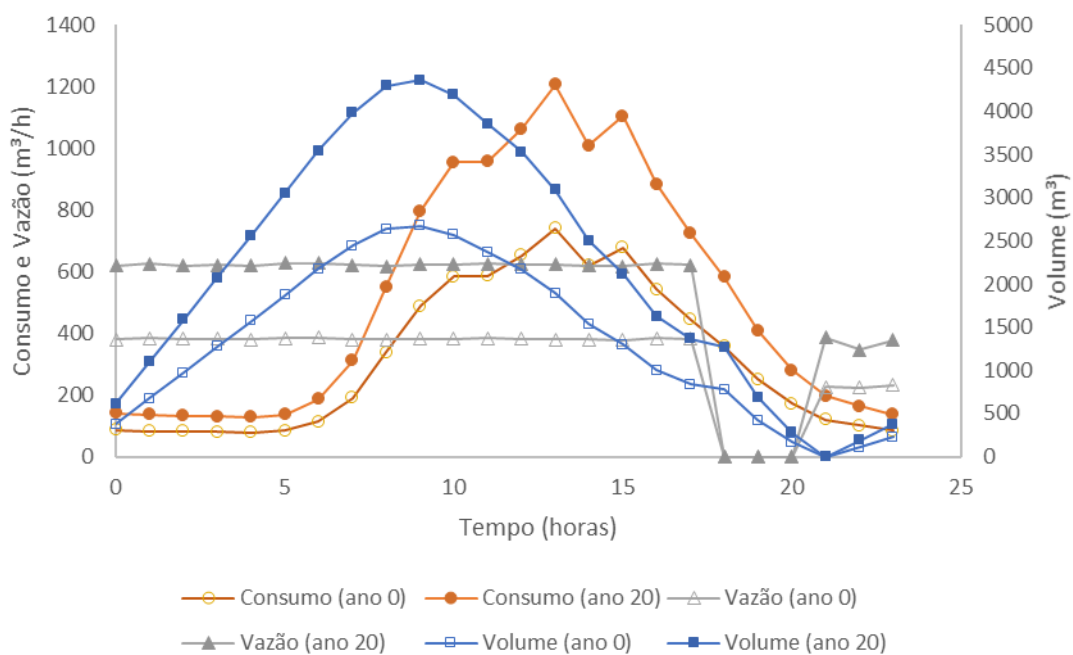


Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 3 (1.511 e 2.463 m³/d) inserida no algoritmo SCE-UA ( $H_g = 10$  m;  $L = 100$  m;  $D = 100$  mm;).





Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 3 ( $3.777$  e  $6.157 \text{ m}^3/\text{d}$ ) inserida no algoritmo SCE-UA ( $H_g = 10 \text{ m}$ ;  $L = 100 \text{ m}$ ;  $D = 150 \text{ mm}$ );.



Resultados para volume e vazão bombeada junto à curva de consumo 3 ( $7.555$  e  $12.315 \text{ m}^3/\text{d}$ ) inserida no algoritmo SCE-UA ( $H_g = 10 \text{ m}$ ;  $L = 100 \text{ m}$ ;  $D = 250 \text{ mm}$ );.