

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

ANA CAROLINA VICTÓRIA DA COSTA RIBEIRO

DEFINIÇÃO DE LINHA BASE OTIMIZADA APLICADA A DIAGNÓSTICOS
HIDROENERGÉTICOS DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA
COM VELOCIDADE ROTACIONAL CONSTANTE

PORTO ALEGRE
2021

ANA CAROLINA VICTÓRIA DA COSTA RIBEIRO

DEFINIÇÃO DE LINHA BASE OTIMIZADA APLICADA A DIAGNÓSTICOS
HIDROENERGÉTICOS DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA
COM VELOCIDADE ROTACIONAL CONSTANTE

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

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Dai Prá

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

PORTO ALEGRE
2021

CIP - Catalogação na Publicação

RIBEIRO, ANA CAROLINA VICTORIA DA COSTA
DEFINIÇÃO DE LINHA BASE OTIMIZADA APLICADA A
DIAGNÓSTICOS HIDROENERGÉTICOS DE SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA COM VELOCIDADE ROTACIONAL
CONSTANTE / ANA CAROLINA VICTORIA DA COSTA RIBEIRO. --
2021.

135 f.

Orientador: MAURICIO DAI PRÁ.

Coorientador: MARCELO GIULIAN MARQUES.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
DE ÁGUA. 2. DIAGNÓSTICO HIDROENERGÉTICO. 3. LINHA BASE
OTIMIZADA. I. DAI PRÁ, MAURICIO, orient. II. MARQUES,
MARCELO GIULIAN, coorient. III. Título.

ANA CAROLINA VICTÓRIA DA COSTA RIBEIRO
DEFINIÇÃO DE LINHA BASE OTIMIZADA APLICADA A DIAGNÓSTICOS
HIDROENERGÉTICOS DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
DE ÁGUA COM VELOCIDADE ROTACIONAL CONSTANTE

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

Aprovado em: Porto Alegre, 29 de outubro de 2021.

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá – IPH/UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques – IPH/UFRGS
Coorientador

Prof. Dr. Daniela Guzzon Sanagiotto – IPH/UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Joice Cristini Kuritza – UTFPR
Examinador

Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva – UNIFEI
Examinador

À minha família.
Em especial, ao meu filho,
Arthur Ribeiro Cirimbelli.
Razão da minha perseverança e
amor da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Claudionor e Solange, e irmãos, Carlos Eduardo e Carlos Alexandre, minha família, por serem meus maiores exemplos de trabalho e superação, por proporcionarem a base necessária ao meu desenvolvimento pessoal e profissional, pelo apoio e confiança de sempre.

Ao meu esposo, Leonardo Cirimbelli Rocha, por trilhar a caminhada da vida ao meu lado e por ter me dado forças em todos os momentos em que meu otimismo falhou.

Ao meu filho, Arthur Ribeiro Cirimbelli, por ter aberto mão da nossa convivência diária para que a “mamãe” pudesse chegar até aqui. Meu esforço é por ti e para ti.

Ao Prof. Dr. Mauricio Dai Prá, orientador deste trabalho, e ao Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques, coorientador. Meu muito obrigada àqueles que foram mais que professores e orientadores, foram amigos, sempre externando palavras de compreensão e acolhimento nos momentos mais difíceis.

Ao meu grande parceiro de estudo e futuro Engenheiro Hídrico, Pedro Guido Mottes Bassegio. Seu apoio e ajuda foram essenciais para que esta etapa da minha vida fosse concluída. Minha eterna gratidão por não somente compartilhar seu tempo e conhecimento em programação, mas também pela troca, pelo respeito e humildade demonstrada em todas as nossas discussões.

Ao Guilherme Santanna Castiglio, pelo comprometimento com essa pesquisa, por compartilhar seu conhecimento no software Matlab e pelas sempre excelentes contribuições.

Ao IPH, pela estrutura, professores, colegas e todo conhecimento compartilhado.

RESUMO

Com a evolução, a sociedade transformou a energia elétrica em um recurso vital, tornando o setor energético em um fator importante de crescimento e um elemento fundamental para o desenvolvimento sustentável. No saneamento, estações de bombeamento são amplamente utilizadas em sistemas de abastecimento de água e a alimentação das suas bombas e motores representa cerca de 90% da energia consumida por este setor no Brasil. Estudos que visem nortear a adequação destes sistemas às condições e rotinas operacionais que conduzam a uma maior eficiência energética devem ser encarados com prioridade. Neste contexto, construiu-se uma metodologia para análise geral da eficiência e definição de uma Linha Base Otimizada para utilização em diagnósticos hidroenergéticos de bombeamentos com velocidade rotacional constante, baseada na aplicação dos conceitos de energia mínima e operação em máximo rendimento. Nesta pesquisa, foi desenvolvido modelo de simulação para representar o custo global associado às 255 soluções compostas pelas combinações das variáveis de decisão adotadas: número de bombas operativas associadas; volume útil do reservatório superior; e, coeficiente α (alfa), que determina o espaço de busca das vazões de bombeamento candidatas. Para a otimização das variáveis, adotou-se como função objetivo o custo global (operação e implantação) e, para minimizá-lo, empregou-se um algoritmo mono objetivo de busca exaustiva. Aplicou-se a metodologia a dois estudos de caso, cujas características e informações de *input* no modelo foram obtidas a partir de medições e monitoramento em sistemas reais, denominados Norte e Nordeste. A partir dos resultados, foi possível conhecer o perfil energético dos sistemas, além de indicar a solução ótima e, conseqüentemente, as condições operacionais, que resultaram em uma redução no consumo de energia de 31,9% e 62,9% e economia de custo de 32,3% e 72,8%, para os sistemas Norte e Nordeste, respectivamente. A metodologia e o algoritmo desenvolvidos se mostraram úteis para identificar as intervenções necessárias em favor da eficiência energética, permitindo avaliar o benefício da otimização dos sistemas em relação à operação corrente através da análise de indicadores.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Sistemas de Bombeamento.

Diagnóstico Hidroenergético. Linha Base Otimizada.

ABSTRACT

Over the course of its evolution, society has transformed electricity into a vital resource, making the energy sector an important factor for economic growth and a fundamental element for sustainable development. In sanitation, pumping stations are widely used in water supply systems and the power to their pumps and motors represents around 90% of the energy consumed by this sector in Brazil. Studies that aim to guide the adequacy of these systems to operating conditions and routines that lead to greater energy efficiency must be considered as a priority. In this context, a methodology was built for the general analysis of efficiency and definition of an Optimized Baseline for use in hydro-energy diagnostics of pumping systems with constant rotational speed, based on the application of the minimum energy concepts and operation at maximum efficiency. In this research, a simulation model was developed to represent the global cost associated with the 255 solutions composed by the adopted decision variables combinations: number of operating pumps; useful volume of the upper reservoir; and, coefficient α (alpha), which determines the search space of the candidate pumping flows. For the variables' optimization, the global cost (operation and implementation) was adopted as the objective function and, to minimize it, an exhaustive search algorithm was used. The methodology was applied to two case studies, whose characteristics and model input information were obtained from real systems measurements and monitoring, called North and Northeast. From the results, it was possible to know the systems energy profile, in addition to indicating the optimal solution and, consequently, the operating conditions, that resulted in energy reduction of 31.9% and 62.9% and cost savings of 32.3% and 72.8% for the North and Northeast systems, respectively. The developed methodology and algorithm proved to be useful to identify the necessary interventions in favor of energy efficiency, allowing to evaluate the benefit of the systems optimization in relation to the current operation through the indicator analysis.

Key-words: Energy Efficiency. Pumping Systems.
Hydro-energy Diagnostic. Optimized Baseline.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Variações de consumo anual para cálculo de k_1 | 31 |
| Figura 2 – Variações de consumo diário para cálculo de k_2 | 31 |
| Figura 3 – Conceito de LBE e período de reporte | 38 |
| Figura 4 – Variação do custo total do sistema, segundo o diâmetro da adutora | 44 |
| Figura 5- Estrutura das tarifas de energia elétrica | 46 |
| Figura 6 – Processo de otimização | 49 |
| Figura 7 – Sistema de abastecimento de água..... | 51 |
| Figura 8 – Arranjo clássico..... | 52 |
| Figura 9 – Fluxo das etapas de desenvolvimento das atividades..... | 54 |
| Figura 10 – Etapas da rotina de definição da Linha Base Otimizada..... | 55 |
| Figura 11 – Função ajustada para determinação de coeficientes de perda de carga localizada – K_s | 59 |
| Figura 12 – Curva de confiabilidade de Barringer-Nelson | 60 |
| Figura 13 – Rendimentos nominais mínimos: 2 Polos (Portaria Interministerial nº1) | 62 |
| Figura 14 – Rendimentos nominais mínimos: 4 Polos (Portaria Interministerial nº1) | 62 |
| Figura 15 – Ponto de operação em função do envelhecimento da tubulação | 64 |
| Figura 16 – Curva adimensional para bombas centrífugas | 65 |
| Figura 17 – Série histórica do tributo PIS/Cofins | 70 |
| Figura 18 – Função ajustada para estimativa de custo de implantação de estações elevatórias | 72 |
| Figura 19 – Método dos três pontos para as curvas da bomba e do sistema de recalque | 75 |
| Figura 20 – Curvas de Demanda adimensionalizadas e Fator de Demanda | 83 |
| Figura 21 – Consumos de energia associados às diferentes soluções – Sistema Nordeste | 85 |
| Figura 22 – Consumos de energia na ponta e fora da ponta associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Nordeste | 85 |

| | |
|--|-----|
| Figura 23 – Consumos de energia associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Norte | 86 |
| Figura 24 – Consumos de energia na ponta e fora da ponta associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Norte | 87 |
| Figura 25 – Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal verde – Sistema Nordeste..... | 88 |
| Figura 26 – Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal verde – Sistema Nordeste..... | 88 |
| Figura 27 – Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal verde – Sistema Norte..... | 90 |
| Figura 28 – Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal verde – Sistema Norte..... | 90 |
| Figura 29 – Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal azul – Sistema Nordeste..... | 91 |
| Figura 30 – Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal azul – Sistema Nordeste | 92 |
| Figura 31 – Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal azul – Sistema Norte..... | 93 |
| Figura 32 – Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal azul – Sistema Norte..... | 93 |
| Figura 33 – Dinâmica de operação do Sistema Norte – Vútil = 100 m ³ (20%) | 96 |
| Figura 34 – Dinâmica de operação do Sistema Norte – Vútil = 500 m ³ (100%) | 96 |
| Figura 35 – Consumo de energia – Linha Base Otimizada – Sistema Nordeste | 97 |
| Figura 36 – Consumo de energia – Linha Base Otimizada – Sistema Norte | 98 |
| Figura 37 – Variação do ponto de operação no período de análise – Sistema Norte | 99 |
| Figura 38 – Variação do ponto de operação no período de análise – Sistema Nordeste | 99 |
| Figura 39 – Variação da relação $Q_{LB_nom}/Q_{1,1}$ no decorrer do período de análise – Sistema Norte | 100 |
| Figura 40 – Variação da relação $Q_{LB_nom}/Q_{1,1}$ no decorrer do período de análise – Sistema Nordeste | 100 |
| Figura 41 – Percentagem das parcelas constituintes do custo global obtido para ambos os sistemas | 102 |
| Figura 42 – Tempo de bombeamento x Tempo – Sistema Norte | 104 |

| | |
|--|-----|
| Figura 43 – Tempo de bombeamento x Tempo – Sistema Nordeste | 104 |
| Figura 44 – Consumo de energia x Tempo – Sistema Norte | 106 |
| Figura 45 – Consumo de energia x Tempo – Sistema Nordeste | 106 |
| Figura 46 – Potencial de Economia de Custos (PC) e Potencial de Economia de Energia (PE) – Sistema Nordeste e Norte | 107 |
| Figura 47 – Variações percentuais do benefício obtido pela Linha Base Otimizada em relação à operação do sistema atual | 108 |
| Figura 48 – Comportamento dos indicadores de desempenho ao longo do período de análise – Sistema Nordeste e Norte | 111 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Frequência de partida – recomendação KSB | 73 |
| Tabela 2 – Variáveis de decisão e restrições aplicadas à busca | 77 |
| Tabela 3 – Caracterização geral dos sistemas estudados | 81 |
| Tabela 4 – Características dos conjuntos motobomba instalados | 81 |
| Tabela 5 – Dados medidos em campo | 81 |
| Tabela 6 – Tarifação aplicada nas simulações | 83 |
| Tabela 7 – Soluções definidas como Linha Base Otimizada para os sistemas em estudo | 97 |
| Tabela 8 – Soluções definidas como Linha Base Otimizada para os sistemas em estudo | 101 |
| Tabela 9 – Comparativo entre operação existente e operação proposta pela Linha Base | 103 |
| Tabela 10 – Indicadores de desempenho calculados para os sistemas estudados | 109 |

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASE – *Alliance to Save Energy*

BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul

CEN – Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado (Ph5)

CME – Custo Médio de Energia Elétrica

CMB – Conjunto motobomba

Cofins – Contribuição para Financiamento da Seguridade Social

Eletrobras – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

FFD – Ferro Fundido Dúctil

IWA – *International Water Association*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMS – Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IDE – Indicadores de Desempenho Energético

INCC – Índice Nacional de Custo da Construção

LBE – Linha Base Energética

LBO – Linha Base Otimizada

N – Norte

NBR – Norma Brasileira

NE – Nordeste

SE – Sudeste

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

Planasa – Plano Nacional do Saneamento

Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

Procel Sanear – Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental

PIS – Programas de Integração Social

PVC – Cloreto de Polivinil

SAA – Sistema de Abastecimento de Água.

SCE-UA – *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona*

SNIS – Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento.

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

- Na – Número de anos de uso da tubulação
- C – Coeficiente de rugosidade da equação de Hazen-Williams
- C_{am} – Custo de implantação
- C_{en} – Custo de operação
- $C_{energia}$ – Custo energético
- C_L – Custo de implantação linear do tubo
- C_{min} – Custo mínimo
- CDE – Consumo Diário de Energia
- CE – Consumo Específico de Energia Elétrica (IN_{058})
- CEE_L – Consumo Específico por Comprimento de Adutora
- CEp – Energia elétrica consumida no horário de ponta
- CEfp – Energia elétrica consumida fora do horário de ponta
- CEN – Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado (Ph5)
- CI – Custo de implantação
- $CI_{tubulação}$ – Custo de implantação de adutora
- CG – Custo global
- CME – Custo Médio de Energia Elétrica
- CO – Custo de operação
- CVB – Custo por Volume Bombeado.
- D – Diâmetro
- D_{ot} – Diâmetro ótimo
- e – Taxa de aumento anual de energia

E – Energia consumida

F_a – Fator de atualização

g – Aceleração da gravidade

$H_{1,1}$ – Altura manométrica no ponto de máximo rendimento

H_f – Perda de carga total no sistema

h_f – Perda de carga linear

H_{LB} – Altura manométrica em análise

h_s – Perda de carga singular

H_g – Desnível geométrico

H_m – Altura manométrica

$H_{1,1}$ – Altura manométrica no ponto de máximo rendimento

i – Taxa de juro anual

ij – taxa de juros

K_s – Coeficiente de perdas de carga para válvulas e acessórios

k_1 – Coeficiente do dia de maior consumo

k_2 – Coeficiente da hora de maior consumo

L – Comprimento

n – Período de amortização

n_b – número de bombas em associação

N – Rotação nominal

N_s – Velocidade de rotação específica

P_{energia} – Preço final de energia elétrica cobrado pela concessionária

P_{inst} – Potência instalada

PC – Potencial de Redução de Custos

PE – Potencial de Redução de Energia

$P_{el_{motor}}$ – Potência elétrica do motor

Q – Vazão

$Q_{1,1}$ – Vazão no ponto de máximo rendimento

Q_b – Vazão nominal de bombeamento

Q_{LB} – Vazão em análise

$Q_{LB_{nom}}$ – Vazão nominal em análise

Q_{pico} – Vazão de pico da curva de demanda

tee - taxa de aumento de energia elétrica

T_p – Tarifa de consumo no horário de ponta

T_{fp} – Tarifa de consumo fora do horário de ponta

T_D – Tarifa de demanda

V – Volume

$V_{aduzido}$ – Volume aduzido

$V_{consumido}$ – Volume consumido

$V_{interno}$ – Volume interno

$V_{útil}$ – Volume útil

$v_{adutora}$ – Velocidade média do escoamento na adutora

$v_{mín}$ – Velocidade média mínima do escoamento na adutora

$v_{máx}$ – Velocidade média máxima do escoamento na adutora

VP_{op} – Valor Presente do custo operacional

γ – Peso específico da água

Δt – Tempo de bombeamento

η – Eficiência do conjunto motobomba

η_{bomba} – Rendimento da bomba

η_{LB} – Rendimento do novo conjunto motobomba

$\eta_{\text{máx}}$ – Rendimento máximo

η_{motor} – Rendimento do motor elétrico

α – Alfa

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 20 |
| 2 DIRETRIZES DA PESQUISA | 23 |
| 2.1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO | 23 |
| 2.2 OBJETIVO PRINCIPAL | 23 |
| 2.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS | 23 |
| 2.4 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES | 24 |
| 2.5 DELINEAMENTO | 25 |
| 3 CONTEXTUALIZAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 26 |
| 3.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA | 26 |
| 3.1.1 Concepção e componentes do SAA | 26 |
| 3.1.1.1 Manancial | 26 |
| 3.1.1.2 Captação | 27 |
| 3.1.1.3 Estação de Tratamento | 27 |
| 3.1.1.4 Estação Elevatória | 27 |
| 3.1.1.5 Adutora | 28 |
| 3.1.1.6 Reservatório | 29 |
| 3.1.1.7 Rede de distribuição | 29 |
| 3.1.2 Variações de consumo | 30 |
| 3.2 CONCEITOS GERAIS RELACIONADOS À EFICIÊNCIA E GESTÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO | 32 |
| 3.2.1 Energia mínima | 33 |
| 3.2.2 Diagnóstico Hidroenergético | 35 |
| 3.2.2.1 Indicadores de Desempenho Energético (IDE) | 35 |
| 3.2.2.2 Linha de Base Energética (LBE) | 37 |
| 3.2.3 Oportunidades de economia de energia | 39 |
| 3.2.3.1 Medidas relacionadas com a tarifa de energia | 39 |
| 3.2.3.2 Medidas para aumentar a eficiência das bombas | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.3.3 Redução de perdas de carga | 41 |
| 3.2.3.4 Redução de vazamentos | 41 |
| 3.2.3.5 Melhoras na operação do sistema | 43 |
| 3.3 ANÁLISE ECONÔMICA PARA SISTEMAS DE BOMBEAMENTO | 43 |
| 3.3.1 Custos fixos de implantação | 44 |
| 3.3.2 Custo de operação | 45 |
| 3.3.2.1 Tipos de Tarifação | 45 |
| 3.3.2.2 Tributação incidente | 47 |
| 3.3.2.3 Valor presente do custo de operação | 47 |
| 3.4 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO | 48 |
| 4 METODOLOGIA | 51 |
| 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 51 |
| 4.2 ROTINA PARA DEFINIÇÃO DA LINHA BASE OTIMIZADA APLICADA À DIAGNÓSTICOS HIDROENERGÉTICOS | 55 |
| 4.2.1 Levantamento de dados e caracterização do sistema de bombeamento em análise | 56 |
| 4.2.2 Dimensionamento e determinação das especificações do bombeamento... | 56 |
| 4.2.2.1 Determinação da vazão e da altura manométrica | 57 |
| 4.2.2.2 Determinação do ponto de operação de máximo rendimento | 59 |
| 4.2.2.3 Cálculo da potência do novo conjunto motobomba | 61 |
| 4.2.3 Ajuste do ponto de operação em função do envelhecimento da tubulação | 63 |
| 4.2.4 Verificação da operação do reservatório existente e do atendimento à demanda | 66 |
| 4.2.4.1 Projeção de consumos para o período de análise | 66 |
| 4.2.4.2 Simulação da rotina de operação do reservatório | 67 |
| 4.2.5 Determinação dos consumos energéticos e estimativa de custos | 68 |
| 4.3 ROTINA PARA OBTENÇÃO DO PERFIL ENERGÉTICO E DA OPERAÇÃO USUAL DO SISTEMA ELEVATÓRIO EXISTENTE | 74 |
| 4.4 CONSIDERAÇÕES DO ALGORITMO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO | 76 |

| | |
|---|-----|
| 4.5 ANÁLISE DO BENEFÍCIO TÉCNICO-FINANCEIRO DA LINHA BASE OTIMIZADA | 78 |
| 5 ESTUDOS DE CASO | 80 |
| 5.1 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE BOMBEAMENTO ESTUDADOS | 80 |
| 5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 84 |
| 5.2.1 Correlação entre os resultados obtidos para as soluções e suas variáveis de decisão | 84 |
| 5.2.1.1 Consumos de energia das diversas soluções | 85 |
| 5.2.1.2 Custo operacional e global das diversas soluções considerando modalidade tarifária horo-sazonal verde | 88 |
| 5.2.1.3 Custo operacional e global das diversas soluções considerando modalidade tarifária horo-sazonal azul | 91 |
| 5.2.2 Perfil Operacional e Energético da Linha Base Otimizada | 94 |
| 5.2.3 Benefício técnico-financeiro do sistema proposto | 102 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES | 112 |
| REFERÊNCIAS | 116 |
| APÊNDICE | 122 |

1 INTRODUÇÃO

A estreita relação existente entre a qualidade do saneamento básico disponibilizado à população e os índices de saúde e desenvolvimento dos grandes centros urbanos determina a extrema importância de um atendimento adequado, colocando o sistema de abastecimento de água como uma das principais prioridades da sociedade.

Dentro deste contexto, o governo federal brasileiro vem promovendo, desde a década de 1970, uma política de ampliação da abrangência de distribuição de água potável através do Plano Nacional do Saneamento (Planasa), partindo de um índice de 50,4% de atendimento da população urbana brasileira em 1970 (MONTEIRO, 1993) e atingindo recentes níveis de atendimento de cerca de 92,9% da população urbana, de acordo com SNIS (BRASIL, 2020a).

Face a esta generalização do alcance de atendimento e ao natural aumento de demandas de água em virtude do crescimento populacional, fica cada vez mais evidente a necessidade de repensar e otimizar a utilização dos recursos, tanto hídricos quanto energéticos. De fato, a gestão dos recursos de água e energia são os principais desafios que, a nível mundial, a sociedade moderna enfrenta.

Hoffman (2012) indica que cerca de 7% do consumo mundial de energia elétrica é direcionado para o tratamento de água bruta e esgoto e para o abastecimento humano, agrícola e industrial. Considerando-se a pesquisa da *Alliance to Save Energy* (JAMES *et al.*, 2002), a qual afirma que, no início do século XXI, o consumo energético no ciclo hídrico humano girava em torno de 2 e 3% do consumo energético mundial, é possível observar a ocorrência de um incremento de mais de duas vezes no consumo do recurso por esta atividade em um curto espaço de tempo.

Frente a estes e outros dados semelhantes, desde 1985 o governo brasileiro tem agido no sentido de reduzir o consumo e a demanda de energia elétrica no país, mais notoriamente após a crise nacional de abastecimento no setor elétrico de 2001, adotando diversas medidas, das quais, Schmidlin Junior (2006) destaca a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel).

Desde 2003, dentro do Procel, foi instituído o Procel Sanear — Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental, o qual atua na minimização do desperdício de energia elétrica em serviços de saneamento (ELETROBRAS, 2016). Segundo Gomes (2014), as despesas com energia elétrica foram acentuadas de forma significativa nas últimas duas décadas e já ocupam a segunda colocação na lista das despesas operacionais do setor de saneamento.

Um exemplo da necessidade de minimização do desperdício de energia elétrica é o levantamento apresentado pelo Plano Nacional de Eficiência Energética (BRASIL, 2012) que apontou um potencial de recuperação de energia elétrica devido a energia desperdiçada no setor de saneamento do Brasil de 4,705 TWh em 2007.

No Brasil, no ano de 2019, as despesas com energia elétrica das companhias prestadoras do serviço de saneamento atingiram R\$ 7,12 bilhões, tendo sido consumidos 11,84 TWh com abastecimento de água (BRASIL, 2020a), o que representa cerca de 89,3% da energia total consumida pelo setor no referido ano. Entretanto, cada vez mais essas empresas vêm sentindo a necessidade de se tornarem mais competitivas, de forma que a busca pela racionalização de suas estruturas de custos vem se mostrando crescente.

Diante do desafio de se implantar obras de saneamento a custos cada vez menores, evidencia-se a importância de impulsionar atividades e estudos voltados à redução de consumo de energia. Assim, em 2009, o Procel Sanear criou a rede LENHS (Laboratório de Eficiência Energética em Hidráulica e Saneamento) com o intuito de promover atividades de ensino, pesquisa e capacitação relacionadas à eficiência energética no saneamento.

Dentre os estudos mais recentes elaborados pela rede LENHS, destacam-se: Kuritza et al. (2017), que estudaram as características adimensionais das condições de operação de bombas centrífugas para estimativas prévias de projetos de sistemas de bombeamento visando à eficiência; Kuritza (2017), que elaborou uma metodologia para análise geral da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água na fase de projeto; Salvino (2018), que estudou a utilização de automação via redes neurais artificiais (RNA) no controle de pressões de serviço de sistemas de abastecimento de água; Moreira (2020), que avaliou a economia de energia na

aplicação do controle Neuro-Fuzzy na velocidade de CMBs; Lopes (2020), que desenvolveu um modelo de simulação para minimizar o custo de vida de um sistema de bombeamento de água com velocidade rotacional constante; entre outros.

Além da questão financeira, a indústria do saneamento é continuamente pressionada por parte de órgãos ambientais e, até mesmo do mercado mundial, para que o comprometimento com ações de proteção ao meio ambiente seja constantemente renovado, focando numa exploração racional e sustentável dos recursos naturais. A partir disso, é possível afirmar que a redução no consumo desse recurso resultaria não apenas em benefícios econômicos, mas também em um impulso para o desenvolvimento sustentável.

Neste contexto, foi sancionada a Lei nº 14.026, de 15 em julho de 2020 (BRASIL, 2020b), que prevê a universalização dos serviços de saneamento básico até 2033, garantindo que 99% da população brasileira tenha acesso à água potável. O novo Marco Legal do Saneamento, como é conhecida esta lei, representa um estímulo à redução progressiva de perdas de água, à racionalização de seu consumo pelos usuários e fomento à eficiência energética, em conformidade com as demais normas ambientais e de saúde pública.

A preocupação com o meio ambiente, saúde pública e gestão de resíduos não deve ser dissociada da questão do saneamento e, nesses pontos, o novo Marco representa significativo avanço.

Baseado no cenário apresentado, o desenvolvimento desta pesquisa é motivado no desejo de contribuir para que o saneamento no Brasil se desenvolva cada vez mais em assuntos pertinentes à eficiência energética, proporcionando elementos e ferramentas passíveis de utilização na gestão hidroenergética das companhias responsáveis pela prestação deste serviço e no direcionamento de melhorias na operação de seus sistemas de bombeamento.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

Tendo como motivação a racionalização dos recursos energéticos disponíveis e a redução das altas despesas operacionais causadas pelo excessivo consumo energético observado em estações de bombeamento, esta pesquisa está focada na aplicação dos conceitos de eficiência energética a sistemas de bombeamento de água em operação com velocidade rotacional constante, cuja operação atual não abrange uma adequada análise energética. Estes sistemas

Assim, propõe-se uma avaliação hidroenergética, a fim de basear tomadas de decisão quanto às intervenções desejáveis em favor da minimização do consumo e custo energético, analisando aspectos técnicos e financeiros e sugerindo um novo regime operacional, de acordo com o caso.

2.2 OBJETIVO PRINCIPAL

Desenvolver uma metodologia para uma análise prévia do desempenho e da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água, cuja operação existente possui velocidade rotacional constante.

2.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

São objetivos secundários:

- a) desenvolver rotina de cálculo para estabelecer uma linha base otimizada de sistemas existentes por meio da aplicação do conceito de energia mínima;
- b) desenvolver um algoritmo de otimização das variáveis hidroenergéticas preponderantes na determinação do consumo de energia;
- c) validar a metodologia desenvolvida através da sua aplicação a sistemas de bombeamento reais como forma de estudo de caso;
- d) avaliar a sensibilidade das variáveis vazão de bombeamento, volume útil e número de bombas associadas em paralelo no desempenho hidroenergético de sistemas;
- e) identificar o melhor enquadramento tarifário de energia elétrica, buscando uma maior sustentabilidade de sistemas;

- f) propor leis de operação que conduzam à uma operação mais eficiente do ponto de vista hidroenergético;
- g) avaliar o benefício técnico-financeiro da Linha Base Otimizada através da análise e indicadores.

2.4 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES

O trabalho se delimita à avaliação do consumo direto de energia elétrica a partir do bombeamento e transporte de água até a sua reservação, tendo-se fixado um horizonte de 20 anos para a análise, com o objetivo de definir melhorias e medidas para tornar o sistema mais eficiente e, conseqüentemente, minimizar custos.

Uma importante delimitação do estudo está no controle da operação do bombeamento através de um sistema de chave-boia, onde ocorre o acionamento dos conjuntos motobombas no momento em que o volume de água no reservatório superior se encontra no nível mínimo definido. Em contrapartida, quando o nível de água no reservatório atinge o nível máximo preestabelecido, os conjuntos motobombas são desligados, interrompendo a sua operação até que o nível mínimo seja atingido novamente.

O sistema de controle por chave-boia foi escolhido para o presente estudo pela sua ampla utilização nos sistemas existentes e menor custo de implantação quando comparado à sistemas com inversores de frequência, por exemplo. Desta forma, esta delimitação reflete numa maior abrangência de aplicação da metodologia de definição da linha base otimizada proposta e desenvolvida por esta pesquisa, uma vez que contempla a grande maioria das situações de projeto e em operação no país.

Ficam fora do âmbito desta dissertação estudos que contemplem a utilização de inversores de frequências e quaisquer tecnologias de energia renováveis; estudo e planos relativos à redução das perdas de água na rede de distribuição; e horizontes temporais superiores ao especificado para o estudo.

É limitação deste trabalho a utilização de dados coletados por períodos curtos de observação *in loco*, não sendo feito o acompanhamento dos sistemas estudados por um período suficiente para observação de alterações sazonais nas características e volume de consumo.

2.5 DELINEAMENTO

O desenvolvimento deste trabalho seguiu as etapas:

- a) pesquisa e revisão bibliográfica;
- b) estudo, desenvolvimento e definição da metodologia elaborada para pré-diagnóstico hidroenergético de sistemas de abastecimento de água;
- c) escolha dos estudos de caso a serem utilizados;
- d) programação do algoritmo de otimização através da busca exaustiva utilizando o *software* MATLAB da *Mathworks*;
- e) obtenção e análise dos resultados obtidos a partir da rotina computacional desenvolvida para os estudos de caso selecionados;
- f) conclusões.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item são apresentados conceitos e definições que constituem a base teórica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

3.1.1 Concepção e componentes do SAA

De acordo com Tsutiya (2006), a concepção de um sistema de abastecimento de água é o conjunto de estudos e conclusões que embasam o estabelecimento de diretrizes e definições necessárias à completa caracterização de um sistema a ser projetado.

O estudo de concepção geralmente é realizado na etapa inicial de projeto, entretanto, às vezes pode ser realizada em sistemas existentes a partir de um diagnóstico técnico. De uma maneira ou de outra, o estudo deve ser estendido aos diversos componentes do sistema de abastecimento.

De maneira geral, os sistemas de abastecimento urbanos são compostos por manancial, captação, estação de tratamento, estação elevatória, adutoras, reservatórios e rede de distribuição, porém, é importante enfatizar, conforme feito por Kuritza (2017), que as suas características dependem das condições topográficas do local de atendimento, da população a ser abastecida e de outras condições locais. Tais componentes dos sistemas de abastecimento urbanos são conceituados e descritos a seguir.

3.1.1.1 Manancial

Manancial é a fonte hídrica supridora do sistema de abastecimento de água. Segundo Brasil (2006a), a escolha de um manancial deve considerar aspectos relacionados à quantidade de água (capacidade hídrica), à facilidade de adução e à qualidade da água (condições sanitárias adequadas). Em função da disponibilidade hídrica da região, algumas vezes pode ser necessária a seleção de mais de um manancial para suprimento do sistema de abastecimento. Brasil (2006b) aponta que os mananciais

podem ser do tipo subterrâneo freático ou confinado, superficial com ou sem acumulação e águas pluviais.

3.1.1.2 Captação

Captação é o conjunto de equipamentos e instalações utilizados para a retirada da vazão de água necessária ao sistema do manancial (BRASIL, 2019a). A escolha do tipo de captação e seu arranjo deve levar em consideração as condições locais, hidrológicas e topográficas, favorecendo a operação e manutenção dos seus componentes e evitando interrupções na alimentação do sistema. Esta é a parte do sistema onde primeiro se observa algum consumo de energia, uma vez que, na maioria dos casos, a topografia não permite o escoamento por gravidade até a unidade de tratamento, sendo necessário projetar um sistema de bombeamento de água bruta.

3.1.1.3 Estação de Tratamento

Estação de tratamento é o conjunto unidades destinado a regular as características da água para adequação aos padrões de potabilidade previstos pelo Ministério da Saúde previstos na Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), a qual altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017. O tratamento da água engloba as etapas de medição, floculação, decantação e filtração, onde são dosados os produtos químicos necessários ao tratamento. A etapa de tratamento de água também implica em certo consumo de energia para funcionamento das bombas dosadoras, misturadores, válvulas com atuação elétrica, entre outros equipamentos.

3.1.1.4 Estação Elevatória

Estação elevatória é o conjunto de instalações e equipamentos eletromecânicos necessários para elevar a água para a próxima unidade do sistema, de modo a vencer as barreiras da carga hidráulica. Azevedo Netto e Netto (1998) observam que os bombeamentos devem vencer a diferença de nível entre dois pontos acrescidos das

perdas de carga do percurso (perda por atrito ao longo da extensão da tubulação adutora e perdas localizadas), de forma a converter trabalho mecânico em energia ao fluido.

As estações elevatórias são compostas por tubulações de sucção e de recalque, válvulas, registros, conexões, poço úmido e seco, motor e bomba hidráulica, os quais variam conforme o porte do sistema, características da área, regime de trabalho entre outros fatores.

A maior parte do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água ocorre nas estações elevatórias. Gomes e Bezerra (2012) afirmam que os conjuntos elevatórios são responsáveis pelo consumo de 90% da energia total consumida pelo sistema, devendo ser alvo de ações de eficiência energética.

3.1.1.5 Adutora

Adutora é a canalização destinada a conduzir água entre as unidades de abastecimento (MAGNIN *et al.*, 2004). Além de serem classificadas em adutoras de água bruta ou adutoras de água tratada, essas tubulações podem ser classificadas de acordo com a energia utilizada no transporte, sendo identificadas como adutoras de gravidade ou de recalque.

Os materiais comumente empregados para as tubulações são o Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Cloreto de Polivinil (PVC), Ferro Fundido Dúctil (FFD) e aço soldado, por serem de fácil obtenção no mercado de saneamento. Além disso, o projeto deve contemplar estudos para verificar a necessidade de determinadas peças especiais, tais como ventosas, válvulas de parada e de descarga, que acarretam em um acréscimo de perda de carga no sistema adutor.

A implantação de adutoras representa um grande investimento às companhias de saneamento, uma vez que, dependendo da sua extensão, complexidade de projeto, material escolhido e magnitude do diâmetro selecionado, implica em um custo expressivo em relação ao custo global da obra de um sistema de adução (compreendido por elevatória, adutora e reservatório).

A escolha por determinado material, diâmetro da tubulação e peças especiais a serem empregadas representam uma maior ou menor perda de carga (tanto linear quanto localizada) acrescidas ao sistema e, portanto, estão diretamente relacionadas aos custos de operação e implantação do sistema. Desta forma, cabe ao projetista fazer as análises necessárias à tomada de decisão quanto às adequadas características e especificações de projeto, buscando sempre a minimização dos custos.

3.1.1.6 Reservatório

Reservatório é o elemento destinado a regularizar as variações entre as vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição (ABNT, 1994). É um elemento de acumulação responsável pela compensação entre vazão aduzida e vazão demandada, permitindo que o sistema permaneça em funcionamento em momentos de aumento de consumo e/ou breve paralisação das etapas anteriores do sistema.

Em relação a sua característica construtiva, são classificados em: enterrados, semienterrados, apoiados ou elevados. Em relação ao seu posicionamento no sistema, podem ser de montante ou de jusante.

A capacidade de um reservatório deve ser definida levando em consideração a regra de operação mais eficiente, visando definir um volume de reservação que minimize a operação do bombeamento em horário de pico ou que impliquem em equipamentos de grandes potências. No geral, quanto maior a capacidade de reservação de um sistema, maior é a flexibilidade operacional permitida (KURITZA, 2017).

3.1.1.7 Rede de distribuição

Rede de distribuição é a rede de distribuição é composta pela interligação de diversas tubulações com a finalidade de distribuir a água potável proveniente de reservatórios e/ou bombeamentos até os pontos de consumo, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendada.

Deve-se ser vigilante quanto às pressões em redes de distribuição que, quando menores às preconizadas na NBR 12.218 (ABNT, 2017a), impedem o adequado abastecimento aos usuários e, quando maiores, podem gerar vazamentos e aumento dos volumes de água perdidos.

3.1.2 Variações de consumo

Para o planejamento e gerenciamento de abastecimento de água, a previsão do consumo de água é um dos fatores de fundamental importância (TSUTIYA, 2006).

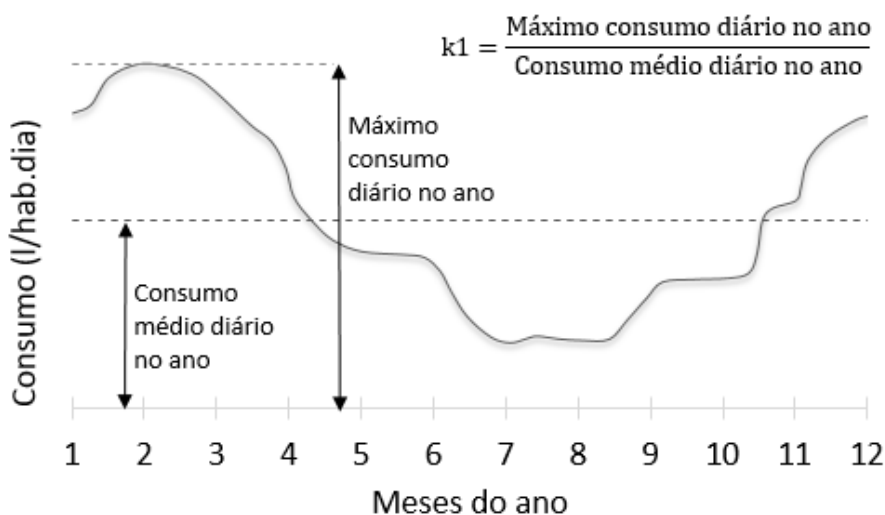
O consumo de água de um sistema está intimamente ligado ao perfil da população atendida por ele, uma vez que o tipo de atividade do consumidor determina a sua maior ou menor necessidade. Por exemplo, uma unidade industrial certamente consome um volume maior de água do que uma unidade residencial. Além das diferenças no volume consumido, neste caso, é comum observarmos grande diferença no formato entre curvas de consumo de zonas industriais e residenciais, evidenciando um comportamento diferenciado de demanda.

A variação da quantidade de água consumida em função do tempo está relacionada aos hábitos da população, clima, etc. Segundo Tsutiya (2006), as variações do consumo em determinada área são anuais, mensais, diárias e horárias, gerando curvas de consumo típicas da região.

Sendo as variações diárias e horárias as mais importantes para o dimensionamento de sistemas, estabelecem-se coeficientes do dia de maior consumo k_1 (Figura 1) e da hora de maior consumo k_2 (Figura 2), que podem ser verificados através das curvas de consumo.

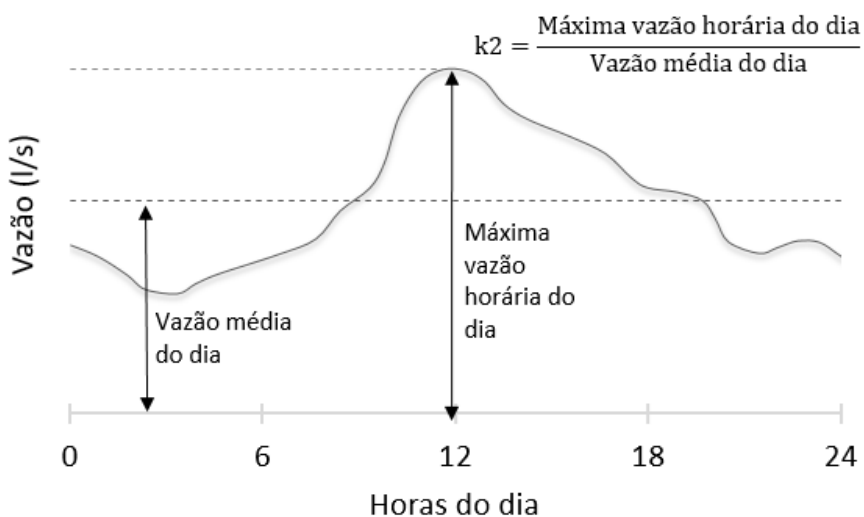
Na ausência de determinações específicas, o que é sempre preferível, a NBR 12.218 (ABNT, 2017a) recomenda que em projetos sejam utilizados os valores de 1,2 e 1,5 para k_1 e k_2 , respectivamente.

Figura 1 – Variações de consumo anual para cálculo de k1



(fonte: adaptado de TSUTIYA, 2006)

Figura 2 – Variações de consumo diário para cálculo de k2



(fonte: adaptado de TSUTIYA, 2006)

O consumo atrelado a um reservatório, bem como as variações diárias e horárias de consumo têm grande influência na vazão de bombeamento de sistemas. De maneira geral, para consumos elevados se observa um maior consumo de energia e necessidade de estruturas de expressiva magnitude.

Desta forma, fica evidente a necessidade de manter o controle das perdas de água no sistema, através de monitoramento, manutenção adequada dos componentes (principalmente adutoras e redes de distribuição) e campanhas contra desperdício de

água junto à população, favorecendo a redução das vazões bombeadas e/ou tempo de bombeamento, além da racionalização do recurso hídrico.

3.2 CONCEITOS GERAIS RELACIONADOS À EFICIÊNCIA E GESTÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO

A sociedade transformou a energia num recurso vital para todas as economias. Sendo um fator importante de crescimento de qualquer país e um elemento vital para o desenvolvimento sustentável, o setor energético é um dos domínios prioritários de investigação e desenvolvimento de soluções inovadoras (MUÑOZ; PALADINES, 2007).

Existe uma estreita ligação entre o consumo de água e o consumo de energia utilizada no serviço de saneamento disponibilizado à população, de forma que estudos na área de gestão e operação dos sistemas de abastecimento de água se tornem indispensáveis.

A definição de eficiência energética nos remete à redução do consumo de energia provendo o mesmo nível de serviço. Logo, sob uma perspectiva econômica e financeira, a ineficiência no uso de energia constitui custos evitáveis que acabam por ser suportados por subsídios à operação dos serviços e por taxas e tarifas cobradas dos usuários (BRASIL, 2017b).

Face a isso, é evidente a estreita relação entre medidas favoráveis à efficientização em sistemas de bombeamento e a minimização de despesas (operacionais, de implantação e de utilização), através da redução do consumo exacerbado. Além disso, Gomes (2009a) enfatiza que a adoção de algumas medidas administrativas como, por exemplo, adequação da contratação da tarifa de energia elétrica, podem contribuir substancialmente à redução dos gastos com energia.

De maneira geral, vem sendo consenso que a redução dos custos no setor de abastecimento de água é um planejamento necessário, e que a busca por mudanças e tecnologias a favor da eficiência energética constitui uma estratégia para um desenvolvimento mais sustentável. Brasil (2019b) corrobora com esse pensamento ao afirmar que 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.

Assim, a seguir são discutidos os conceitos e aspectos relacionados à gestão energética.

3.2.1 Energia mínima

A crescente preocupação quanto à possibilidade de falta de suprimento de energia remete à necessidade de se avaliar de que forma esse tipo de energia vem sendo utilizado. Na realidade, o problema não se restringe apenas à necessidade de gerar cada vez mais energia, mas, primeiramente, a eliminar desperdícios, buscando o máximo desempenho com o mínimo de consumo.

Utilizar processos, mecanismos ou ações em conjunto com equipamentos energeticamente mais eficientes com o intuito de reduzir o desperdício na oferta e no uso de energia elétrica significa colocar em prática o conceito de “eficiência energética” ou do “uso racional de energia elétrica”. O combate ao desperdício de energia elétrica deve ser entendido como a utilização do menor consumo energético possível na prestação de serviços, sem que isso prejudique sua qualidade e eficiência.

Neste contexto, Kuritza (2017) apresenta o conceito de energia mínima como sendo o menor consumo de energia, associado a uma demanda, que um sistema de bombeamento pode ter.

A energia consumida por um sistema de bombeamento é dada pela equação 1.

$$E = \frac{\gamma \times Q_b \times H_m}{\eta_{\text{bomba}} \times \eta_{\text{motor}}} \times \Delta t \quad (1)$$

Onde:

E = energia consumida pelo sistema (kWh);

γ = peso específico da água (N/m³);

Q_b = vazão de bombeamento (m³/s);

H_m = altura manométrica (m);

η_{bomba} = rendimento da bomba;

η_{motor} = rendimento do motor;
 Δt = tempo de bombeamento (h).

Como se pode observar, o ponto de operação (vazão bombeada e altura manométrica) são grandezas que impactam de forma diretamente proporcional na energia consumida pelo sistema.

Desta forma, segundo a abordagem de Kuritza (2017), também utilizada neste trabalho, se todas as grandezas da equação 1 forem estabelecidas a partir de critérios de otimização do consumo energético considerando o máximo rendimento possível da bomba (rendimento ótimo), pode-se dizer que a energia calculada é a energia mínima que o sistema irá consumir com seu funcionamento.

A energia mínima pode ser classificada em energia mínima ideal e energia mínima real, de acordo com as componentes da energia que a bomba deve injetar no sistema.

A energia mínima ideal compreende uma situação hipotética e impossível de ocorrer, onde se considera nula a perda de carga na tubulação e singularidades, passando a altura manométrica a ser composta apenas pela parcela de energia representada pelo desnível geométrico. Em outras palavras, a energia mínima ideal representa a energia consumida por um sistema onde a tubulação e as singularidades não representam resistência alguma ao escoamento.

Por outro lado, a energia mínima real é a energia consumida por um sistema otimizado, cuja determinação da altura manométrica considera a existência da parcela de perda de carga na tubulação e singularidades. Bolognesi *et al.* (2014) apresenta a energia mínima inevitável (real) como referência para definição de um indicador de eficiência energética.

Kuritza (2017) destaca ainda que energia mínima significa menor consumo de energia em kWh, não representando, obrigatoriamente, o menor custo de operação, uma vez que este é influenciado pela modalidade tarifária e pelo modo como se dá a operação (com ou sem bombeamento período de ponta, por exemplo). Ou seja, o indicador de energia mínima (kWh) é diferente de um indicador de custo mínimo (R\$).

3.2.2 Diagnóstico Hidroenergético

Um diagnóstico hidroenergético é uma avaliação sistemática do uso de energia e água de uma unidade consumidora (BRASIL, 2018). Assim sendo, constitui uma importante ferramenta para uma adequada gestão do desempenho energético de sistemas, fornecendo subsídios para hierarquização das ações de efficientização e prioridades na alocação de recursos.

A elaboração de um diagnóstico considera algumas etapas de execução, como: Planejamento, que engloba uma visita prévia e coleta de dados do sistema estudado; Plano de medições, quando a equipe, instrumentação e metodologia são definidas; Medições e análises, consiste na inspeção, ensaios de desempenho e monitoramento do sistema, e; Apresentação dos resultados, onde é discutido o plano de ações.

Conforme NBR ISO 50006 (ABNT, 2016), o diagnóstico hidroenergético de sistemas de bombeamento faz uso de dois elementos-chave interrelacionados: Indicadores de Desempenho Energético (IDE) e Linhas de Base Energéticas (LBE), conceituados e explicados a seguir.

3.2.2.1 Indicadores de Desempenho Energético (IDE)

Alegre *et al.* (2004) conceituam indicadores de desempenho como medidas quantitativas de um aspecto particular do desempenho da entidade gestora. Cada indicador expressa o nível do desempenho efetivamente atingido, simplificando a avaliação e permitindo a comparação direta entre os resultados obtidos.

Para a implementação de uma política estratégica de avaliação de desempenho de sistemas é necessário que haja uma discussão prévia acerca de questões como: objetivos a serem alcançados, planejamento e impacto em recursos disponíveis, rotinas de gestão de dados, planejamento temporal, atribuição de responsabilidades, entre outras. Uma vez tendo estas questões resolvidas e considerando uma adequada implantação e uso do sistema de indicadores de desempenho, obtém-se uma importante ferramenta de auxílio a tomada de decisão quanto a ações de melhoria e busca de uma maior eficiência energética.

As principais fontes de consulta sobre indicadores de desempenho são o *International Water Association* (IWA) e o Sistema Nacional de Informação do Saneamento (SNIS) dada a sua relevância no contexto nacional e global (TONIAL, 2014).

A seguir, os principais indicadores utilizados são apresentados. No entanto, é importante ter em mente que, quando analisado individualmente, um indicador de desempenho pode conduzir a conclusões equivocadas ou incompletas, de forma que se torna importante que o desempenho seja avaliado a partir de um sistema de indicadores, que permitam analisar simultaneamente os principais fatores relevantes:

- a) Consumo Específico de Energia Elétrica;
- b) Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado;
- c) Custo Médio de Energia Elétrica
- d) Consumo Específico por Comprimento de Adutora;
- e) Consumo Diário de Energia;
- f) Custo por Volume Bombeado.

Consumo Específico de Energia Elétrica (IN_{058}): representa a quantidade média de energia requerida para elevar um metro cúbico de água por meio de instalações de bombeamento (equação 2). Segundo Gomes (2009b), este é um dos indicadores mais comuns no setor de saneamento, sendo utilizado para acompanhar a eficiência energética de sistemas de bombeamento ao longo do tempo, contudo, não deve ser utilizado para comparar o desempenho de sistemas de bombeamento distintos.

$$IN_{058} = CE \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Consumo de energia elétrica (kWh)}}{\text{Volume bombeado (m}^3\text{)}} \quad (2)$$

Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado (Ph5): representa o consumo de energia para bombear um metro cúbico a uma altura manométrica de 100 m (equação 3). Este indicador foi proposto pela IWA para permitir a comparação do desempenho de diferentes instalações de modo a reduzir as alturas manométricas a uma altura única. Hagiuda (2019) utilizou esse indicador como ferramenta para realizar a avaliação da eficiência energética de sistemas de bombeamento da Sabesp.

$$Ph5 = CEN \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Consumo de energia elétrica (kWh)}}{\text{Volume bombeado (m}^3\text{)} \times \frac{H_{man} \text{ (m)}}{100 \text{ (m)}}} \quad (3)$$

Custo Médio de Energia Elétrica (CME): obtido pela relação direta entre o valor total da conta de energia elétrica pelo consumo energético correspondente ao período de medição (equação 4).

$$CME \left(\frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \right) = \frac{\text{Custo com energia elétrica (R\$)}}{\text{Consumo de energia elétrica (kWh)}} \quad (4)$$

Consumo Específico por Comprimento de Adutora (CEE_L): representa o consumo de energia de um metro cúbico bombeado por um quilômetro de adutora (equação 5). Permite avaliar o nível de significância das perdas de carga da instalação para compará-las com outras instalações.

$$CEE_L \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \cdot \text{km}} \right) = \frac{\text{Consumo de energia elétrica (kWh)}}{\text{Vol. bomb. (m}^3\text{)} \times \text{Extensão da adut. (km)}} \quad (5)$$

Consumo Diário de Energia (CDE): energia consumida em um dia de operação do sistema de bombeamento (equação 6).

$$CDE \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right) = \frac{\text{Consumo de energia elétrica (kWh)}}{\text{Número de dias}} \quad (6)$$

Custo por Volume Bombeado (CVB): representa o custo para bombear um metro cúbico de água (equação 7).

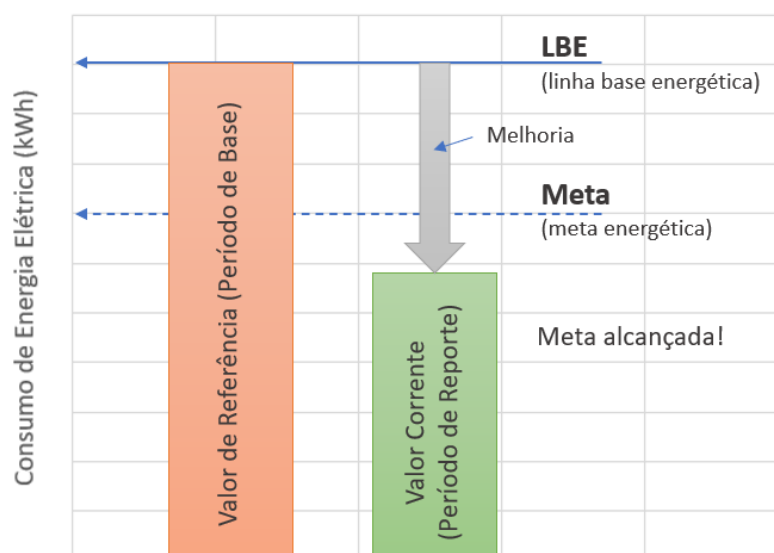
$$CVB \left(\frac{\text{R\$}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Custo com energia elétrica (R\$)}}{\text{Volume bombeado (m}^3\text{)}} \quad (7)$$

3.2.2.2 Linha de Base Energética (LBE)

ABNT (2016) conceitua a Linha de Base Energética (LBE) como uma referência que caracteriza e quantifica o desempenho energético de uma organização durante um período de tempo específico.

A LBE permite avaliar o perfil energético de um sistema entre dois períodos selecionados, sendo utilizada para cálculos de economia de energia, como uma referência anterior (período de base) e posterior à implementação de ações de melhoria do desempenho energético (período de reporte). A LBE é apenas utilizada para determinar os valores dos indicadores, objetos de cada estudo, para o período de linha de base. A Figura 3 ilustra o conceito deste elemento utilizando o consumo de energia elétrica como exemplo de IDE avaliado.

Figura 3 – Conceito de LBE e período de reporte



(fonte: adaptado de ABNT, 2016)

Ao estabelecer uma LBE, convém que o período base e o período de reporte sejam suficientemente longos para garantir que as variações na operação sejam refletidas. Contudo, o período de base, muitas das vezes, acaba se mostrando como uma limitação ao estudo, uma vez que, comumente, o monitoramento de parâmetros nos sistemas de abastecimento de água é falho ou inexistente.

Nestes casos, é recomendável que as medições iniciais realizadas na execução de diagnósticos sejam prolongadas o quanto for possível, porém, dificilmente será possível monitorar um período longo o suficiente a ponto de identificar as sazonalidades do sistema.

3.2.3 Oportunidades de economia de energia

As ações para controle do consumo e custos de energia são compreendidas no âmbito de projeto, operação e administração dos sistemas de abastecimento de água. Segundo BID (2011), as medidas de economia são classificadas nos grupos seguintes:

- a) medidas relacionadas com a tarifa de energia;
- b) medidas para aumentar a eficiência das bombas;
- c) redução de perdas de carga;
- d) redução de vazamentos;
- e) melhora da operação;
- f) melhora da manutenção;
- g) medidas para aumentar a eficiência dos motores;
- h) medidas para a redução de perdas nas instalações elétricas;
- i) substituição da fonte de alimentação.

Os primeiros cinco grupos acima referidos apresentam maior potencial de redução de consumo de energia e conseqüente economia no custo de operação, portanto, estes serão abordados com maiores detalhes a seguir.

3.2.3.1 Medidas relacionadas com a tarifa de energia

Este grupo caracteriza a possibilidade de adaptação, no âmbito administrativo, de gestão de um sistema de abastecimento de água, as quais devem ser vistas como primeiro passo no direcionamento à eficiência energética, uma vez que geralmente se apresentam bastante simples e de grande impacto.

Inicialmente, deve-se ter conhecimento acerca da operação do sistema, principalmente no que diz respeito ao seu horário de funcionamento. Não raro, verifica-se que o contrato firmado com a concessionária de energia está enquadrado em uma modalidade de tarifa desvantajosa, considerando a rotina de funcionamento do sistema de bombeamento em questão.

Desta forma, 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 (KURITZA, 2017). Em outras palavras, deve-se fazer uma simulação dos valores que seriam pagos em cada uma das tarifas nas quais o serviço poderia ser contratado.

3.2.3.2 Medidas para aumentar a eficiência das bombas

As bombas são equipamentos projetados para funcionar em uma determinada faixa de vazão e altura manométrica pré-definidas através de ensaios realizados pelos fabricantes, de onde são geradas as suas curvas características. As informações fornecidas pelas curvas características de uma bomba são fundamentais para que o projetista possa verificar o seu funcionamento de acordo com as necessidades de projeto.

Apesar de ser possível o seu funcionamento em uma grande faixa de operação, há somente uma pequena faixa onde os melhores rendimentos do equipamento são atingidos, uma vez que, de acordo com Santos (2007), no projeto de uma bomba, o caminho interno percorrido pelo fluido é preparado para uma única vazão nominal para a qual a perda de energia seja a mínima possível.

As características do equipamento instalado deverão ser analisadas e posteriormente avaliar se é recomendável uma adequação do ponto de operação de funcionamento da bomba às condições de operação reais (BID, 2011).

Kuritzza (2017) comenta que, frequentemente, pode ser verificado que a bomba está operando em um ponto diferente do que foi projetado, ou seja, fora da faixa de maior rendimento do equipamento, acarretando em maiores custos para operação. A adequação do ponto de funcionamento pode ser obtida através da instalação de conversores de frequência ou, em casos onde as bombas se encontram obsoletas e desgastadas, a partir da substituição destes equipamentos.

3.2.3.3 Redução de perdas de carga

As perdas de carga envolvidas no processo de recalque e adução de água são classificadas em lineares e localizadas. A primeira ocorre em função do atrito interno das partículas do fluido e da rugosidade da parede do tubo, sendo verificadas perdas consideráveis para tubulações com vários quilômetros de comprimento e diâmetro menores do que o ideal para as condições de projeto. A segunda se dá em função das singularidades como as peças de conexões, válvulas e registros, que também provocam dissipação de energia.

Como medidas para a redução da perda de carga podemos citar a diminuição da rugosidade mediante limpeza ou revestimento das paredes internas do tubo, substituição da tubulação por outra de maior diâmetro e implantação de tubulação em paralelo à já existente (GOMES; BEZERRA, 2012). Entretanto, é necessário observar que, no caso de substituição de tubulação e/ou implantação de tubulação de reforço, deve-se definir o diâmetro mais econômico resultante de uma análise econômica do sistema, onde se consideram os custos de implantação e de operação.

3.2.3.4 Redução de vazamentos

As perdas de água em sistemas de abastecimento são influenciadas por diversos fatores infraestruturais e operacionais. Estas dependem basicamente das características da rede hidráulica e dos fatores relacionados às práticas de operação, do nível de tecnologia do sistema e da expertise dos técnicos responsáveis pelo controle dos processos (BEZERRA; CHEUNG, 2013).

O controle de perdas de água constitui uma importante atividade operacional que deve ser desenvolvida pelas companhias de saneamento, visto que o seu controle está diretamente relacionado com a receita e a despesa da empresa. As perdas de água correspondem a volumes não contabilizados no faturamento da empresa que, muitas vezes, são difíceis de serem quantificados.

Existem dois tipos de perdas de água: perdas físicas, que representam a água que efetivamente não é consumida, tal como os volumes perdidos através de vazamentos e transbordamento de reservatórios e; perdas aparentes, que são os volumes

consumidos, porém não contabilizados, como o uso não autorizado (fraudes e falhas de cadastro) e erros de medição dos hidrômetros.

As perdas de água podem ser estimadas através da elaboração do balanço hídrico anual do sistema, proposto pela *International Water Association (IWA)*, onde se conhece o volume de água que entra no sistema (volume de produção de água tratada ou importada) e através da diferença com o volume de água faturada, obtém-se o volume de água perdida. A identificação do tipo das parcelas de perda física ou aparentes podem ser estimadas a partir de métodos de análise como conhecimento da vazão noturna, medições de vazão e pressão em zonas com limite conhecido, modelagem hidráulica da rede e etc.

A vazão total bombeada por um sistema compreende a parcela de vazão necessária ao atendimento da população e a parcela correspondente às perdas existentes ao longo do processo. Logo, quando o sistema apresenta índices elevados de perdas, a vazão bombeada pode estar superdimensionada, representando um consumo de energia que é desperdiçada. Um exemplo disso é o levantamento apresentado pelo Plano Nacional de Eficiência Energética (BRASIL, 2012) que apontou que de um potencial de recuperação de energia elétrica desperdiçada no setor de saneamento no Brasil de 4,705 TWh em 2007, 2,62 TWh (56%) pode ser recuperado através da redução de perdas reais de água.

Dentre as ações que podem ser tomadas em favor da minimização de perdas de água, estão:

- a) monitoramento, controle e estabilização de pressões e vazões ao longo das redes;
- b) setorização adequada da rede;
- c) substituição de redes e ramais em mau estado de conservação;
- d) controle ativo de vazamentos;
- e) otimização do tempo de reparo;
- f) campanhas junto aos funcionários e usuário; entre outras.

3.2.3.5 Melhoras na operação do sistema

A melhora na rotina operacional de sistemas de bombeamento pode ocorrer a partir de duas formas principais: utilização de inversores de frequência para auxiliar o ajuste da vazão de bombeamento das bombas e; otimização da utilização do volume de reservação existente, evitando, dentro do possível, o funcionamento das bombas durante o horário de ponta do sistema elétrico.

Gibson (1994) afirma que dispositivos de variação de velocidade podem ser utilizados de forma análoga às práticas tradicionais, como estrangulamento de válvulas para o controle de vazão, e depende da iteração entre a curva característica da bomba e a curva do sistema. Gomes e Bezerra (2012) afirmam que as bombas podem operar satisfatoriamente dentro de uma faixa de 70 e 120% do ponto de melhor rendimento.

Dentre as principais vantagens do uso de conversores de frequência estão:

- a) economia de energia;
- b) melhor controle da operação;
- c) menor desgaste dos equipamentos eletromecânicos;
- d) automação do sistema.

3.3 ANÁLISE ECONÔMICA PARA SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

O projeto de um sistema de bombeamento compreende o dimensionamento das tubulações de recalque e sucção e, por conseguinte, o cálculo da potência do conjunto motobomba.

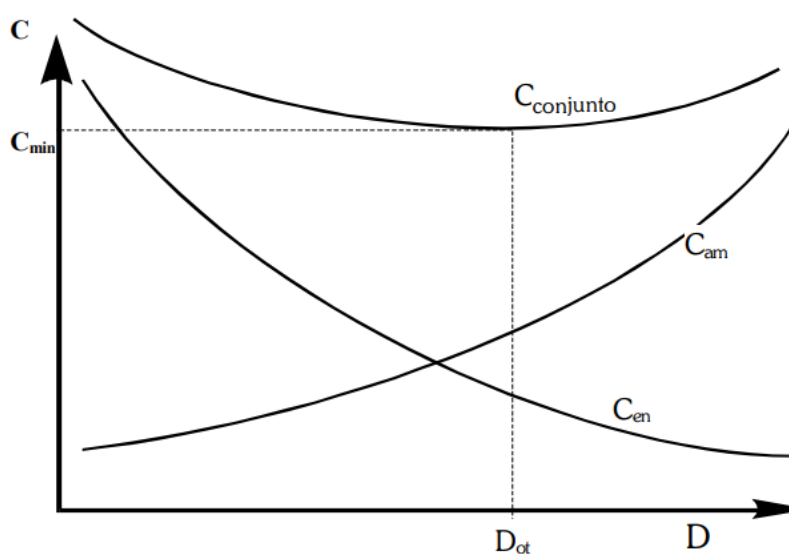
Quando se deseja fazer a avaliação econômica de um projeto de um sistema de bombeamento é necessário estimar o custo global da obra, computando-se os custos fixos de investimento e os custos variáveis da operação do sistema ao longo de um horizonte de análise.

Os custos de implantação comumente levados em conta para este tipo de estimativa são referentes à aquisição dos equipamentos eletromecânicos, tubulações, conexões, obras civis e serviços de escavação e montagem. Gomes (2009b) enfatiza os custos das tubulações como predominantes frente aos demais, pois representam maior magnitude na composição dos custos. Por outro lado, os custos de operação e

manutenção consistem, principalmente, nos gastos de energia elétrica da estação elevatória que ocorrem ao longo do alcance de projeto.

Em seus estudos, Gomes (2001) verificou que os custos de implantação (C_{am}) e de operação (C_{en}) são antagônicos. Ao se escolher um diâmetro menor para a adutora, haverá uma diminuição no seu custo de implantação, mas, em contrapartida, o custo de operação (energético) será maior, conforme Figura 4. Portanto, para um dimensionamento econômico do sistema, onde obtém um custo mínimo ($C_{mín}$), o projetista deve se utilizar do estudo econômico para determinar o diâmetro ótimo (D_{ot}) da tubulação.

Figura 4 – Variação do custo total do sistema, segundo o diâmetro da adutora



(fonte: GOMES, 2001)

3.3.1 Custos fixos de implantação

Para a estimativa dos custos fixos de implantação de adutoras, Mendiluce (1966 *apud* GOMES, 2001) traz um método simples que admite a variação linear do custo da tubulação com o seu diâmetro, conforme equação 8.

$$CI_{\text{tubulação}} = C_L \times D \times L \quad (8)$$

Onde:

$C_{\text{tubulação}}$ = custo de implantação de adutoras (R\$);

C_L = custo de implantação linear do tubo, por metro de comprimento e por metro de diâmetro (R\$/m/m);

D = diâmetro do tubo (m);

L = comprimento total do tubo (m).

Para efeitos de estimativas, é comum agregar ao custo de implantação do tubo outros custos com escavação e peças de conexão, obtendo-se um valor único que será convertido no custo de implantação linear do tubo (C_L).

Outra forma de estimar o custo de implantação de tubulações é através de curvas de custo construídas a partir de portfólio de projetos concluídos e orçados. Neste caso, os dados são trabalhados para gerar uma curva de custo por quilômetro de adutora em função do diâmetro adotado.

Da mesma forma é feito para a estimativa de custos de elevatórias, onde os valores utilizados para gerar a curva de custo em função da potência instalada da elevatória, já englobam custos com aquisição dos equipamentos eletromecânicos e demais obras civis.

3.3.2 Custo de operação

A compreensão da forma como é cobrada a energia elétrica e de como são calculados os valores apresentados nas faturas de energia elétrica, emitidas mensalmente pelas concessionárias de energia elétrica, é fundamental para a tomada de decisão em relação a projetos de eficiência energética (ELETROBRAS, 2011).

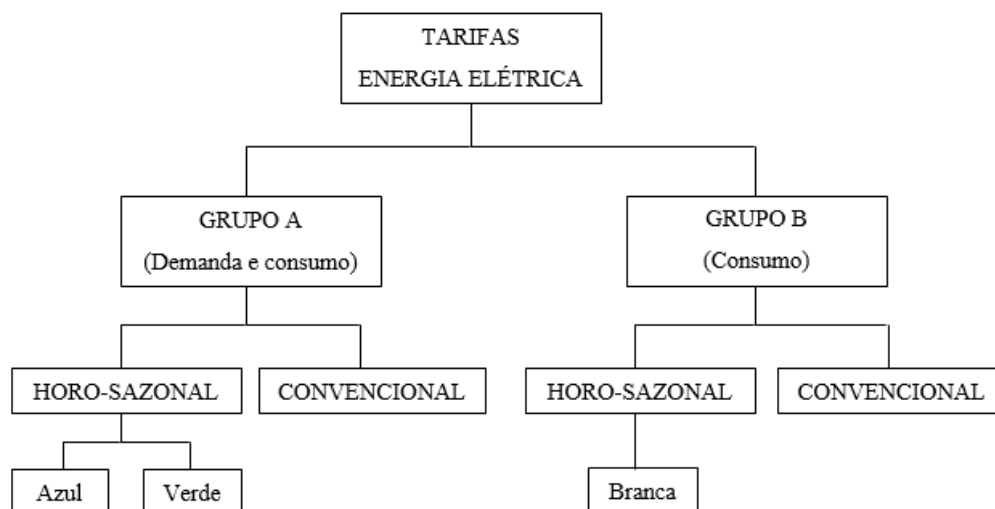
3.3.2.1 Tipos de Tarifação

Conforme Eletrobras (2011), as unidades consumidoras são classificadas em grupo tarifário A ou B, sendo definido em função do nível de tensão e demanda (kW). No grupo B estão inclusas as unidades atendidas em baixa tensão (<2.300 volts), como residências, lojas, edifícios residenciais, entre outros. O grupo A, por sua vez,

compreende os consumidores como indústrias, shoppings e alguns edifícios comerciais, atendidos em alta tensão (> 2.300 volts).

A tarifação é realizada através de quatro possíveis modalidades: convencional, horo-sazonal branca, horo-sazonal verde e horo-sazonal azul, conforme Figura 5.

Figura 5 - Estrutura das tarifas de energia elétrica



(fonte: adaptado de COSTA, 1998)

A modalidade da tarifa horária branca entrou em vigor em 1º de janeiro de 2018 e é disponibilizada como opção apenas para as unidades consumidoras atendidas em baixa tensão, segundo Aneel (2019). Com a tarifa branca, o consumidor tem a possibilidade de pagar valores diferentes em função da hora e do dia da semana em que consome a energia elétrica.

A tarifa convencional possui apenas um preço para a energia consumida e outro para a potência. As tarifas horo-sazonais possuem diferentes preços de acordo com o horário de utilização (horário de ponta ou fora de ponta) e do período do ano (bandeira verde, amarela e vermelha) de utilização.

Conforme Aneel (2021), as bandeiras de utilização indicam se haverá ou não acréscimo no valor da energia a ser repassada ao consumidor final, em função das condições de geração de eletricidade.

A bandeira verde é adotada em condições favoráveis de geração de energia. Considerando ano de 2021 como base, a bandeira amarela, utilizada em condições

de geração menos favoráveis, apresenta um acréscimo de R\$0,01874 para cada quilowatt-hora consumido. Quando se enfrenta condições ainda mais custosas de geração, a bandeira vermelha é adotada, com acréscimo de R\$0,03971 (patamar 1) ou R\$0,09492 (patamar 2) para cada quilowatt-hora consumido.

3.3.2.2 Tributação incidente

No Brasil, a tributação incidente na venda de energia elétrica é de origem federal e estadual, devendo ser consideradas no cálculo do preço final da energia repassado ao consumidor.

No âmbito federal, dois são os tributos considerados para compor o preço de venda da energia: PIS (Programas de Integração Social) e Cofins (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social). As alíquotas de PIS e Cofins têm variação mensal e podem ser consultadas no site da concessionária.

No âmbito estadual, o tributo incidente é o ICMS (Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços), que é regulamentado pelo código tributário de cada estado.

Desta forma, a composição do preço final de energia elétrica cobrado pela concessionária (P_{energia}) pode ser expressa pela equação 9.

$$P_{\text{energia}} = \frac{\text{Tarifa}_{\text{Aneel}}}{1 - (\text{PIS} + \text{Cofins} + \text{ICMS})} \quad (9)$$

3.3.2.3 Valor presente do custo de operação

O cálculo do custo de operação de uma estação de recalque depende da sua potência requerida, o tempo de bombeamento e do preço de energia cobrado pela concessionária, podendo ser expresso pela equação 10.

$$C_{\text{energia}} = \frac{9,81 \times Q \times (H_g + H_f) \times \Delta t \times P_{\text{energia}}}{\eta} \quad (10)$$

Onde:

C_{energia} = custo energético (R\$);

Q = vazão (m^3/s);

H_g = desnível geométrico (m);

H_f = perda de carga total no sistema (m);

Δt = horas de funcionamento do bombeamento (h);

P_{energia} = preço pago pelo kWh de energia (R\$/kWh);

η = eficiência do conjunto motobomba.

Deve-se ter em conta que os custos de operação são variáveis e devem ser convertidos em custos fixos através da sua amortização ao longo dos anos de alcance do projeto. Para tal, Gomes *et al.* (2010) indica a utilização de um fator de atualização (F_a) que permite o cálculo do valor presente a partir de uma série de custos anuais. O custo atualizado de energia é dado pelo produto do custo energético anual e o fator de atualização (equação 11).

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

Onde:

e = taxa de aumento anual de energia;

i = taxa de juro anual;

n = período de amortização, em anos.

Portanto, o valor presente do custo de energia (VP_{CO}) para os anos de alcance do sistema é dado pela equação 12.

$$VP_{CO} = C_{\text{energia}} \times F_a \quad (12)$$

3.4 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

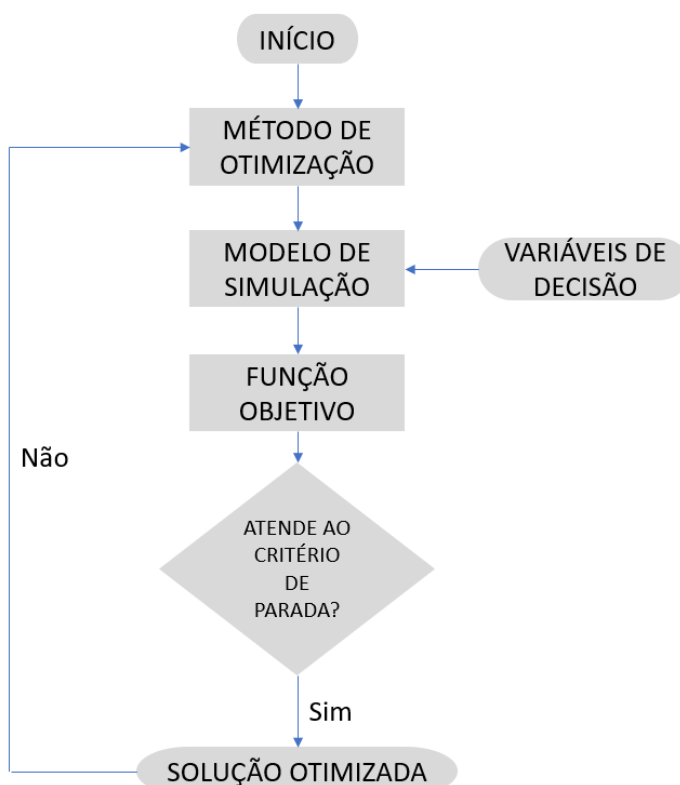
Teles e Gomes (2010) relatam que a otimização é uma das ferramentas de aplicação imediata mais importante da atualidade, sendo empregada na resolução dos mais diversos problemas de engenharia.

Um processo de otimização consiste em obter o conjunto de valores de uma ou mais variáveis de decisão que minimizem ou maximizem uma ou mais funções objetivo no

interior do espaço de busca definido por um conjunto de restrições e onde valores viáveis das variáveis de decisão podem ser encontrados.

Por variáveis de decisão, entende-se os parâmetros que se deseja determinar, enquanto que as funções objetivo estabelecem uma forma de quantificar os resultados. A Figura 6 identifica as etapas de um processo de otimização.

Figura 6 – Processo de otimização



(fonte: adaptado de COSTA, 1998)

Os problemas de otimização podem ser resolvidos a partir de métodos determinísticos ou métodos estocásticos.

Métodos determinísticos fazem uso da programação linear, programação não-linear e programação dinâmica. Segundo Wu e Simpson (2001), apesar destes métodos serem ágeis e precisos na busca da solução, apresentam desvantagens como necessidade de cálculo de derivadas, dificuldade de adaptação a projetos com variáveis discretas e complexidade de implementação em trabalhos práticos.

Os métodos estocásticos buscam a solução por meio de regras que levam em conta processos aleatórios. Neste caso, 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 (KURITZA, 2017). No entanto, o esforço computacional é consideravelmente maior que o necessário na utilização de métodos determinísticos.

Um exemplo de método estocástico é o de busca exaustiva. Este é um método de otimização mono-objetivo que fornece o ótimo global do espaço de busca definido. Este método enumera as soluções candidatas do problema de otimização a partir da estimativa das combinações possíveis dos valores das variáveis de decisão e, para cada uma delas, calcula o valor da função-objetivo. O ótimo global corresponderá à solução candidata que apresentar o menor ou maior valor da função-objetivo, conforme se trate de um processo de minimização ou maximização.

Nesta pesquisa, o pequeno número de variáveis e o reduzido espaço de busca não representam grande esforço computacional. Logo, optou-se por empregar o método de busca exaustiva para a minimização do custo global dos sistemas de bombeamento, uma vez que é capaz de retornar ao usuário o ótimo global a partir da identificação de todas as soluções candidatas e cálculo da função objetivo para cada uma delas.

4 METODOLOGIA

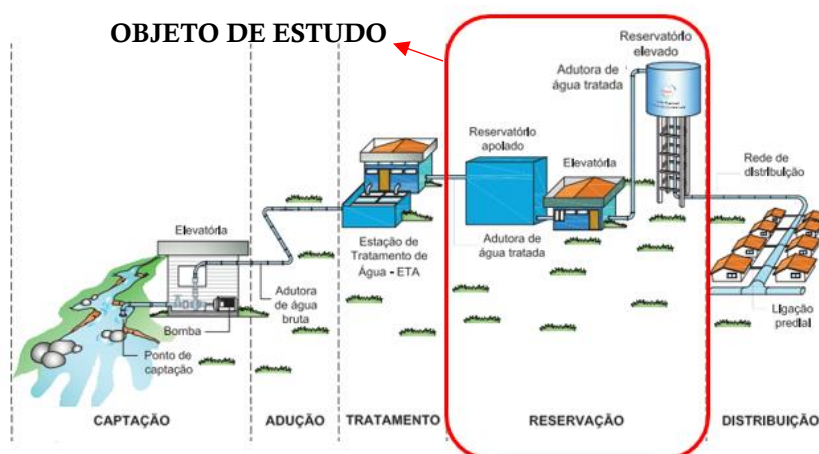
Neste capítulo são apresentados os processos utilizados nesta pesquisa, visando o desenvolvimento e a proposição de uma metodologia para a definição de uma linha base otimizada, com potencial de aplicação em diagnósticos hidroenergéticos de estações elevatórias. Ademais, são detalhadas as considerações, delineamento e restrições deste trabalho.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esta pesquisa contempla os estudos realizados para análise geral da eficiência energética a partir da aplicação do conceito de energia mínima em estações de recalque de água com velocidade rotacional constante, permitindo concluir acerca dos parâmetros de projeto e das características de operação e implantação que resultam em menores consumos de energia elétrica, menores custos e, conseqüentemente, maior eficiência.

Considerando que é possível promover ações de eficiência energética em praticamente todas as etapas de um sistema de abastecimento de água, o objeto de estudo deste trabalho está limitado à adução, à estação de recalque e à reservação, conforme Figura 7.

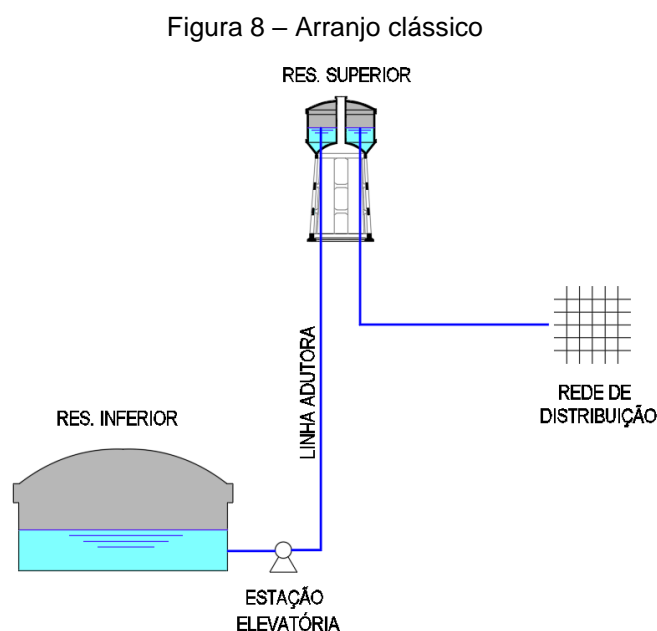
Figura 7 – Sistema de abastecimento de água



(fonte: adaptado de BRASIL, 2015)

Dentre as diversas configurações de instalações existentes para sistemas de recalque, selecionou-se o arranjo classificado por Vilanova (2012) como clássico (Figura 8), para basear o desenvolvimento da pesquisa, onde se considera um reservatório inferior de sucção, tubulação de sucção, elevatória, tubulação de recalque e reservatório superior.

Esta tipologia é amplamente utilizada em projetos e estudos voltados à sistemas de bombeamento devido a sua simplicidade, refletindo numa maior abrangência de aplicação da metodologia proposta e desenvolvida nesta pesquisa, uma vez que contempla a grande maioria das situações de projeto e/ou diagnóstico. Além disso, apresenta a possibilidade de realizar o bombeamento fora do período de ponta, quando há maior disponibilidade de energia e custo menor, já que existe a compensação a partir do volume de água reservado e, também, a possibilidade de operar o conjunto motobomba com uma maior estabilidade do ponto de operação.



(fonte: elaborada pela autora)

O período de operação do bombeamento é de grande influência nos custos de sua operação, entretanto, deve-se garantir o atendimento à curva de demanda do sistema, evitando a interrupção no abastecimento à população. Desta forma, a metodologia elaborada considera a busca não apenas da eficiência energética, mas também a garantia de atendimento da curva de demanda de cada ano do período de análise, estabelecido em 20 anos.

De forma geral, o desenvolvimento e a aplicação da metodologia para definição de linha base otimizada como ferramenta para avaliação da eficiência em diagnósticos hidroenergéticos de sistemas de bombeamento já implantados e controlados por chave-boia considera fixos alguns parâmetros iniciais, tais como desnível geométrico, diâmetro da adutora e volume útil máximo do reservatório superior existente. Entretanto, avalia a configuração do bombeamento, a vazão a ser recalçada e a porcentagem do volume útil existente que resultam em uma operação mais eficiente.

Assim, este estudo estabeleceu como variáveis de decisão a serem otimizadas os seguintes parâmetros:

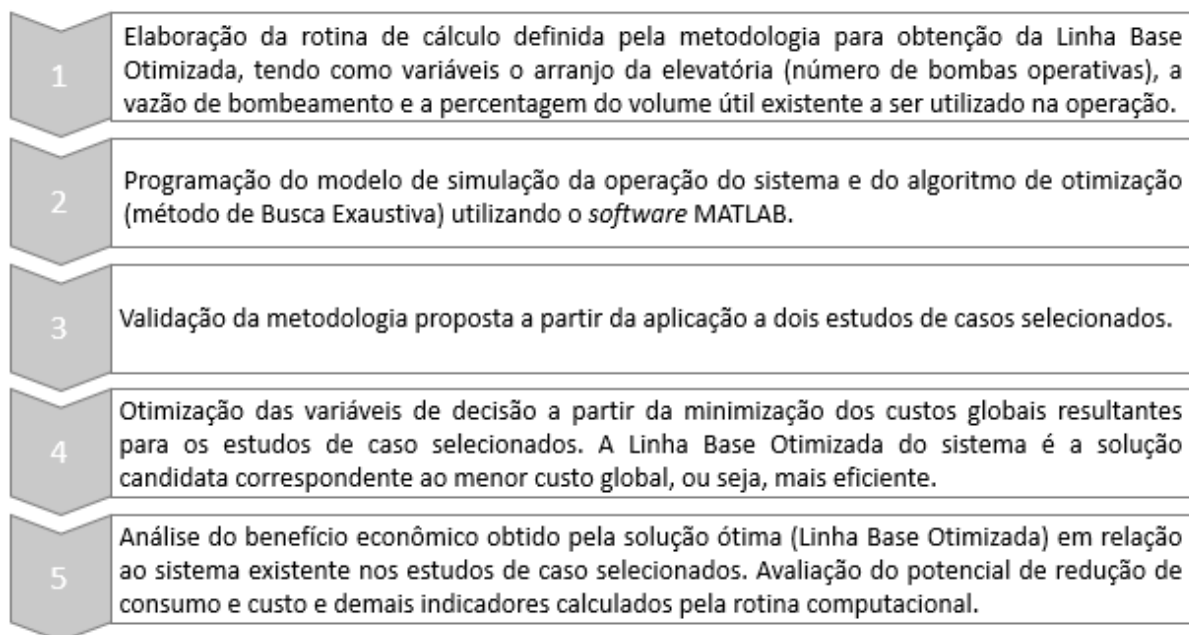
- a) α (alfa): esta variável define as vazões a serem testadas pelo programa na etapa de otimização, sendo utilizada como multiplicador da vazão de pico da curva de demanda medida *in loco*. Os valores assumidos por ela vão de 0,1 a 2, sendo atribuído um passo de 0,1 entre os valores (equação 13);
- b) número de bombas em associação (nb): considera-se a possibilidade de trabalhar com 1, 2 ou 3 bombas associadas em paralelo;
- c) volume útil do reservatório superior ($V_{\text{útil}}$): admite-se o volume útil existente como sendo o máximo a ser testado, entretanto, para avaliar a sensibilidade deste parâmetro nos resultados, atribui-se cinco valores diferentes à esta variável: 20%, 40%, 60%, 80% e 100% do volume útil existente.

A escolha da solução ótima é baseada no custo global vinculado às combinações das variáveis simuladas, calculado para as tarifas verde e azul em todas as iterações. Desse modo, a metodologia também possibilita a realização de uma análise tarifária, indicando a forma de contratação do fornecimento da energia elétrica mais vantajosa para o sistema.

Para validação e demonstração da aplicação da metodologia desenvolvida foram utilizados dois estudos de caso, cujas informações levantadas *in loco* foram disponibilizadas para esta finalidade.

O fluxo e etapas de desenvolvimento das atividades realizadas são enumeradas e descritas de forma resumida na Figura 9.

Figura 9 – Fluxo das etapas de desenvolvimento das atividades



(fonte: elaborada pela autora)

A análise do benefício econômico associado à Linha Base Otimizada (Etapa 5) é realizada através da comparação entre os resultados e indicadores obtidos para a operação usual do sistema elevatório diagnosticado e aqueles obtidos a partir da operação da Linha Base Otimizada definida. Sendo assim, é necessário realizar o estudo econômico dessas duas condições operacionais, considerando um horizonte de 20 anos, de forma a permitir a conclusão a respeito dos benefícios e potenciais de redução das intervenções a longo prazo.

Assim, a apresentação geral da metodologia elaborada para definição da Linha Base Otimizada com aplicação em diagnósticos hidroenergéticos de sistemas de bombeamento com velocidade rotacional constante é dada da seguinte forma:

- a) rotina de cálculo para obtenção dos parâmetros resultantes da operação a partir do redimensionamento do sistema de bombeamento e da alteração na regra de operação do reservatório. Os cálculos aqui apresentados também incluem o estudo econômico para o período de análise estabelecido;
- b) rotina de cálculo para obtenção do perfil energético da operação corrente do sistema de bombeamento diagnosticado e projeção financeira para o período de análise;
- c) utilização do algoritmo para otimização (minimização) tendo como função objetivo o custo global das soluções candidatas. Aqui, determina-se a solução ótima e se identificam os parâmetros associados ao custo

mínimo possível para o sistema em análise, considerando as suas restrições. Esta solução ótima das variáveis constitui a Linha Base Otimizada;

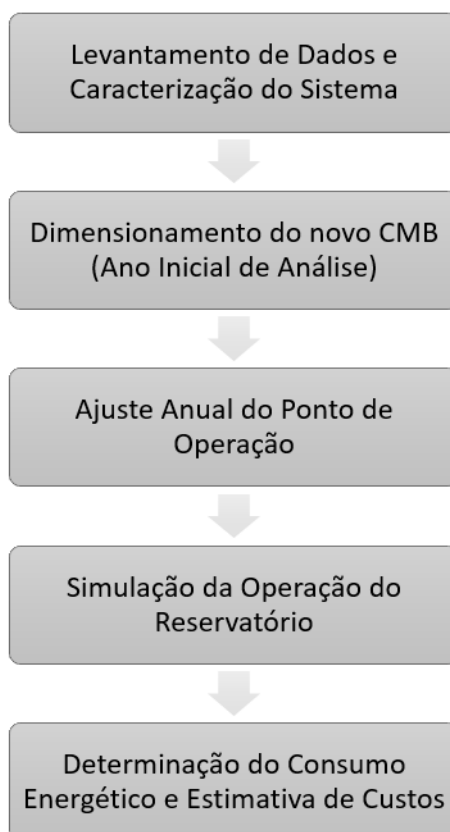
- d) cálculo de indicadores hidroenergéticos e financeiros para avaliação do benefício obtido pela operação proposta em relação à operação usual do sistema existente.

4.2 ROTINA PARA DEFINIÇÃO DA LINHA BASE OTIMIZADA APLICADA À DIAGNÓSTICOS HIDROENERGÉTICOS

A elaboração de uma Linha Base Otimizada para utilização em diagnósticos hidroenergéticos de sistemas existentes permite determinar as leis de operação e intervenções associadas ao menor custo possível para o sistema analisado, tendo em vista restrições preexistentes por se tratar de um sistema já instalado.

A seguir serão apresentadas as etapas da rotina de definição da Linha Base Otimizada, representada esquematicamente na Figura 10.

Figura 10 – Etapas da rotina de definição da Linha Base Otimizada



(fonte: elaborada pela autora)

4.2.1 Levantamento de dados e caracterização do sistema de bombeamento em análise

Como etapa inicial de qualquer diagnóstico hidroenergético, deve-se conhecer as especificidades de cada estudo, suas características e condições preexistentes que delinearão as premissas a serem seguidas. Para isso, é necessário levantar informações acerca das especificações das estruturas, equipamentos mecânicos e elétricos em funcionamento, material e diâmetro da tubulação, medições da rugosidade da tubulação, características de consumo (curva de demanda) e outras características específicas importantes do sistema em análise.

Tendo em vista a necessidade de respeitar as características preexistentes do sistema avaliado, onde certos parâmetros devem ser considerados fixos, o desenvolvimento desta metodologia adotou como premissa a impossibilidade de troca da tubulação e ampliação da reservação existente, uma vez que, na maioria dos casos, é improvável haver espaço no terreno de implantação do reservatório para a construção de outro.

Sendo assim, para o estudo aqui proposto, é necessário o pré-conhecimento de cinco parâmetros principais que servirão de input no modelo de otimização: o desnível geométrico (Hg), o comprimento da linha adutora (L), o diâmetro da linha adutora (D), a curva de demanda e o volume útil total do reservatório superior existente ($V_{\text{útil}}$).

4.2.2 Dimensionamento e determinação das especificações do bombeamento

O dimensionamento do conjunto motobomba é realizado considerando as condições operacionais do primeiro ano do período estabelecido para análise, aqui denominado ano inicial.

A determinação das características do conjunto motobomba abrange os seguintes passos: Determinação da vazão e da altura manométrica; Determinação do ponto de máximo rendimento; e Cálculo da potência do conjunto motobomba.

4.2.2.1 Determinação da vazão e da altura manométrica

A determinação das vazões bombeadas a serem testadas no ano inicial, aqui denominadas vazões em análise (Q_{LB}), é feita a partir do coeficiente α (alfa). Conforme referido no item 4.1, esse coeficiente assume valores entre 0,1 e 2 (passo de 0,1 entre valores) e é multiplicado pela máxima vazão registrada no levantamento da curva de demanda (Q_{pico}), conforme equação 13.

$$Q_{LB(i)} = \alpha \times Q_{pico} \quad (13)$$

Onde:

$Q_{LB(i)}$ = vazões testadas para o dimensionamento do bombeamento, denominadas vazões em análise;

Q_{pico} = vazão de pico da curva de demanda medida *in loco* após o reservatório superior.

Cabe ressaltar que, como forma de simplificação e devido à frequente limitação existente no acesso de dados medidos nos sistemas, este estudo considera a vazão de pico (Q_{pico}) observada em uma curva de demanda relativa a um dia útil normal, conforme curva de demanda específica do local estudado, desconsiderando sazonalidades e as variações de consumo em dias atípicos, como finais de semana e feriados, os quais podem apresentar comportamentos distintos. Entretanto, esta consideração deve levar em conta a realidade de cada caso. Se houver a disponibilidade de dados que permita uma análise mais abrangente, é recomendável que seja feita.

Nos casos em que exista mais de uma bomba operando em paralelo, a vazão em análise (Q_{LB}) deverá ser dividida pelo número de bombas em funcionamento (nb) para se obter a vazão nominal de cada bomba (Q_{LB_nom}), considerando a associação de bombas semelhantes, conforme equação 14. Salienta-se que, de um modo geral, é antieconômico o uso de mais de três bombas em paralelo, sendo aconselhada esta configuração apenas por questões operativas, caso necessário.

$$Q_{LB_nom} = \frac{Q_{LB}}{nb} \quad (14)$$

A partir da vazão em análise (Q_{LB}), pode-se, então, calcular as perdas de carga lineares e singulares presentes no sistema. Tendo em vista a sua aplicação satisfatória para água e devido à sua popularidade e exigência de utilização entre companhias de saneamento, considerou-se para o cálculo das perdas lineares a fórmula empírica proposta por Hazen-Williams (equação 15).

Os limites de aplicação da fórmula de Hazen-Williams são largos, englobando diâmetros de 50 a 3500 mm e velocidades médias de escoamento de até 3 m/s, ou seja, é aplicável a praticamente todos os casos do dia a dia (AZEVEDO NETTO; NETTO, 1998).

$$h_f = 10,65 \times L \times \left(\frac{Q_{LB}}{C} \right)^{1,852} \times D^{-4,87} \quad (15)$$

Onde:

Q_{LB} = vazão em análise (m^3/s);

h_f = perda de carga linear ao longo do comprimento da adutora para cada vazão de análise $Q_{LB(i)}$ (m);

L = comprimento da adutora (m);

C = coeficiente de rugosidade ($m^{1,27}/s^{3,43}$). Recomenda-se, preferencialmente, a utilização do coeficiente ajustado através de medições *in loco*. Caso não seja possível realizar esse tipo de medição, é possível fazer uma estimativa do coeficiente C a partir da equação 25.

D = diâmetro da adutora (m).

As perdas de carga singulares são calculadas de acordo com as recomendações de ABNT (1992), que orienta o uso da equação 16. Salienta-se que as normas relativas a sistemas de abastecimento de água públicos estão em processo de atualização, tendo sido a última atualização realizada em 2020.

$$h_s = \sum K_s \times \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

Onde:

h_s = perda de carga singular causada por conexões (m);

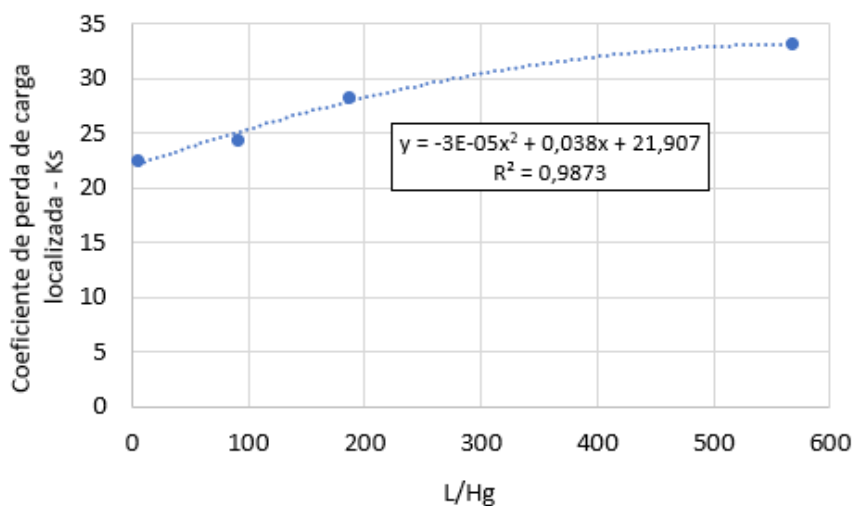
K_s = coeficiente de perda de carga singular (adimensional);

v = velocidade média do escoamento na adutora (m/s); e,

g = aceleração da gravidade = 9,81 m/s^2

Em casos em que o coeficiente de perda de carga singular é desconhecido, propõe-se que, como forma de simplificação, as perdas de carga singulares sejam estimadas a partir da função ajustada observada entre as relações L/H_g (extensão da tubulação projetada pela altura geométrica observada) e seus coeficientes de perda de carga localizadas (K_s), obtida a partir de levantamento realizado no acervo pessoal de projetos desta autora. A Figura 11 apresenta os pontos que deram origem à função.

Figura 11 – Função ajustada para determinação de coeficientes de perda de carga localizada - K_s



(fonte: elaborada pela autora)

Por último, a altura manométrica (H_{LB}) é expressa pela equação 17, ou seja, pelo somatório da altura geométrica (H_g), perda de carga linear (h_f) e perda de carga singular (h_s).

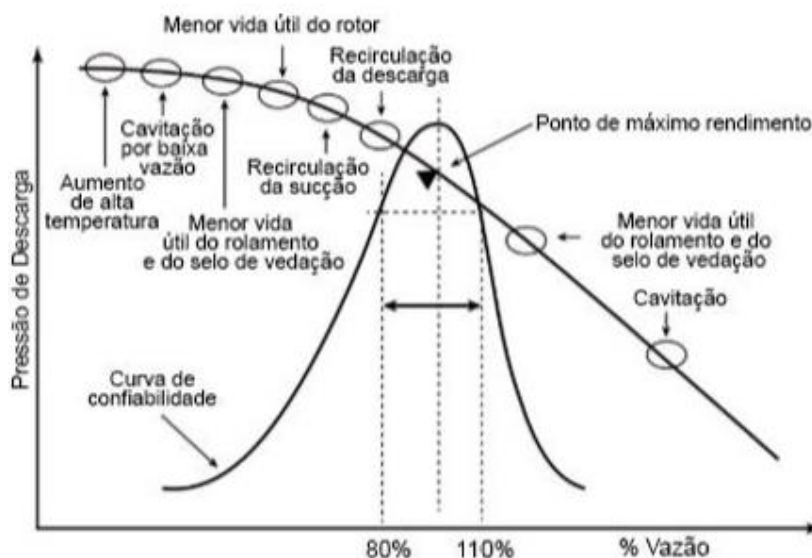
$$H_{LB} = H_g + h_f + h_s \quad (17)$$

4.2.2.2 Determinação do ponto de operação de máximo rendimento

Conforme Kuritza *et al.* (2017), para a obtenção do rendimento da bomba, é necessário definir a vazão ($Q_{1,1}$) e a altura manométrica total ($H_{1,1}$) para o ponto de máximo rendimento (η_{max}).

Bloch (2011) assegura que operar um CMB dentro de uma faixa de alto rendimento, conduz a impactos positivos como a diminuição do consumo de energia elétrica e a elevação da confiabilidade do CMB. Tal afirmação está em acordo com a curva de confiabilidade para bombas de Barringer-Nelson, apresentada na Figura 12. Observe-se que a performance ótima de operação é atingida quando bombeada uma vazão de 80% a 110% da vazão do ponto de máximo rendimento ($Q_{1,1}$).

Figura 12 – Curva de confiabilidade de Barringer-Nelson



(fonte: adaptada de BARRINGER, 2004)

Sendo assim, para este dimensionamento, empregou-se a equação 18, admitindo que, no ano de dimensionamento (ano inicial do período de análise), as novas bombas, que substituirão as bombas existentes, operarão no seu ponto de máximo rendimento, bombeando uma vazão nominal equivalente à $Q_{1,1}$.

$$\frac{Q_{LB_nom}}{Q_{1,1}} = 1,0 \quad (18)$$

Sabendo-se o valor de $Q_{1,1}$, obtém-se $H_{1,1}$ de maneira análoga ao cálculo de H_{LB} , utilizando-se a formulação proposta por Hazen-Williams. Após, calcula-se a rotação específica do conjunto motor-bomba (equação 19).

Na sequência, o rendimento da(s) bomba(s) para o ponto de operação de máximo rendimento ($\eta_{m\acute{a}x}$) é determinado através da equação 20, apresentada por Kuritza *et al.* (2017).

De posse dos valores de $\eta_{\text{máx}}$, calcula-se o rendimento η_{LB} com base na equação 21, ajustada por Lopes (2020).

$$N_s = \frac{N \times \sqrt{Q_{1,1}}}{H_{1,1}^{3/4}} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{máx}}(\%) &= e^{5,092 - \frac{9,121}{N_s} - 0,124 \cdot \ln(N_s)} && \text{(para } N_s \leq 65) \\ \eta_{\text{máx}}(\%) &= 83,37 && \text{(para } N_s > 65) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{\eta_{\text{LB}}}{\eta_{\text{máx}}} = -0,995 \cdot \left(\frac{Q_{\text{LB_nom}}}{Q_{1,1}} \right)^2 + 1,997 \cdot \left(\frac{Q_{\text{LB_nom}}}{Q_{1,1}} \right) + 0,018 \quad (21)$$

Onde:

N_s = rotação específica do conjunto motobomba (rpm);

N = rotação nominal do conjunto motobomba (rpm);

$Q_{\text{LB_nom}}$ = vazão nominal em análise (m^3/s);

$Q_{1,1}$ = vazão de máximo rendimento da(s) nova(s) bomba(s) (m^3/s);

$H_{1,1}$ = altura manométrica total de máximo rendimento da(s) nova(s) bomba(s) (m.c.a);

η_{LB} = rendimento do(s) novo(s) conjunto(s) motobomba (%);

$\eta_{\text{máx}}$ = rendimento do conjunto motor-bomba no ponto de máximo rendimento (%).

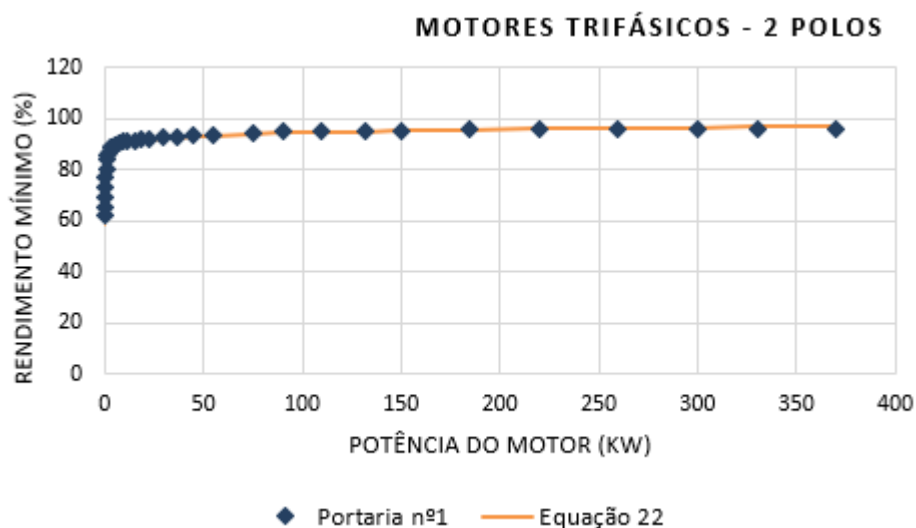
4.2.2.3 Cálculo da potência do novo conjunto motobomba

Previamente ao cálculo da potência elétrica do motor, é necessário determinar os rendimentos dos motores elétricos. Para tal, equações de rendimento foram ajustadas com base na tabela de rendimentos nominais mínimos para motores elétricos trifásicos, disponibilizada pelo Ministério de Minas e Energia através da Portaria Interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017 (BRASIL, 2017a), conforme a sua rotação nominal (2 e 4 polos). Com os dados constantes na referida regulamentação, construiu-se os gráficos das Figuras 13 e 14, de onde as equações 22 e 23, aplicadas

a motores de 2 e 4 polos, respectivamente, foram obtidas e utilizadas para alimentar o algoritmo do modelo de simulação.

$$\eta_{\text{motor}} = 86,6318 \times 0,9589^{1/P_{\text{el_motor}}} \times P_{\text{el_motor}}^{0,0191} \quad (22)$$

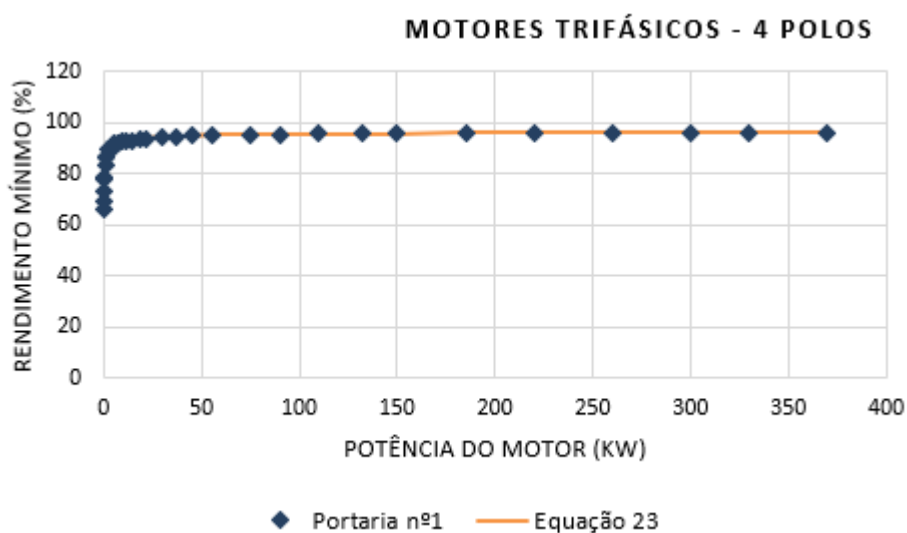
Figura 13 – Rendimentos nominais mínimos: 2 Polos (Portaria Interministerial nº1)



(fonte: baseado em BRASIL, 2017a)

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{-39,2162 \times 0,1012 + 96,8826 \times P_{\text{el_motor}}^{0,5087}}{0,1012 + P_{\text{el_motor}}^{0,5087}} \quad (23)$$

Figura 14 – Rendimentos nominais mínimos: 4 Polos (Portaria Interministerial nº1)



(fonte: baseado em BRASIL, 2017a)

Após, a potência elétrica do motor (equação 24) e o rendimento do motor elétrico são determinados a partir de um cálculo iterativo.

$$P_{el_{motor}} = \frac{P_{m_{bomba}}}{\eta_{motor}} = \frac{\gamma \cdot Q_{LB_{nom}} \cdot H_{LB}}{75 \cdot \eta_{LB} \cdot \eta_{motor}} \quad (24)$$

Onde:

η_{motor} = rendimento do motor elétrico (%);

$P_{el_{motor}}$ = Potência elétrica do motor (CV);

$P_{m_{bomba}}$ = Potência mecânica da bomba (CV);

γ = peso específico da água (kgf/m³);

$Q_{LB_{nom}}$ = Vazão nominal em análise (m³/s);

H_{LB} = altura manométrica total (m.c.a.);

η_{LB} = rendimento da bomba (%).

Para a estimativa dos custos de implantação dos novos conjuntos motobomba (CMB) aqui dimensionados, foi desenvolvida uma rotina de busca pelo motor elétrico comercial com potência mecânica igual ou superior à potência solicitada pela bomba no ano de dimensionamento (ano inicial do período de análise). Um vetor contendo os valores de potências nominais de motores elétricos usualmente comercializados foi utilizado para essa seleção.

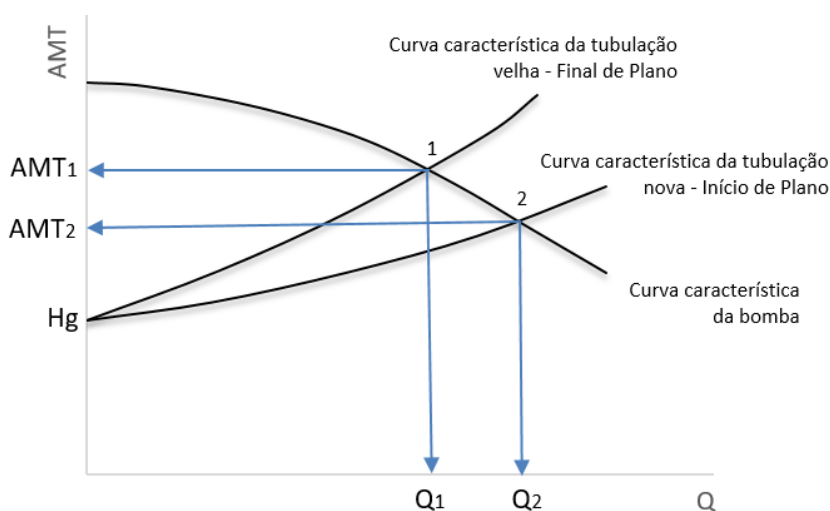
4.2.3 Ajuste do ponto de operação em função do envelhecimento da tubulação

Uma vez que a metodologia aqui apresentada se propõe à aplicação em sistemas controlados por chave-boia, onde a velocidade rotacional é constante e não ocorre o ajuste automático do ponto de funcionamento dos equipamentos em função da operação do sistema, é necessário observar a variação do ponto de operação do bombeamento para cada ano analisado, com o propósito de subsidiar os cálculos da operação do reservatório, consumo e custos de energia ao longo de todo o período considerado.

Tendo em vista que o CMB foi dimensionado para as condições operacionais do ano inicial do período de análise, o ajuste do ponto de operação deve ser feito para cada um dos outros 19 anos compreendidos no período estabelecido para análise, do segundo ao vigésimo ano de operação.

A variação do ponto de operação se dá através do envelhecimento da tubulação, não sendo contemplado neste estudo o envelhecimento da bomba. Ao longo do período de horizonte de análise, ocorre decaimento da capacidade hidráulica da tubulação do sistema devido ao aumento da sua rugosidade e, conseqüentemente, aumento das perdas de carga e da altura manométrica do sistema. Assim, a curva do sistema ano a ano se desloca em relação à curva do sistema inicial. Este deslocamento da curva do sistema faz com que o ponto de operação inicialmente projetado também se movimente ao longo da curva da bomba, configurando um novo ponto de operação. A Figura 15 ilustra esse fenômeno.

Figura 15 – Ponto de operação em função do envelhecimento da tubulação



(fonte: elaborada pela autora)

Lopes (2020) ajustou a equação 25, que permite determinar o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (C) da tubulação e, seguidamente, a altura manométrica do sistema em algum outro momento do horizonte de análise. O material da tubulação aqui considerado é o FFD.

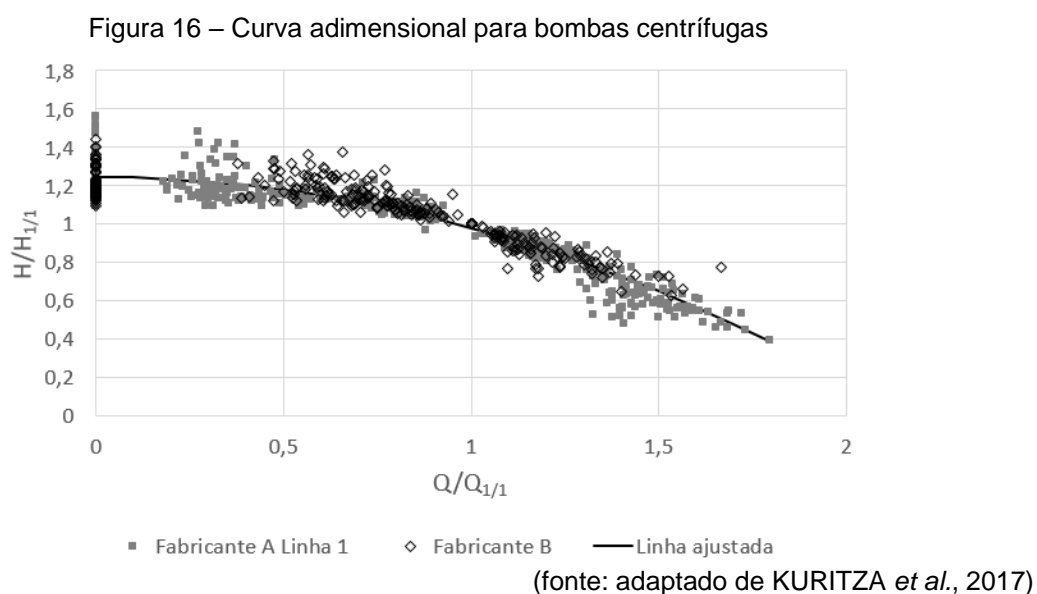
$$C = -0,0125 \cdot An^2 - 0,975 \cdot An + 130,25 \quad (25)$$

Onde:

C = coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams;

An = número de anos de uso da tubulação.

O ponto de operação ajustado é obtido a partir da determinação da vazão de bombeamento para a qual a altura manométrica do sistema é equivalente àquela fornecida pela bomba, considerando os diferentes coeficientes de rugosidade ano a ano. Assim, iguala-se a equação da curva característica da tubulação (equação 27) para o C correspondente de cada ano, e a equação adimensional elaborada por Kuritza *et al.* (2017), posteriormente ajustada por Lopes (2020), para bombas centrífugas com base nas opções disponibilizadas no mercado brasileiro (Figura 16 e equação 26), de forma a obter Q_{B_nom} .



As equações 26 e 27:

$$\frac{H_{B(i)}}{H_{1,1}} = 1,26 - 0,26 \times \left(\frac{Q_{B_nom(i)}}{Q_{1,1}} \right)^2 \quad (26)$$

$$H_{S(i)} = H_g + 10,65 \times L \times \left(\frac{Q_{B_nom(i)} \times nb}{C_{(i)}} \right)^{1,852} \times D^{-4,87} + \sum K_S \times \frac{(Q_{B_nom(i)} \times nb)^2}{A^2 \times 2g} \quad (27)$$

Onde:

i = ano de análise = (ano inicial +1, ..., ano final);

H_B = altura manométrica da bomba (m.c.a.);

H_S = altura manométrica do sistema (m.c.a)

Q_{B_nom} = vazão de bombeamento nominal a ser calculada através da igualdade das equações 26 e 27 (m^3/s);

$Q_{1,1}$ = vazão de máximo rendimento calculada no item 0 (m^3/s);

$H_{1,1}$ = altura manométrica total de máximo rendimento calculada no item 0 (m.c.a.);

H_g = desnível geométrico (m);

L = comprimento da linha adutora (m);

C = coeficiente de rugosidade atribuído ao ano de análise (equação 25);

D = diâmetro interno da tubulação (m);

A = área da seção transversal da tubulação (m); e,

g = aceleração da gravidade = $9,81 m/s^2$

Observa-se que, além do ponto de operação, o rendimento e a potência também devem ser ajustados, recalculando-os conforme item 4.2.2, a partir da substituição da vazão nominal referente ao ano de dimensionamento (Q_{LB_nom}) pela vazão nominal ajustada para os próximos anos de análise ($Q_{B_nom (i)}$).

4.2.4 Verificação da operação do reservatório existente e do atendimento à demanda

O reservatório superior deve absorver as variações do consumo e promover a continuidade do abastecimento. Para isso, é necessário inicialmente conhecer a curva de demanda projetada para cada ano do período de análise. Após, simula-se a operação do reservatório a fim de verificar se o volume útil testado, associado à vazão de análise ajustada para cada ano, é capaz de atender à curva de demanda sem interrupções.

4.2.4.1 Projeção de consumos para o período de análise

Na elaboração da concepção e dimensionamento de sistemas de abastecimento de água, é necessário ter em vista o crescimento populacional e os hábitos da população estabelecida da região de interesse, uma vez que podem levar ao aumento do consumo per capita e, conseqüentemente, das vazões requeridas ao longo do alcance de análise.

Existem algumas metodologias detalhadas e consagradas para realizar a projeção dos consumos, entretanto, a título de simplificação, optou-se por considerar um crescimento linear de 0,48% ao ano. Esta taxa de crescimento trata-se da média resultante das taxas de crescimento nacional disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019) no relatório intitulado “Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação” para o período de 2020 a 2040.

A taxa de crescimento é aplicada à curva de demanda medida nos serviços preliminares ao diagnóstico, obtendo-se uma curva de demanda ajustada para cada ano analisado.

4.2.4.2 Simulação da rotina de operação do reservatório

A simulação da operação do reservatório permite verificar se, para dada vazão de bombeamento e volume útil do reservatório, é possível atender à curva de demanda e abastecer a rede de distribuição de forma ininterrupta.

Neste trabalho, adotou-se uma abordagem binária para contabilizar o tempo de operação das bombas (ponta, fora da ponta e total) e identificar o número de acionamentos diário do bombeamento, conforme necessidade de alimentação do reservatório. Dessa forma, quando o bombeamento estiver em operação, atribui-se o valor 1 à posição do vetor que representa o instante de tempo avaliado. Quando o bombeamento estiver desligado, é atribuído o valor 0.

Assim, visando obter uma maior precisão na contabilização do tempo de bombeamento e minimização de erros no balanço de volume de água no reservatório, propõe-se que a verificação da dinâmica do sistema seja realizada com discretização temporal de 1 minuto. Logo, a cada dia simulado, são avaliados 1440 intervalos, armazenados em um vetor tempo.

Através de estudos preliminares, foi possível concluir que a partir de 5 dias de operação do reservatório ocorre a estabilização do sistema e é possível identificar um padrão de operação, dispensando a simulação de período de tempos maiores. Entretanto, optou-se por desenvolver a rotina de bombeamento para quinze dias de

operação e, posteriormente, multiplicar os resultados obtidos para obter valores mensais e, posteriormente, anuais.

A dinâmica do reservatório é avaliada através de um balanço de massa (equação 28), onde se considera os volumes de entrada no reservatório a partir do bombeamento e os volumes consumidos pelos usuários a cada minuto, conforme curva de demanda.

$$V_{(i)} = V_{(i-1)} + V_{\text{aduzido } (i)} - V_{\text{consumido } (i)} \quad (28)$$

Onde:

i = minuto em análise;

$V_{(i)}$ = volume acumulado no reservatório no minuto analisado (m^3);

$V_{(i-1)}$ = volume acumulado no reservatório no minuto anterior ao minuto analisado (m^3);

$V_{\text{aduzido } (i)}$ = volume aduzido para o reservatório no minuto analisado (m^3). Este volume é calculado a partir da vazão de bombeamento, conforme o α (alfa) simulado em cada iteração.

$V_{\text{consumido } (i)}$ = volume consumido no minuto analisado (m^3), conforme curva de demanda de cada ano.

Algumas regras de operação são utilizadas para definir o acionamento do bombeamento, sendo apresentadas abaixo. O atendimento adequado ocorre quando $V_{(i)}$ resulta em um valor positivo, para todos os minutos simulados.

Se $V_{(i-1)} - V_{\text{consumido } (i)} < V_{\text{mínimo}}$: o bombeamento é acionado;

Se $V_{(i-1)} - V_{\text{consumido } (i)} < V_{\text{útil}}$: o bombeamento permanece acionado;

Se $V_{(i-1)} - V_{\text{consumido } (i)} \geq V_{\text{útil}}$: o bombeamento é desligado;

Se $V_{\text{mínimo } (i)} \leq V_{(i-1)} - V_{\text{consumido } (i)} \geq V_{\text{útil}}$: o bombeamento permanece desligado.

Cabe destacar que a simulação do atendimento deve ser realizada para cada um dos 20 anos estudados, uma vez que as vazões aduzidas são ajustadas anualmente.

4.2.5 Determinação dos consumos energéticos e estimativa de custos

A estimativa dos custos totais envolvidos com as ações para funcionamento do sistema delineado em cada iteração do modelo de simulação pode ser realizada a partir de um estudo econômico onde se considera o custo de operação (somatório dos

custos energéticos do sistema verificados ano a ano do horizonte de análise) e o custo de implantação das intervenções.

Inicialmente, calcula-se o consumo de energia elétrica (equação 29) multiplicando-se a potência elétrica do motor (definida no item 4.2.2.3), o número de bombas associadas e o tempo de bombeamento obtido a partir da simulação da dinâmica do reservatório para cada ano de análise.

$$CE_{(i)} = P_{el_{motor (i)}} \cdot \Delta t_{(i)} \quad (29)$$

Onde:

i = ano em análise;

CE = energia elétrica consumida (kWh);

$P_{el_{motor}}$ = potência elétrica do motor referente ao ano de análise (kW);

Δt = tempo de operação referente ao ano de análise (h).

As tarifas de consumo praticadas pelas concessionárias de energia diferem de acordo com o horário de consumo, de maneira que o cálculo da energia elétrica consumida é discriminado em duas parcelas: energia consumida no horário de ponta e energia consumida fora do horário de ponta.

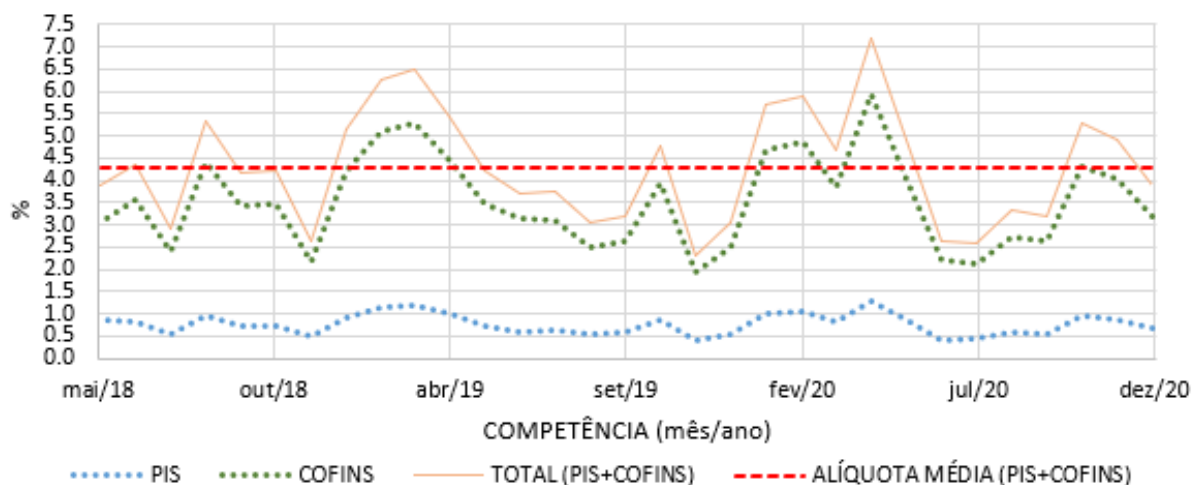
Além de diferirem de acordo com o horário de consumo, as tarifas ainda variam de acordo com a modalidade tarifária contratada. Este estudo considera as modalidades horo-sazonais azul e verde, permitindo avaliar qual a mais vantajosa para os casos estudados de acordo com os preços de tarifação praticados pela concessionária local.

A composição do custo final com energia elétrica também deve considerar as alíquotas de impostos, como o Programa de Integração Nacional (PIS), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Nacional (Cofins) e o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS).

Destes tributos, PIS e Cofins (âmbito federal), possuem variação mensal. Nesta pesquisa, o valor da alíquota PIS/CONFINS aplicada para a estimativa de custos com energia elétrica assumiu o valor de 4,29%, valor este resultante de uma média dos

valores registrados na série histórica desses tributos para o período de junho/2018 a dez/2020, conforme Figura 17.

Figura 17 – Série histórica do tributo PIS/Cofins



(fonte: baseado em CEEE, 2021)

O ICMS é um imposto estadual e, portanto, deve ser verificado para cada sistema a ser diagnosticado conforme o seu local de implantação. De maneira geral, a alíquota incidente sobre as contas de energia elétrica varia de 7 a 30%, conforme cartilha denominada “Fique por dentro da conta de Luz da Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul” (ANEEL, 2007), elaborada pela Aneel. Assim, como forma de simplificação, adotou-se a média das alíquotas de ICMS incidentes nos estados brasileiros de maior relevância econômica (25%).

Portanto, o custo com energia elétrica a cada ano de análise pode ser expresso pela equação 30.

$$CO_{(i)} = \frac{T_p \times Cep_{(i)} + T_{fp} \times Cefp_{(i)} + T_D \times P_{inst} \times 12}{1 - (PIS + Cofins + ICMS)} \quad (30)$$

Onde:

i = ano em análise;

CO = custo de operação no ano em análise;

CE_p = energia elétrica consumida no horário de ponta no ano em análise(kWh);

CE_{fp} = energia elétrica consumida fora do horário de ponta no ano em análise(kWh);

P_{inst} = potência instalada (kW);

T_p = Tarifa de consumo no horário de ponta (R\$/kWh);

T_{fp} = Tarifa de consumo fora do horário de ponta (R\$/kWh);

T_D = Tarifa de demanda (R\$/kW);

PIS = alíquota para o Programa de Integração Social;

Cofins = alíquota da Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social;

ICMS = alíquota do Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços.

Para efeitos de comparativo econômico, os custos com energia elétrica são encarados como custos variáveis, visto que se obtém valores distintos para cada ano de análise. Assim, para que esses custos possam ser somados ao custo de implantação do bombeamento, foi preciso convertê-los a custos fixos através do seu valor presente. Para isso, os custos foram corrigidos utilizando a taxa de aumento de energia elétrica (tee) e a taxa de juros (ij), aqui adotadas em 7% a.a. e 14% a.a., respectivamente. Estes são valores conservadores usualmente empregados em estudos preliminares de projetos.

A equação 31 expressa a forma de cálculo utilizada para a conversão do custo variável (custo com energia elétrica) em custo fixo (valor presente).

$$VPop_{(i)} = CO_{(i)} \times (1 + tee)^i \times \left(\frac{1}{(1 + ij)^i} \right) \quad (31)$$

Onde:

i = ano em análise;

$VPop$ = valor presente do custo de operação no ano em análise (R\$);

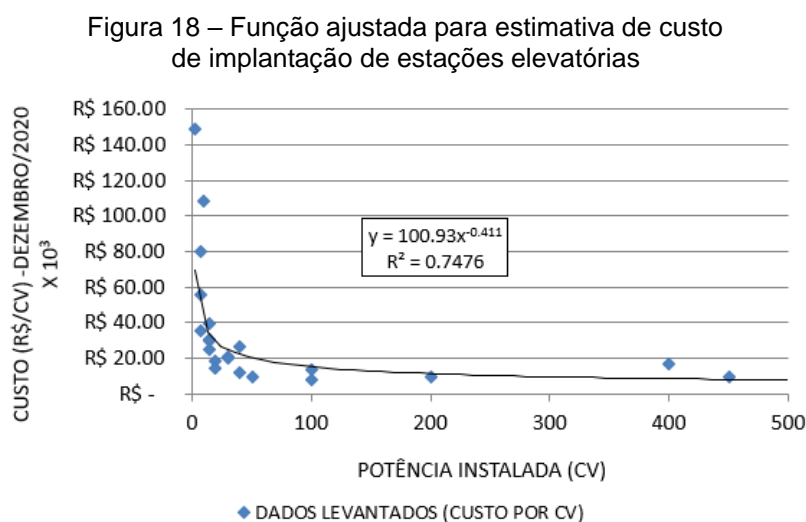
CO = custo de operação no ano em análise (R\$);

tee = taxa de aumento de energia elétrica;

ij = taxa de juros.

Os custos de implantação se referem ao valor a ser dispendido para implementação das intervenções previstas em cada iteração. Neste estudo, tal valor é representado pelos custos de aquisição dos equipamentos eletromecânicos (bombas e motores, incluindo a unidade reserva) e serviços necessários à sua implantação, como desmontagem dos CMB antigos e instalação dos novos.

Para estas intervenções, a estimativa dos custos de implantação foi feita com base em uma curva de custos associada à potência de instalação dos equipamentos. Esta curva de custo foi elaborada a partir do *portfolio* particular de projetos desta autora, tendo sido atualizada pelo índice INCC para o mês de dezembro de 2020. A Figura 18 apresenta a função ajustada do custo por CV instalado.



(fonte: elaborada pela autora)

Salienta-se que os valores utilizados para compor esse ajuste são oriundos de orçamentos completos de projetos executivos e, portanto, englobam custos com aquisição de CMBs, equipamentos mecânicos (válvulas e outras peças inclusas na montagem do barrilete de sucção e recalque das elevatórias), instalações elétricas e demais obras civis (preparação de terreno, construção da casa de bombas e etc).

Para que a função pudesse ser utilizada nesta metodologia, foi necessário observar a porcentagem do custo total fornecido por ela que representa apenas a aquisição dos CMBs e dos serviços necessários à sua implantação. O levantamento detalhado dos dados utilizados na sua composição viabilizou o desmembramento dos orçamentos, evidenciando que estes itens compreendem, em média, apenas 10% do valor total obtido a partir da função de custo ajustada. Sendo assim, a expressão utilizada para alimentar o programa na etapa de estimativa do custo de implantação é dada pela equação 32.

$$CI = 0,1 \times P_{inst} \times [(100,93 \times (P_{inst})^{-0,411}) \times 10^3] \quad (32)$$

Onde:

CI = custo de implantação (R\$);

P_{inst} = potência instalada (CV);

Observa-se que à função do custo de implantação foi aplicado o Método das Penalidades. Neste método, o programa realiza a busca pelo melhor valor do mesmo modo que para os casos sem restrição, porém esta função, ou seja, o custo de implantação, tem seu valor alterado sempre que os parâmetros com restrições atingirem valores não desejados. Desta maneira, podem ser utilizados métodos simples de busca e garante-se que a solução estará dentro do domínio aceitável.

Assim, o código do programa foi escrito de forma a atribuir o valor de R\$ 100 milhões ao custo de implantação, substituindo o valor anteriormente calculado pela equação 32, quando uma ou mais das seguintes restrições abaixo apresentadas ocorrerem.

Velocidade na adutora fora dos limites preconizados pela NBR 12.215-1 (ABNT, 2017b):

Se $V_{adutora} < V_{min} \parallel V_{adutora} > V_{máx}$, então CI = R\$100 milhões

Se $V_{min} \leq V_{adutora} \leq V_{máx}$, então CI = equação 32

Destaca-se que para adutoras de água bruta, a velocidade mínima normatizada é 0,3 m/s, enquanto que para adutoras de água tratada, este limite mínimo é de 0,6 m/s. Em todos os casos, o limite superior normatizado é de 3 m/s.

Número de acionamentos da bomba superior ao recomendado pelos fabricantes: como referência, utilizou-se o “Manual de operação e montagem (Meganorm)” da fabricante KSB, que apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 – Frequência de partida – recomendação KSB

| POTÊNCIA DO MOTOR [kW] | Nº MÁXIMO DE PARTIDAS [PARTIDAS/HORA] |
|---------------------------|--|
| Até 12 | 15 |
| Até 100 | 10 |
| Mais do que 100 | 5 |

(fonte: KSB, 2013, p. 40)

Interrupção no fornecimento de água aos usuários: informação fornecida pelo programa através do volume de água no reservatório. Se na simulação da operação do reservatório o volume apresentar valores iguais a zero ou negativos, significa que o reservatório está vazio e, conseqüentemente, não há água disponível para o atendimento contínuo aos usuários.

$$\begin{array}{ll} \text{Se} & V_{\text{interno}} \leq 0, \quad \text{então CI} = \text{R\$100 milhões} \\ \text{Se} & V_{\text{interno}} \geq 0, \quad \text{então CI} = \text{equação 32} \end{array}$$

Por fim, conhecendo-se o custo de implantação das interferências previstas em cada solução candidata, a estimativa do custo global é obtida a partir do seu somatório com o somatório do valor presente dos custos com energia calculado para cada ano de análise, conforme indicado na equação 33. O custo global é a função objetivo a ser minimizada na otimização das variáveis.

$$CG = CI + \sum_{i=1}^{20} VPop_{(i)} \quad (33)$$

Onde:

i = ano em análise;

CG = custo global associado à solução candidata (R\$);

CI = custo de implantação (R\$);

VPop = valor presente dos custos de operação (R\$);

4.3 ROTINA PARA OBTENÇÃO DO PERFIL ENERGÉTICO E DA OPERAÇÃO USUAL DO SISTEMA ELEVATÓRIO EXISTENTE

A discussão acerca do benefício da operação a partir da definição da Linha Base Otimizada só é possível após o conhecimento da operação usual do sistema elevatório existente e os custos associados a ela para um mesmo período de 20 anos de análise, considerado no item 4.2.

Para esta etapa do estudo, é importante atentar às informações tais como diâmetro e material da tubulação, volume de reserva existente, configuração do recalque, especificações dos equipamentos em operação, ponto de operação usual, rugosidade da tubulação, características de consumo, existência de alguma manobra de operação específica etc.

Em se tratando da operação do bombeamento em si, a partir de medições *in loco* de vazão e de pressão em dois pontos de operação e tendo conhecimento do desnível geométrico vencido pelo bombeamento, é possível estimar as curvas do sistema e do bombeamento a partir das equações 34 e 35.

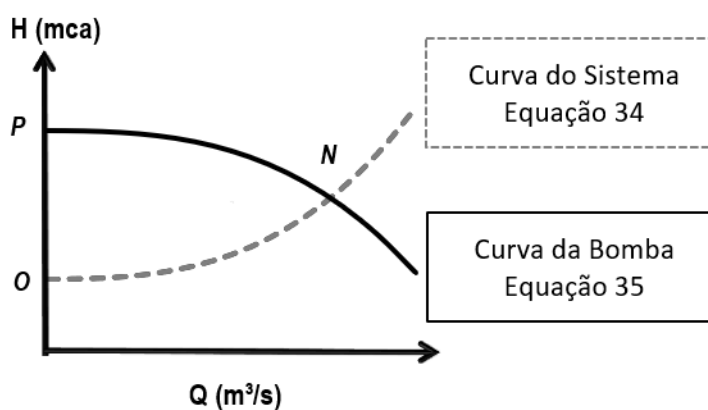
Os pontos que devem ser levantados para determinação da curva do bombeamento (Figura 19) são: o ponto de operação normal (ponto N) e, se possível, o *shut off* (ponto P) ou outro ponto de operação. Para a curva do sistema, é considerado o desnível geométrico (ponto O) e também o ponto de operação normal (ponto N). Para ambas as curvas, a altura manométrica total (H) pode ser calculada em função da vazão (Q) a partir do ajuste dos coeficientes “a” e “b” da equação 36.

$$H_S = H_O + \left(\frac{H_N - H_O}{Q_N^2} \right) \times Q^2 \quad (34)$$

$$H_B = H_P + \left(\frac{H_N - H_P}{Q_N^2} \right) \times Q^2 \quad (35)$$

$$H = a + b \times Q^2 \quad (36)$$

Figura 19 – Método dos três pontos para as curvas da bomba e do sistema de recalque



(fonte: elaborada pela autora)

Para conhecer a variação da vazão de bombeamento ao longo do período analisado (20 anos), é preciso ajustar o ponto de operação de acordo com o deslocamento da curva do sistema causada pelo envelhecimento da tubulação da linha adutora.

No caso do sistema existente, o ajuste da vazão segue rotina de cálculo similar àquela utilizada para determinação da Linha Base Otimizada (item 4.2.3), no entanto, como se deseja verificar o desempenho usual dos CMBs em operação vigente, utiliza-se a curva da bomba obtida a partir da aplicação do método dos três pontos.

Assim, tem-se que H_s é igual a H_B , ou seja, encontra-se a vazão de bombeamento para a qual a equação 34 é equivalente a equação 35.

A simulação da operação do reservatório para as condições operacionais correntes é realizada a partir de rotina de cálculo análoga à apresentada no item 4.2.4.2, contudo, aqui não são testados diferentes volumes úteis, sendo utilizado o volume útil total do reservatório superior existente.

A rotina de operação do reservatório nos fornece os tempos de bombeamento durante o período de ponta e fora deste período. Estes dados são utilizados para calcular a energia elétrica consumida nos respectivos períodos, assim como os custos de operação e seu valor presente. Para isso, são utilizadas as equações 29, 30 e 31, previamente apresentadas e discutidas no item 4.2.5.

Observa-se que, por se tratar da operação e estimativa de custos de um sistema existente e completamente implantado, não há custos de implantação a serem considerados.

4.4 CONSIDERAÇÕES DO ALGORITMO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Um processo de otimização consiste de variáveis cujos valores otimizados se deseja conhecer, a partir de uma ou mais funções-objetivo que atendam às restrições determinadas pelo usuário.

Neste trabalho, o método selecionado para solucionar o problema de otimização foi o da Busca Exaustiva, pois é capaz de retornar ao usuário o ótimo global, uma vez que estima todas as combinações dos valores das variáveis de decisão e para cada uma delas calcula o valor da função objetivo.

O modelo de simulação utilizado para a otimização consiste basicamente na rotina de cálculo apresentada no item 4.2, tendo um total de 255 soluções candidatas resultante das combinações dos parâmetros apresentados na Tabela 2, onde também são indicadas as restrições aplicadas pelo usuário ao espaço de busca de cada variável de decisão.

Observa-se que a variável α (alfa) define a vazão de bombeamento testada, logo, o seu valor implica diretamente na variação da vazão de dimensionamento do bombeamento de cada solução candidata.

Tabela 2 – Variáveis de decisão e restrições aplicadas à busca

| VARIÁVEL DE DECISÃO | RESTRIÇÃO DO ESPAÇO DE BUSCA |
|--|--|
| α (alfa) | $0,1 \leq \alpha \leq 2,0$ $\Delta=0,1$ |
| *nb (número de bombas associadas) | $1 \leq nb \leq 3$ $\Delta=1,0$ |
| V _{útil} (volume útil do reservatório superior) | 20%, 40%, 60%, 80% e 100% do V _{útil} existente |

* Mais uma de reserva

(fonte: elaborada pela autora)

A função objetivo definida para esta pesquisa é o custo global, resultante do somatório do custo de implantação e custos de operação trazidos a valor presente. Os valores atribuídos à função objetivo de cada solução candidata foram armazenados em forma de vetor.

Finalizadas as iterações, a otimização é iniciada. O algoritmo busca o menor valor armazenado no vetor de resultados da função objetivo e retorna a sua posição de armazenamento no vetor, permitindo conhecer a solução ótima (melhor conjunto de valores das variáveis de decisão).

Para a otimização foi utilizado MATLAB na versão Windows e computador com processador intel® core™ i7-370 CPU @ 3.40GHz; e memória RAM instalada de 16 GB. O sistema operacional utilizado foi o Windows 10, versão 64 bits.

O tempo médio de execução do código programado foi de aproximadamente 45 minutos.

4.5 ANÁLISE DO BENEFÍCIO TÉCNICO-FINANCEIRO DA LINHA BASE OTIMIZADA

Indicadores são ótimas ferramentas de análise qualitativa e quantitativa de sistemas de bombeamento e, quando avaliados em conjunto com outros parâmetros, tais como *payback* e potenciais de economia de consumo de energia e custos, auxiliam a gestão e planejamento financeiro das ações de melhorias a serem realizadas.

Assim, por meio destes recursos, é possível realizar análises comparativas entre os desempenhos das diversas combinações de variáveis (soluções candidatas) e, também, avaliar o benefício técnico-financeiro do sistema proposto com a adoção das condições operacionais da Linha Base Otimizada definida pelo programa.

Com este objetivo, utilizou-se as ferramentas de análise listadas abaixo:

- a) Consumo Específico de Energia Elétrica (kWh/m³) – CE: calculado pela equação 2;
- b) Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado (kWh/m³/100 m) – CEN: obtido pela equação 3;
- c) Custo Médio de Energia Elétrica (R\$/kWh) – CME: calculado pela equação 4;
- d) Consumo Diário de Energia (kWh/dia) – CDE: obtido pela equação 6, e;
- e) Custo por Volume Bombeado (R\$/m³) – CVB: determinado pela equação 7.
- f) Potencial de Economia de Energia (kWh) – PE: dado pela diferença da energia consumida pelo sistema existente (ver item 4.3) e a energia consumida pela operação da Linha Base (equação 38).

$$PE = CE_{existente} - CE_{LB} \quad (38)$$

- g) Potencial de Economia de Custos (R\$) – PC: dado pela diferença do valor presente do custo operacional (com energia elétrica) pelo sistema existente e o valor presente do custo operacional da Linha Base energia consumida pela operação da Linha Base, calculados conforme equação 39.

$$PC = VPop_{existente} - VPop_{LB} \quad (39)$$

h) *Payback* Simplificado do Investimento (meses) – PB: obtido a partir da relação entre o somatório dos potenciais de economia de custos (PC) e o custo de implantação das intervenções (CI). Para obter valores mensais, o valor de PC foi distribuído igualmente ao longo dos 12 meses do ano a que cada valor é associado. Assim, programou-se uma rotina para identificar em quantos meses de operação o somatório dos PC se equivale ou ultrapassa o custo de implantação das interferências.

5 ESTUDOS DE CASO

Com o intuito de demonstrar a aplicação da metodologia proposta e indicar ações de melhoria visando uma maior efficientização, foram realizados estudos de caso em dois sistemas de bombeamento de água existentes, cujas grandezas geométricas, hidráulicas e elétricas foram levantadas pela rede LENHS (Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento) e cedidos para utilização nesta pesquisa. Estes sistemas foram identificados em alusão à sua localização, sendo aqui denominados como Sistemas Norte (N) e Nordeste (NE).

5.1 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE BOMBEAMENTO ESTUDADOS

O Sistema Norte é configurado por um reservatório de sucção apoiado de 850 m³ a partir do qual dois conjuntos motobombas associados em paralelo recalcam água tratada até um reservatório superior do tipo elevado, com capacidade de armazenamento de 500 m³. A adução da água é realizada através de uma adutora de ferro fundido.

O sistema de bombeamento Nordeste também é caracterizado pela operação de dois conjuntos motobombas, succionando de um reservatório inferior apoiado e elevando água tratada até um reservatório elevado de 1000 m³. Neste sistema, a adutora em operação também é de ferro fundido.

Em ambos os sistemas, os reservatórios elevados são responsáveis pelo abastecimento contínuo da rede de distribuição por gravidade.

As principais características dos sistemas em estudo utilizadas para alimentar o modelo matemático foram sintetizadas nas Tabelas 3, 4 e 5. A primeira apresenta as informações gerais dos sistemas, enquanto a segunda e a terceira apresentam informações sobre os conjuntos motobomba instalados e os dados levantados em campo, respectivamente.

Tabela 3 – Caracterização geral dos sistemas estudados

| CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SISTEMAS | NORTE | NORDESTE |
|---|-------|----------|
| Tempo de Operação (anos) | 22 | 7 |
| Número de bombas operando em paralelo | 2 | 2 |
| Volume do reservatório superior (m ³) | 500 | 1.000 |
| Desnível geométrico (m) | 33,15 | 57,50 |
| Diâmetro interno da adutora (mm) | 409,8 | 309,6 |
| Comprimento da adutora (m) | 37,9 | 2.484,1 |
| Material da adutora | FFD | FFD |
| Coefficiente de perda de carga singular (Ks) | 92,7 | 7,3 |

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 4 – Características dos conjuntos motobomba instalados

| CARACTERÍSTICAS DOS CMB | NORTE | NORDESTE |
|---------------------------------------|-------|----------|
| Número de bombas operando em paralelo | 2 | 2 |
| Rotação nominal (rpm) | 1.775 | 3.500 |
| Potência unitária instalada (CV) | 60 | 150 |
| Potência total instalada (CV) | 120 | 300 |

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 5 – Dados medidos em campo

| DADOS MEDIDOS | NORTE | NORDESTE |
|---|----------------------|-----------------------|
| Vazão bombeada (m ³ /s) | 0,133 | 0,090 |
| Vazão de pico da curva de demanda (m ³ /s) | 0,112 | 0,070 |
| Altura manométrica (m.c.a.) | 40,7 | 69,3 |
| Altura de <i>shutoff</i> (m.c.a.) | 50,7 | 93,5 |
| Coefficiente de rugosidade (C) | 102,7 ^(*) | 122,2 ^(**) |
| Volume médio diário consumido (m ³ /dia) | 7.732,3 | 4.492,3 |

^(*) valor estimado pela equação 25^(**) valor medido

(fonte: elaborada pela autora)

Uma particularidade na operação do Sistema Norte que deve ser destacada é o estrangulamento da válvula localizada no barrilete, após a junção das tubulações de recalque dos CMBs para o reservatório superior, utilizado como forma de controle de vazão. Tal estrangulamento aumenta a perda de carga do sistema e, por isso, o valor do coeficiente de perda de carga singular (Ks) estimado para este sistema se apresenta com tamanha magnitude. Este artifício utilizado para ajustar a operação do bombeamento à uma zona operacional desejada demonstra que as bombas utilizadas não foram dimensionadas para este sistema, tendo sido empregadas, provavelmente, em caráter de aproveitamento.

O valor de K_s apresentado na Tabela 3 para o referido sistema foi estimado em duas parcelas, posteriormente somadas.

A primeira delas é relativa à perda de carga singular nas peças e acessórios já expectável, sem admitir qualquer obstrução ou mau funcionamento das mesmas, e foi calculada pela equação exibida na Figura 11 em função da relação L/Hg . O valor de K_s resultante desta primeira parcela foi 21,95.

A segunda parcela remete à perda de carga singular ocorrida pontualmente no estrangulamento da válvula. Para estimar seu valor, admitiu-se que a ocorrência de qualquer perda, além da perda de carga linear e a perda de carga associada ao coeficiente K_s da primeira parcela, seja em função desta obstrução parcial da seção de passagem da água. Assim, determinou-se o coeficiente K_s desta segunda parcela a partir da diferença observada entre a perda de carga total (determinada através das medições realizadas para uma vazão específica de bombeamento) e as perdas estimadas na primeira parcela para uma mesma vazão de bombeamento, resultando em um valor de K_s igual a 70,74.

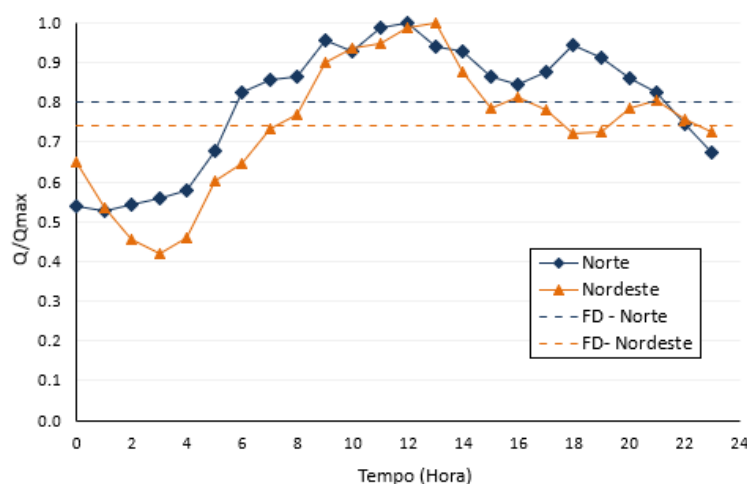
Apesar de não ser recomendável o controle da operação através do estrangulamento de válvulas, se faz importante esclarecer que as simulações realizadas para o Sistema Norte existente consideraram essa característica da operação corrente a fim de mensurar quais seriam os consumos e custos a longo prazo, caso a operação fosse mantida pelos próximos 20 anos. Para as simulações da rotina de definição da Linha Base Otimizada propriamente dita, essa característica da operação presente foi desconsiderada, sendo adotado apenas o valor calculado na primeira parcela da estimativa de K_s , referente ao funcionamento normalizado dos elementos.

O volume médio diário consumido corresponde ao montante dos consumos horários observados na curva de demanda de cada sistema, cujo padrão de consumo varia em função de diversos fatores (hábitos culturais, clima, tipo de usuário). Assim, para facilitar a comparação entre as curvas de demandas medidas nos sistemas estudados, os volumes horários foram adimensionalizados pela vazão máxima diária.

Destaca-se que os sistemas possuem coeficiente de vazão máxima horária (k_2) de 1,25 e 1,35. O inverso deste coeficiente representa o fator de demanda (FD), resultando em 0,80 e 0,74 para os Sistemas Norte e Nordeste, respectivamente.

A Figura 20 apresenta as curvas adimensionalizadas e indica o fator de demanda de cada uma delas.

Figura 20 – Curvas de Demanda adimensionalizadas e Fator de Demanda



(fonte: elaborada pela autora)

Em relação à tarifação aplicada nas simulações (Tabela 6), utilizou-se aquelas praticadas pelas principais concessionárias de energia da região de estudo: Equatorial Energia (Sistema Norte) e Energisa (Sistema Nordeste). As tarifas de demanda e de consumo vigentes são disponibilizadas no website das referidas concessionárias. Para este trabalho, utilizou-se como referência os valores do mês de julho de 2021 praticados nas modalidades tarifárias horo-sazonais verde e azul para consumidores do tipo A4 (de 13,5 a 25kV). As alíquotas de ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), PIS (Programa de Integração Social) e Cofins (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social) utilizadas são aquelas referidas no item 4.2.5. Ressalta-se que as alíquotas ICMS dos estados de localização dos sistemas estudados apresentam mesmo valor (25%) que a adotada como média dos estados brasileiros.

Tabela 6 – Tarifação aplicada nas simulações

| TARIFAS | TARIFA AZUL | | TARIFA VERDE | |
|--|-------------|----------|--------------|----------|
| | NORTE | NORDESTE | NORTE | NORDESTE |
| Custo de demanda – Fora Ponta (R\$/kW) | 29,75 | 21,41 | 29,75 | 21,41 |
| Custo de demanda – Ponta (R\$/kW) | 94,38 | 60,93 | | |
| Custo de consumo – Fora Ponta (R\$/kWh) | 0,28670 | 0,23143 | 0,28670 | 0,23143 |
| Custo de consumo – Ponta (R\$/kWh) | 0,41485 | 0,35402 | 2,70570 | 1,83456 |

(fonte: baseada em ENERGISA, 2021; EQUATORIAL ENERGIA, 2021)

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A modelagem matemática indica a solução que representa o menor custo global, sendo que para cada solução há um conjunto de variáveis de decisão associado. A rotina computacional permite a determinação de uma Linha Base Otimizada, mas também auxilia na compreensão de determinados parâmetros obtidos para as demais soluções testadas.

Assim, os resultados obtidos na simulação dos sistemas estudados são apresentados de forma a, inicialmente, discutir a correlação entre parâmetros calculados para as diversas combinações de variáveis do modelo, permitindo uma visão ampla e geral dos consumos e custos a elas associados. Os custos são apresentados considerando as modalidades tarifárias verde e azul, desenvolvendo-se uma análise tarifária.

Posteriormente, são apresentadas as soluções ótimas obtidas para cada sistema (Linha Base Otimizada), seu padrão operacional e energético e seu benefício técnico-financeiro.

5.2.1 Correlação entre os resultados obtidos para as soluções e suas variáveis de decisão

A variação do consumo de energia, custo de energia e custo global referente aos 20 anos do período de análise, em valor presente, verificados pela rotina computacional para cada solução testada é apresentada neste item através de uma sequência de gráficos, conforme o sistema a que se refere e a tarifa horo-sazonal aplicada.

As soluções apresentadas são aquelas consideradas viáveis, visto que não violaram restrições operacionais como velocidade mínima e máxima, atendimento da demanda e/ou número de acionamentos recomendado pelos fabricantes. Aquelas que violaram tais restrições, ainda que representassem redução elevada no custo de operação, foram penalizadas pelo algoritmo e retiradas do espaço de solução viáveis, de forma que não são aqui apresentadas. Assim sendo, soluções com $\alpha \leq 1,2$ (Sistema Nordeste) e $\alpha \leq 1,1$ (Sistema Norte) foram descartadas desta análise.

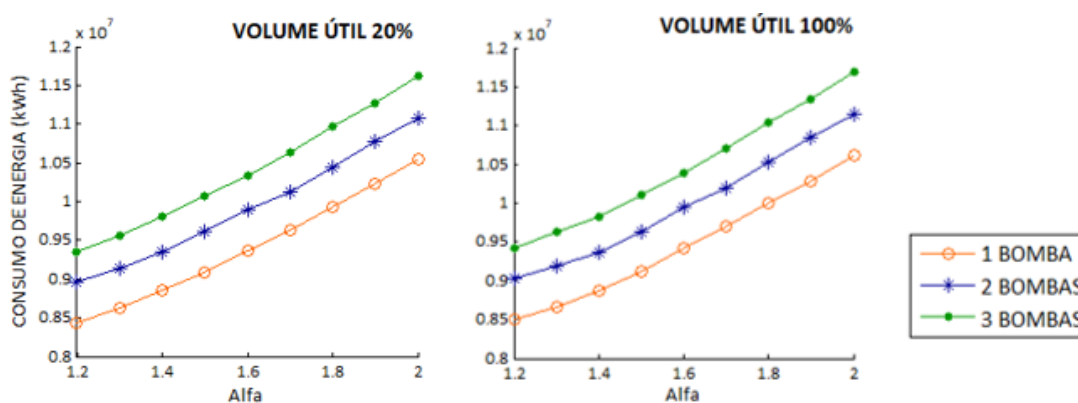
Para ilustrar esta análise, foram selecionados os volumes úteis relativos a 20% e 100% da capacidade de reserva existente em cada sistema, uma vez que

representam os limites da influência desta variável nos resultados. Contudo, os demais gráficos utilizados para esta análise podem ser encontrados no Apêndice.

5.2.1.1 Consumos de energia das diversas soluções

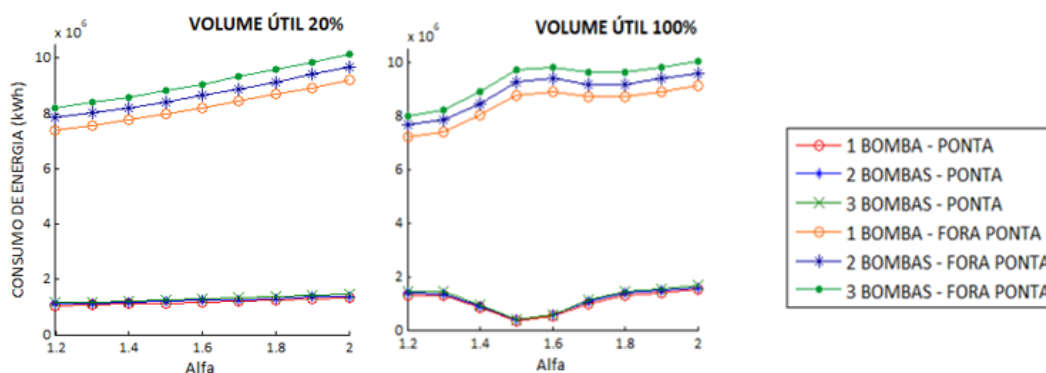
A Figura 21 mostra o consumo de energia total associado às soluções do Sistema Nordeste. Tais consumos são compostos por uma parcela consumida no horário de ponta e outra no horário fora de ponta, conforme Figura 22.

Figura 21 – Consumos de energia associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Nordeste



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 22 – Consumos de energia na ponta e fora da ponta associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Nordeste



(fonte: elaborada pela autora)

Nota-se a ocorrência de uma crescente no consumo de energia de acordo com o aumento da variável α (alfa) independente do volume útil testado, o que é esperado uma vez que maiores vazões conduzem à maiores perdas de carga no sistema e, conseqüentemente, à equipamentos mais potentes.

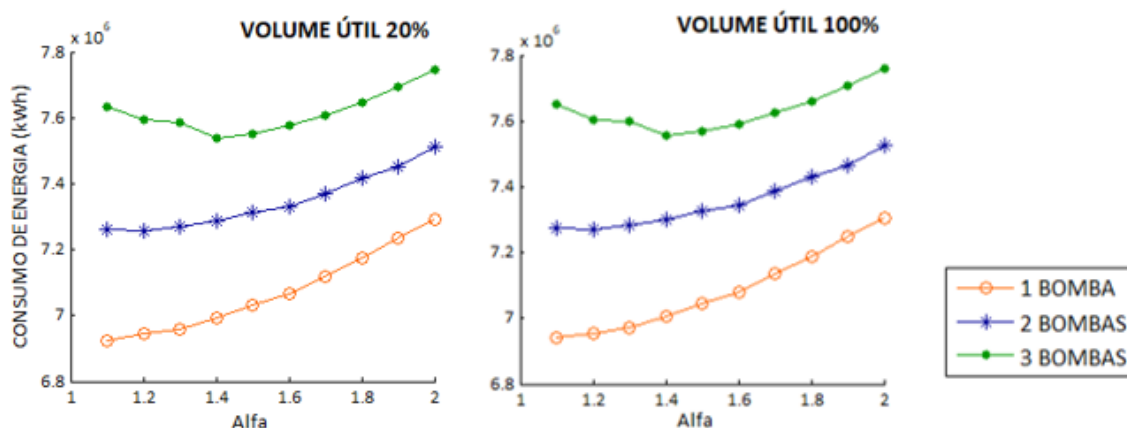
Outro aspecto importante a ser destacado é a correlação do aumento do consumo de energia com o aumento do número de CMBs operativos associados em paralelo. Para este sistema, o incremento de consumo de energia observado a cada CMB incluso na operação foi de aproximadamente 5,3% para um mesmo α (alfa).

Observa-se uma redução do consumo no horário de ponta para uma determinada faixa de α (alfa), com ponto mínimo em $\alpha = 1,5$, o que indica que esta solução favorece a redução do tempo de bombeamento na ponta.

Ademais, as curvas de consumo no período de ponta revelam que não foi possível indicar uma solução em que a operação nesta faixa horária fosse completamente evitada ao longo dos 20 anos de análise. Este comportamento está relacionado à deficiente capacidade de reserva existente (1.000 m³). De maneira geral, a bibliografia técnica recomenda que o volume de reserva seja de pelo menos um terço da demanda diária de água (33%), enquanto que a capacidade de reserva deste sistema representa apenas 22% da sua demanda diária.

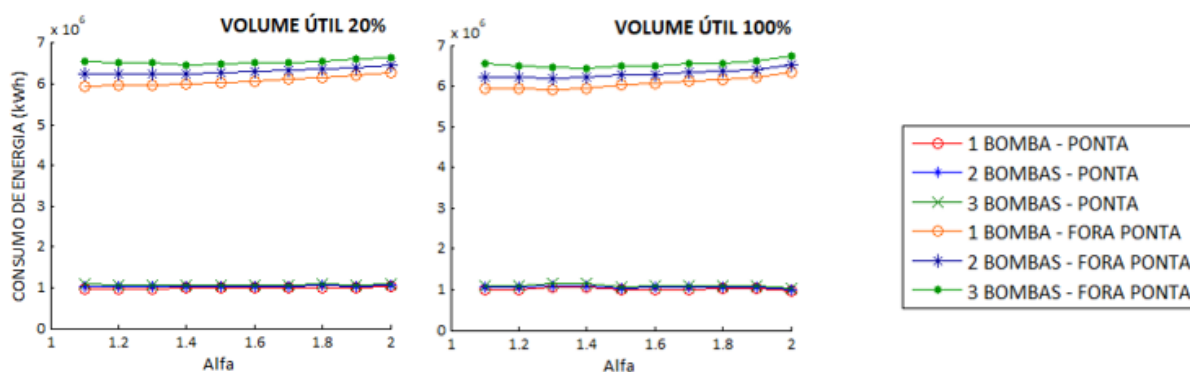
O consumo de energia total, no horário de ponta e fora do horário de ponta obtidos para o Sistema Norte são apresentados nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Consumos de energia associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 24 – Consumos de energia na ponta e fora da ponta associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

De maneira análoga ao Sistema Nordeste, no Sistema Norte a energia consumida se apresenta crescente com a vazão, independente do volume testado. Entretanto, apesar do menor consumo de energia ser obtido para a operação a partir de apenas um CMB, observa-se que o incremento no consumo de energia quando se inclui um novo CMB é sensível também em relação ao α (alfa), sendo menor para α (alfas) maiores e maior para α (alfas) menores.

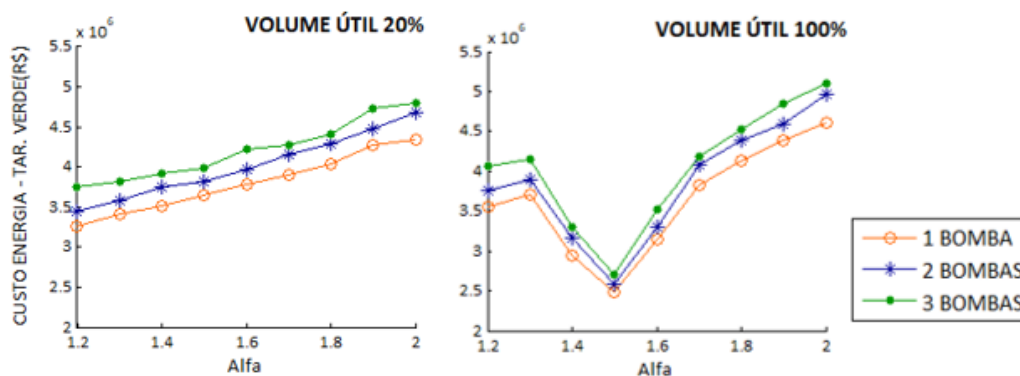
Neste sistema também se verifica a impossibilidade de operação apenas na faixa horária fora da ponta, uma vez que sua capacidade de reservação é ainda mais limitada do que a do Sistema Nordeste. O Sistema Norte possui volume útil de 500 m³, o que equivale a apenas 6,5% do volume demandado diariamente. Outro fato que corrobora para este comportamento é a existência de um pico de consumo de água (Figura 20) coincidente com o horário de ponta de custo de energia elétrica, o que contribui com a necessidade de operação dos conjuntos motobomba em horário de ponta, uma vez que não há reservação de água suficiente para o atendimento da rede nesta faixa horária.

Em geral, para ambos os sistemas, foi possível constatar grande sensibilidade na correlação do consumo de energia na ponta em relação ao volume útil de reservação testado, bem como ao número de CMBs em operação.

5.2.1.2 Custo operacional e global das diversas soluções considerando modalidade tarifária horo-sazonal verde

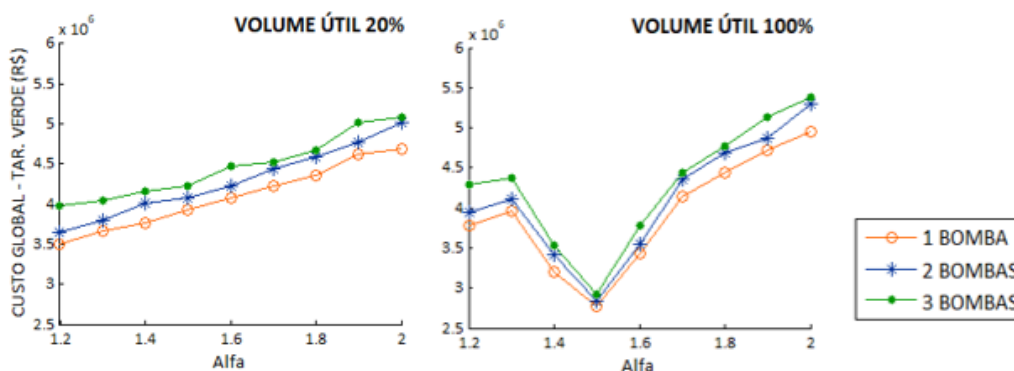
As Figuras 25 e 26 mostram o custo de energia e custo global associados às soluções do Sistema Nordeste, considerando a modalidade tarifária horo-sazonal verde.

Figura 25 – Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal verde – Sistema Nordeste



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 26 – Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal verde – Sistema Nordeste



(fonte: elaborada pela autora)

Analisando-se os resultados referentes à parcela do custo de energia, percebe-se que o padrão das curvas é o mesmo observado para o custo global, o que mostra que o custo operacional é quem determina o formato da curva, uma vez que representa em média 94% do custo global para o Sistema Nordeste. Assim, a influência do custo de implantação se limita ao deslocamento destas curvas no eixo do custo global (eixo y).

Tendo em vista os custos globais, percebe-se que a utilização de apenas um conjunto motobomba operativo é mais vantajosa em relação às configurações com outras

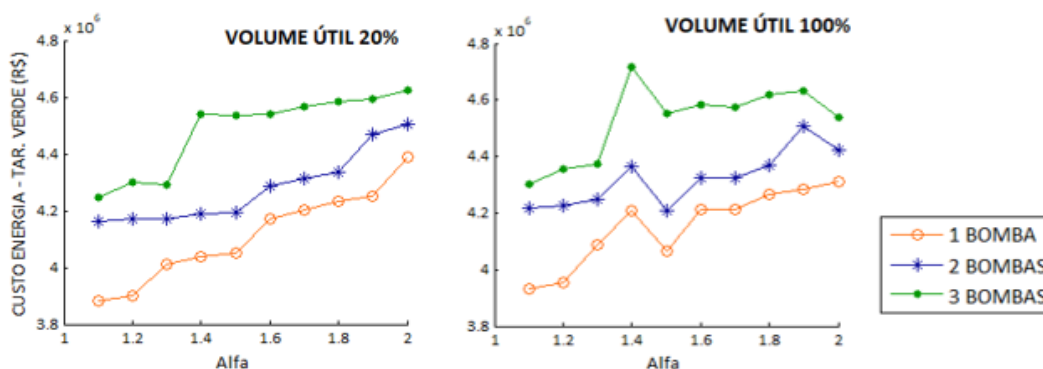
bombas em associação. A associação em paralelo de mais de uma bomba implica em uma potência instalada maior e, inevitavelmente, na necessidade de contratar uma maior demanda junto à concessionária de energia, implicando em custos mais elevados. Na comparação entre as operações de uma bomba para duas bombas, o custo de energia aumenta em média 6%. De duas para três, esta média gira em torno de 5,2%.

Observa-se, ainda, o impacto positivo do aumento do volume útil do reservatório nas soluções testadas, quando se sobressaem as melhores vazões de trabalho para determinado volume e arranjo da elevatória, ou seja, aquelas que conduzem à redução do custo operacional e global. Uma maior capacidade do reservatório permite uma maior flexibilidade do sistema, sendo possível operar por um menor período de tempo no horário de ponta para determinadas vazões de bombeamento. Para volumes de reservação reduzidos, a operação se torna inflexível e os custos globais apresentam crescimento proporcional ao aumento do α (alfa).

Este comportamento é reforçado pela correlação entre os pontos de alta e baixa dos custos operacionais com os pontos de consumo de energia na ponta. As depressões na curva de custos ocorrem para aquelas soluções em que é obtido um menor tempo de bombeamento no horário de ponta e, conseqüentemente, menor consumo de energia. Assim, verifica-se que o menor custo global no Sistema Nordeste advém da solução que considera $\alpha = 1,5$, uma bomba operativa e 100% do volume útil existente, que também é aquela que apresenta menor tempo de bombeamento na ponta, conforme Figura 22.

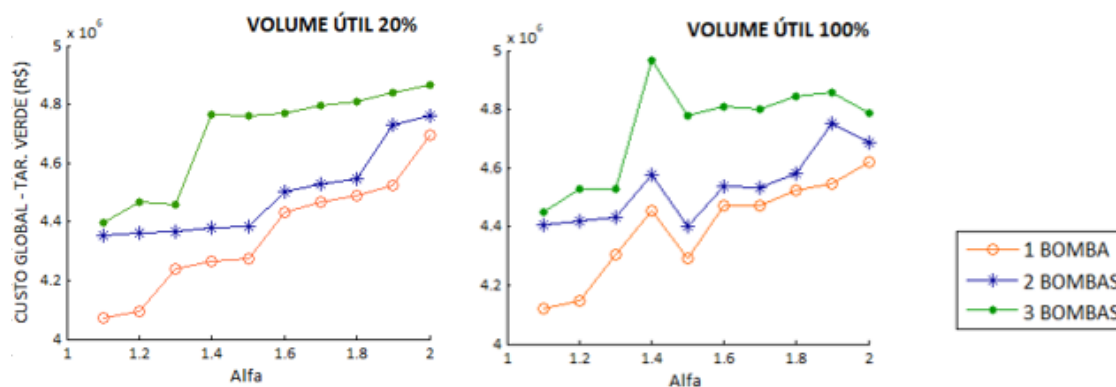
Os custos relativos às soluções simuladas para o Sistema Norte são apresentados nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal verde – Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 28 – Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal verde – Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

O Sistema Norte apresenta forte correlação de crescimento dos custos em relação ao crescimento do α (alfa), para qualquer um dos volumes úteis testados. Analisando os resultados, percebe-se que os menores custos são atribuídos àqueles α (alfa) de menor valor, sendo a solução ótima associada à $\alpha = 1,1$, uma CMB operativo e volume útil igual a 20% do volume existente. Isso se deve à pouca flexibilidade do sistema devido à reduzida reserva existente, fazendo com que o bombeamento permaneça em operação a maior parte do tempo para todas as soluções testadas, diferenciando uma solução da outra, principalmente, pela vazão de bombeamento. Contudo, para 100% do volume útil se observa leve decréscimo dos custos nas soluções com $\alpha = 1,5$ em relação ao alfa imediatamente anterior, embora não seja algo expressivo a ponto de elegê-las como solução ótima.

Da mesma maneira observada para o Sistema Nordeste, no Sistema Norte o aumento do número de CMBs operativos implica na necessidade de despendere maiores recursos financeiros, destacando como soluções mais vantajosas aquelas com bombeamento a partir de um único CMB.

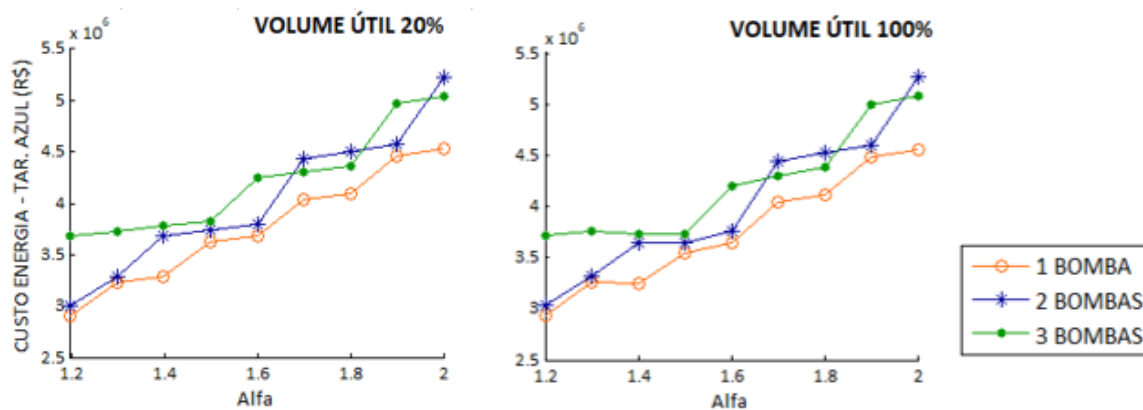
Também, verifica-se que as curvas resultantes para os custos de energia e global apresentam comportamento similar, destacando o prevalectimento do custo operacional em relação ao custo de implantação na composição do custo global. Para este sistema, a parcela atribuída ao custo de operação é, em média, 95% do custo global das soluções simuladas.

De maneira geral, os custos calculados para ambos os sistemas a partir da aplicação da tarifa horo-sazonal verde se mostraram sensíveis ao tempo de operação na ponta, visto que as tarifas de consumo desta modalidade de contratação para esta faixa horária são mais onerosas.

5.2.1.3 Custo operacional e global das diversas soluções considerando modalidade tarifária horo-sazonal azul

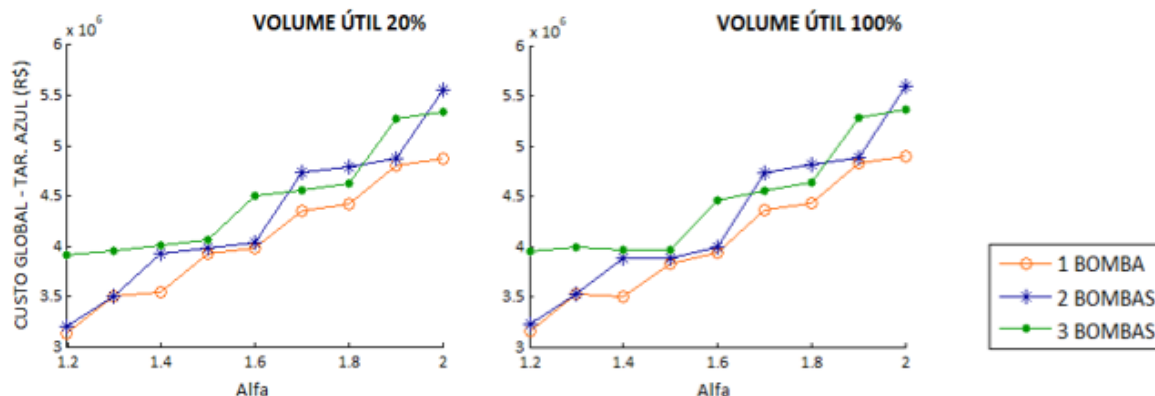
As Figuras 29 e 30 mostram os custos de energia e global associados às soluções do Sistema Nordeste, considerando a modalidade tarifária horo-sazonal azul.

Figura 29 – Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal azul – Sistema Nordeste



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 30 – Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal azul – Sistema Nordeste



(fonte: elaborada pela autora)

Analisando-se os custos obtidos para o Sistema Nordeste, percebe-se que as curvas de custos pouco se alteram em função do volume útil simulado. Isso porque o tempo de bombeamento no período de ponta acaba por não ser tão relevante na formação e variação do custo de uma solução para outra, visto que a tarifa azul de consumo na ponta é expressivamente mais barata que a tarifa verde de consumo para este mesmo período do dia. Assim, observa-se um custo crescente com o aumento do α (alfa).

De maneira adversa à verificada na aplicação da tarifa horo-sazonal verde para este sistema, nos resultados da tarifa horo-sazonal azul se nota eventuais cruzamentos entre as curvas do número de bombas em operação, permitindo visualizar os α (alfas) para os quais o arranjo adotado para a elevatória tem maior relevância para o custo global. Embora a curva para a operação de apenas um CMB operativo seja a menos onerosa em todos os α (alfas), verifica-se três soluções para os quais o uso de três CMBs é vantajoso em relação à operação com dois CMBs: $\alpha = 1,7$; $\alpha = 1,8$; e, $\alpha = 2,0$. A variação de custos entre a operação dos dois arranjos é em média 3,7% superior.

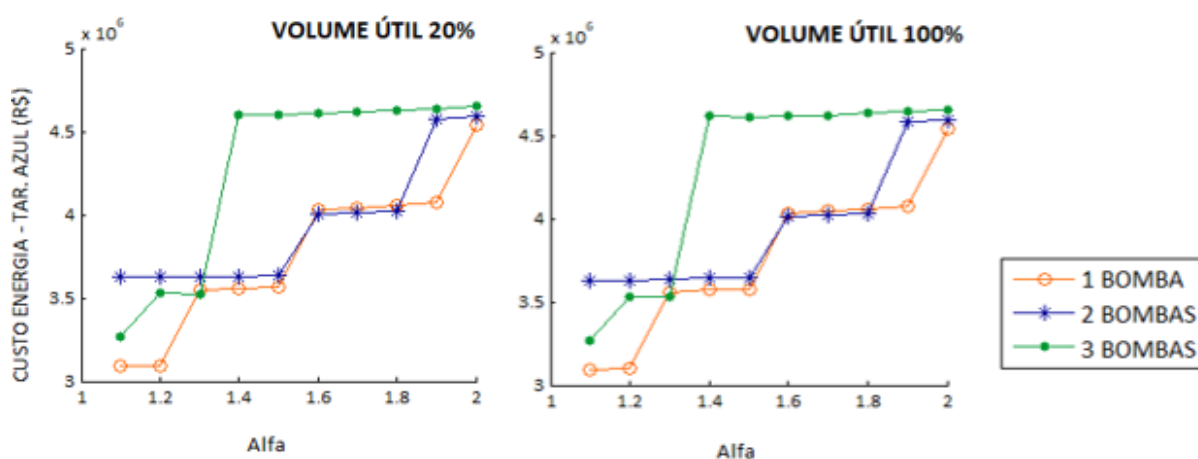
Outro aspecto importante é a ocorrência de pequenos saltos no custo na transição de determinado α (alfa) para outro. Este comportamento está associado à seleção de uma potência comercial maior do que aquela selecionada para a solução do α (alfa) anterior.

Destaca-se que o menor custo global é atribuído à solução de $\alpha = 1,2$, com um CMB operativo e volume útil equivalente a 20% do volume de reserva existente. Ainda que esta seja a solução com custo mínimo observado para a tarifa horo-sazonal azul,

o seu valor não é suficientemente pequeno a ponto de superar o custo mínimo obtido a partir da tarifa horo-sazonal verde, que se apresenta 11,4% menor.

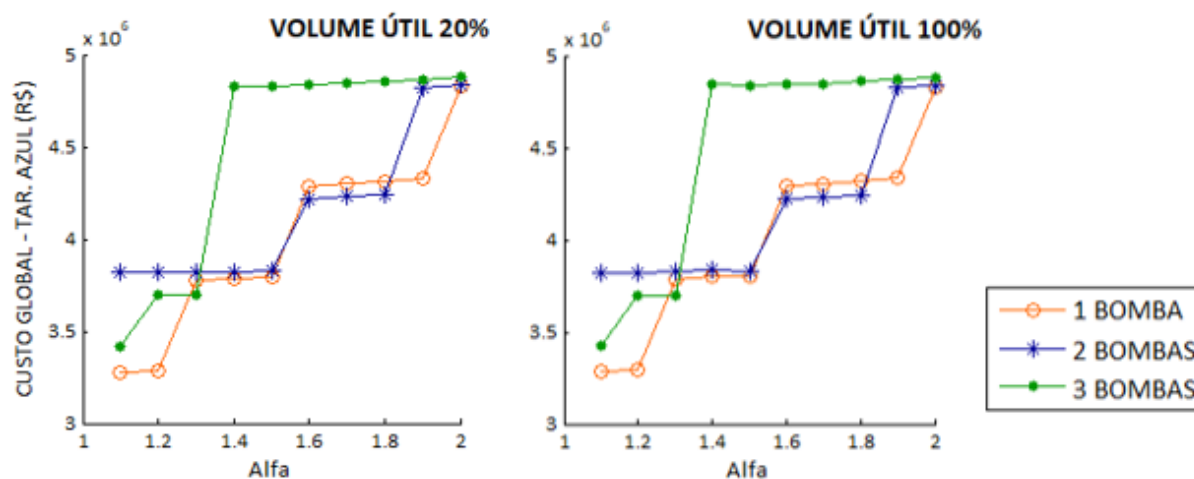
Os custos relativos às soluções simuladas para o Sistema Norte são apresentados nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal azul – Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 32 – Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise: tarifa horo-sazonal azul – Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

Frente aos resultados, percebe-se que os menores custos são atribuídos àqueles α (alfa) de menores valores, sendo a solução ótima associada à $\alpha = 1,1$, um CMB operativo e volume útil igual a 20% do volume existente. Esta solução apresentou

custo global mínimo para ambas as modalidades tarifárias de contratação (horo-sazonal verde e azul), entretanto, aplicando-se a tarifa azul o custo global mínimo surge com valor inferior ao observado a partir da aplicação da tarifa verde (cerca de 19,5% inferior), elegendo a modalidade tarifária horo-sazonal azul como sendo a mais adequada à operação deste sistema.

Em comportamento semelhante ao Sistema Nordeste, o formato das curvas pouco se altera com a incorporação do custo de implantação ao custo com energia elétrica, mostrando novamente que o benefício de uma rotina de operação adequada prevalece em relação aos custos com as intervenções necessárias.

Destaca-se que, para o Sistema Norte, os saltos observados no custo calculado na transição de um α (alfa) para outro são mais significativos, especialmente quando a transição ocorre do $\alpha = 1,3$ para $\alpha = 1,4$ na operação com três CMBs.

Em relação à influência da configuração da elevatória no custo global, é possível identificar a ocorrência de diversas soluções onde o bombeamento a partir de dois ou mais CMBs implica em despesas menores do que se fosse realizado a partir de apenas um CMB.

5.2.2 Perfil Operacional e Energético da Linha Base Otimizada

A rotina computacional desenvolvida indica a solução que representa o menor custo global (implantação + operação) dos sistemas estudados, sendo que, para cada solução há uma combinação de variáveis associadas.

A partir da análise dos resultados das combinações apresentadas na Figura 26, é possível observar que a solução que representa o menor custo global para o Sistema Nordeste possui $\alpha = 1,5$ (vazão 50% superior à vazão de pico da curva de demanda), associada a um volume útil idêntico ao volume de reservação instalado (100% da capacidade) e à modalidade de contratação tarifária horo-sazonal verde.

Já para o Sistema Norte, a solução que representa o menor custo global possui $\alpha = 1,1$ (vazão 10% superior à vazão de pico da curva de demanda), associado ao volume útil equivalente a apenas 20% da capacidade de reservação instalada neste sistema e à modalidade de contratação tarifária horo-sazonal azul (Figura 32).

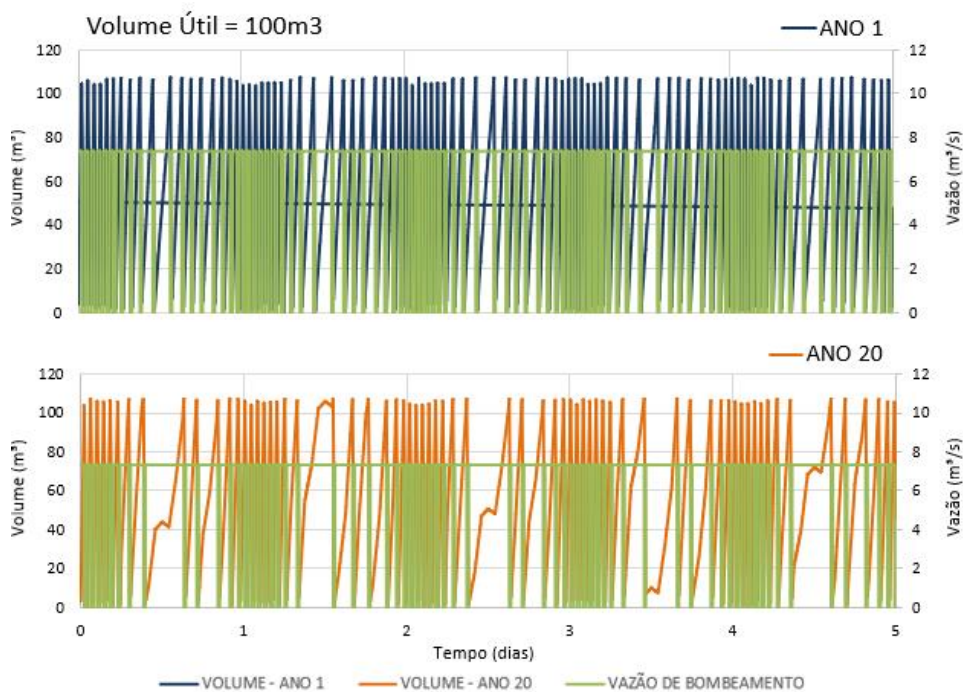
Embora a solução ótima indicada para o Sistema Norte tenha atendido todas as restrições em relação à velocidade, atendimento contínuo à rede de distribuição e número de acionamentos dos equipamentos dentro da recomendação dos fabricantes, chamou atenção o seu restrito volume útil associado de apenas 20% da capacidade instalada (100 m³). Tal volume representa apenas 1,3% da demanda média diária indicada na Tabela 5 (7.732,3 m³), não conferindo segurança hídrica ao sistema em casos de falhas no abastecimento de energia e/ou necessidade de interrupção no bombeamento para realização de eventuais reparos na adutora.

Observou-se que as outras quatro sucessivas melhores soluções para o Sistema Norte apresentaram mesmo alfa e mesmo número de bombas que a solução ótima, porém volumes úteis maiores (40, 60, 80 e 100% do volume útil instalado), demonstrando a mínima relevância desta variável em relação ao custo global na análise deste sistema. O consumo e custo de energia da solução que considera 100% do volume útil instalado apresentam variação de apenas 0,2% em relação à solução ótima indicada pelo algoritmo de otimização, sendo uma percentagem irrisória e podendo, para fins de comparação, ser considerada desprezível.

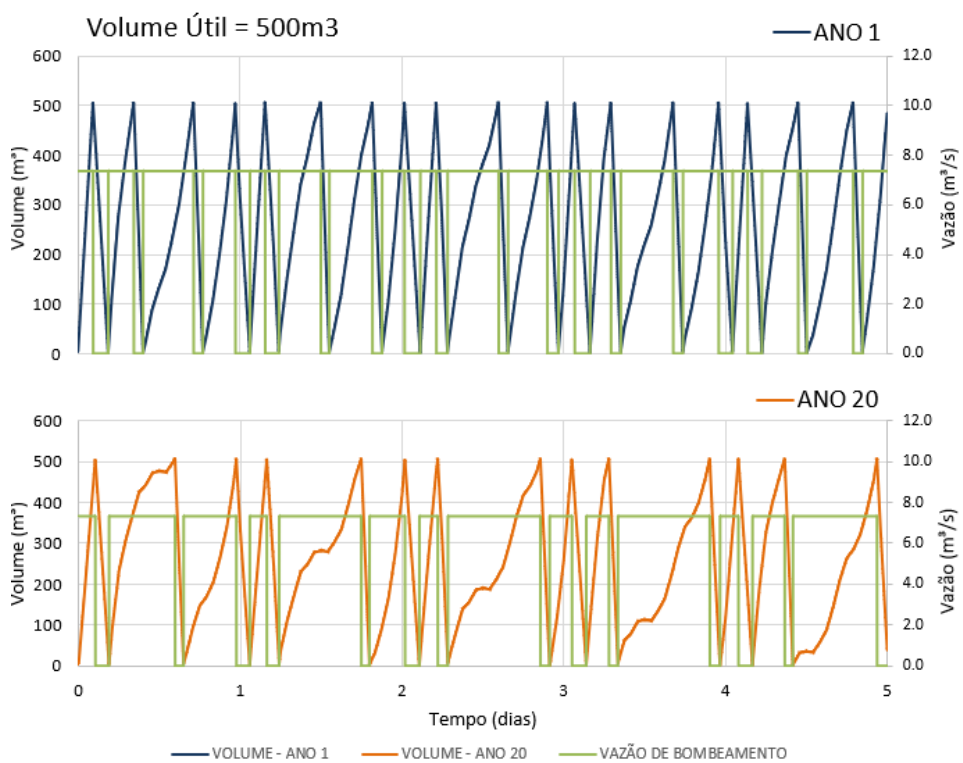
Tendo em vista que a única diferença entre estas soluções são os seus volumes úteis (20% e 100% do volume de reservação instalado), cabe uma análise do impacto desta variável no desempenho operacional do Sistema Norte, ilustrado pelas Figuras 33 e 34.

A solução ótima indicada pela rotina computacional, ou seja, aquela com volume útil de 100 m³, conduz a uma operação instável, variando de 15 a 18 acionamentos diários da bomba. Embora esteja dentro do recomendado pelo fabricante, esse comportamento indica uma baixa confiabilidade do sistema em função do reduzido volume reservado e um desgaste evitável dos equipamentos.

A segunda solução de menor custo, com volume útil de 500 m³ (Figura 34), apresenta um comportamento melhor recomendado, com acionamentos prolongados da bomba e melhor aproveitamento do volume de reservação, favorecendo a segurança hídrica do Sistema Norte. Nesta solução, o bombeamento é acionado em média 5 vezes diariamente.

Figura 33 – Dinâmica de operação do Sistema Norte – V_{útil} = 100 m³ (20%)

(fonte: elaborada pela autora)

Figura 34 – Dinâmica de operação do Sistema Norte – V_{útil} = 500 m³ (100%)

(fonte: elaborada pela autora)

Dado a relevância desta disparidade na operação de uma solução para outra e considerando a diferença mínima entre os seus custos, selecionou-se como Linha

Base a solução associada ao segundo menor custo global calculado para o Sistema Norte, embora não tenha sido aquela inicialmente indicada pelo algoritmo.

Assim sendo, a Tabela 7 sintetiza as características das soluções definidas como Linha Base Otimizada para os dois sistemas em estudo.

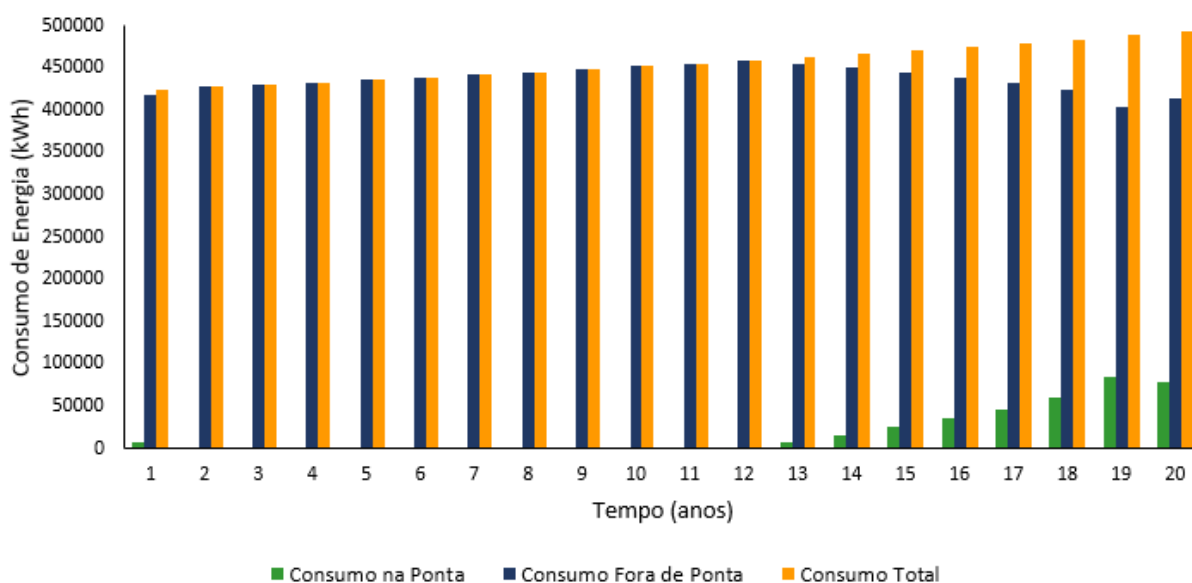
Tabela 7 – Soluções definidas como Linha Base Otimizada para os sistemas em estudo

| LINHA BASE OTIMIZADA | NORTE | NORDESTE |
|--|---|---|
| Alfa | 1,1 | 1,5 |
| Vazão de dimensionamento (m ³ /s) | 0,123 | 0,105 |
| Número de bombas em operação | 1 | 1 |
| Volume útil | 100% V _{util} = 500 m ³ | 100% V _{util} = 1.000 m ³ |
| Modalidade Tarifária | Tarifa Azul | Tarifa Verde |
| Custo Global | R\$ 3.287.020,23 | R\$ 2.768.283,11 |

(fonte: elaborada pela autora)

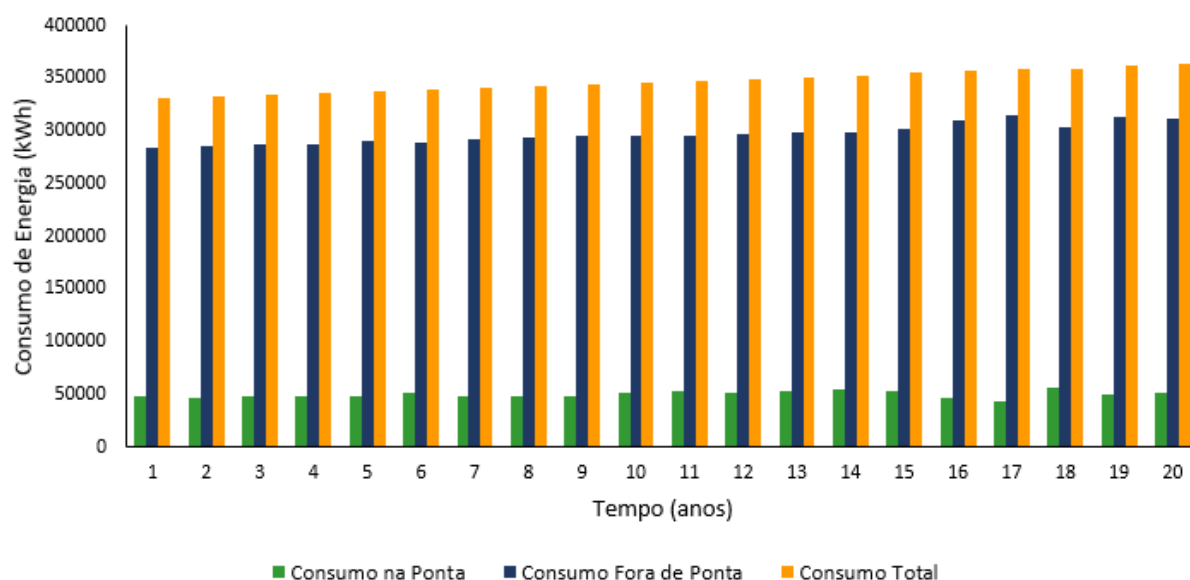
Os consumos de energia no horário de ponta, fora de ponta e total resultantes da Linha Base proposta para os Sistemas Nordeste e Nortes são exibidos nas Figuras 35 e 36, respectivamente.

Figura 35 – Consumo de energia – Linha Base Otimizada – Sistema Nordeste



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 36 – Consumo de energia – Linha Base Otimizada – Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

O consumo de energia é diretamente proporcional ao tempo de bombeamento, uma vez que seu valor é definido através da multiplicação da potência elétrica do motor pelo tempo de operação da elevatória. Assim, admite-se que os consumos de energia exibidos nas figuras anteriores nos permitem concluir também acerca dos tempos de operação do CMB.

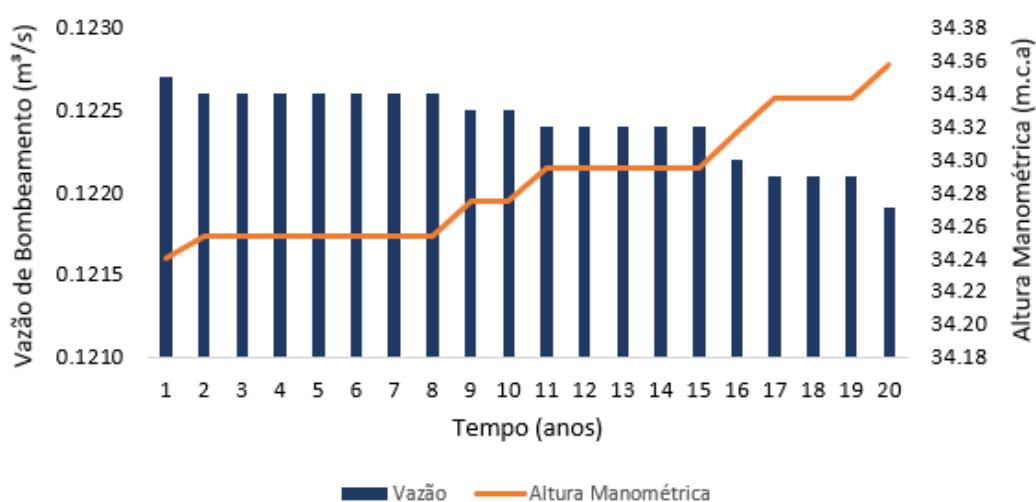
Nota-se que para nenhum dos dois Sistemas a solução otimizada consegue evitar a operação do bombeamento no horário de ponta. Enquanto no Sistema Norte, o bombeamento nesta faixa horária ocorre em todos os anos de análise, ainda que com pequena variação, no Sistema Nordeste se verifica a fuga do horário de ponta por 12 anos consecutivos (do ano 2 ao ano 12).

Isto ocorre porque, além de ocorrer o aumento dos consumos observados na curva de demanda ao longo do período analisado, anualmente o ponto de operação é ajustado em função do envelhecimento da tubulação, eventualmente gerando combinações de vazão, volume de reservatório e demanda (balanço de massa) que favoreçam operar o bombeamento fora do horário de ponta.

As variações dos pontos de operação dos sistemas estudados ao longo do tempo de análise são exibidas nas Figuras 37 e 38.

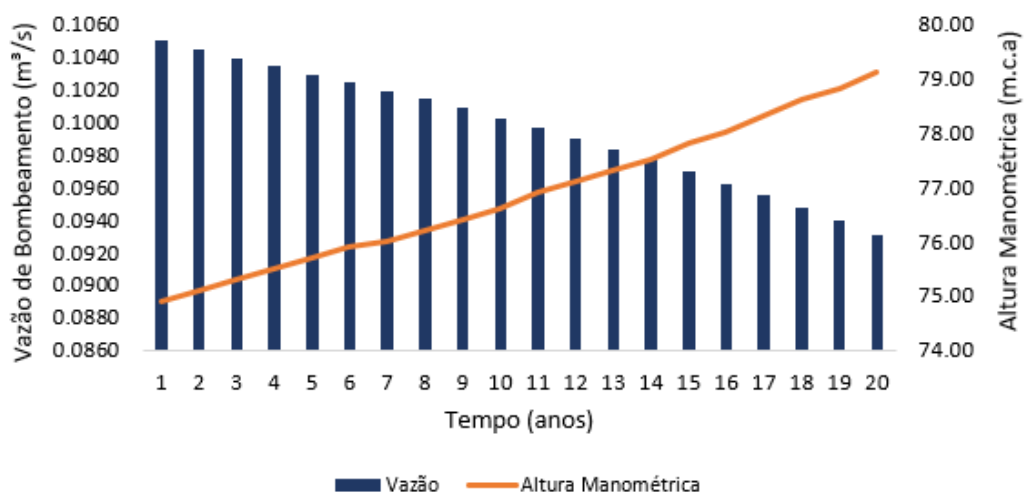
Nota-se que a altura manométrica cresce de forma mais acentuada no Sistema Nordeste do que no Sistema Norte, apresentando incremento para este sistema de 12 cm e para aquele de 4,2 m. A redução observada na vazão de bombeamento é de 0,8 l/s e 11,4 l/s para os Sistemas Norte e Nordeste, respectivamente. Tal fato está associado ao diâmetro interno e comprimento de cada adutora, uma vez que quanto menor o diâmetro e maior o comprimento, maior é a perda de carga observada no sistema e, portanto, maior é o deslocamento do ponto de operação na curva da bomba.

Figura 37 – Variação do ponto de operação no período de análise
– Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

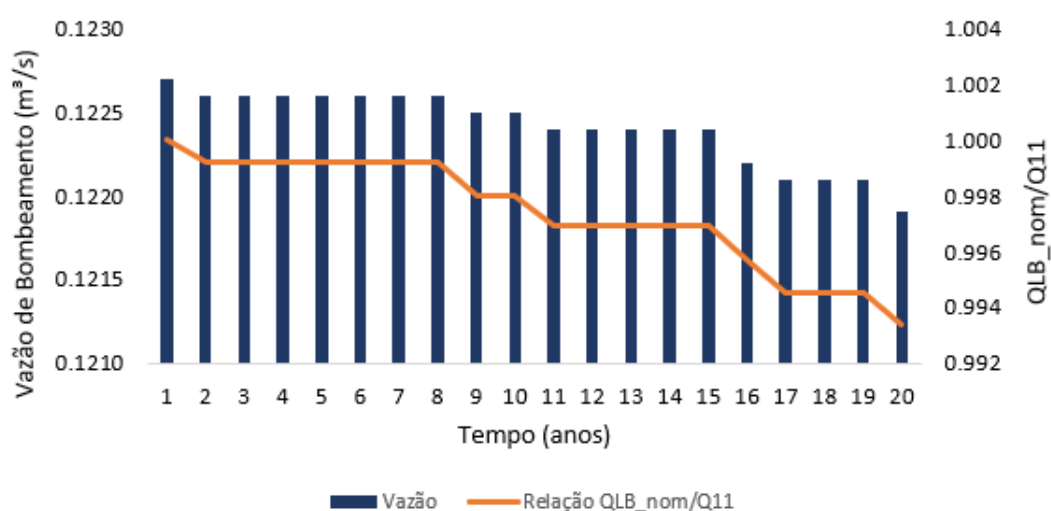
Figura 38 – Variação do ponto de operação no período de análise
– Sistema Nordeste



(fonte: elaborada pela autora)

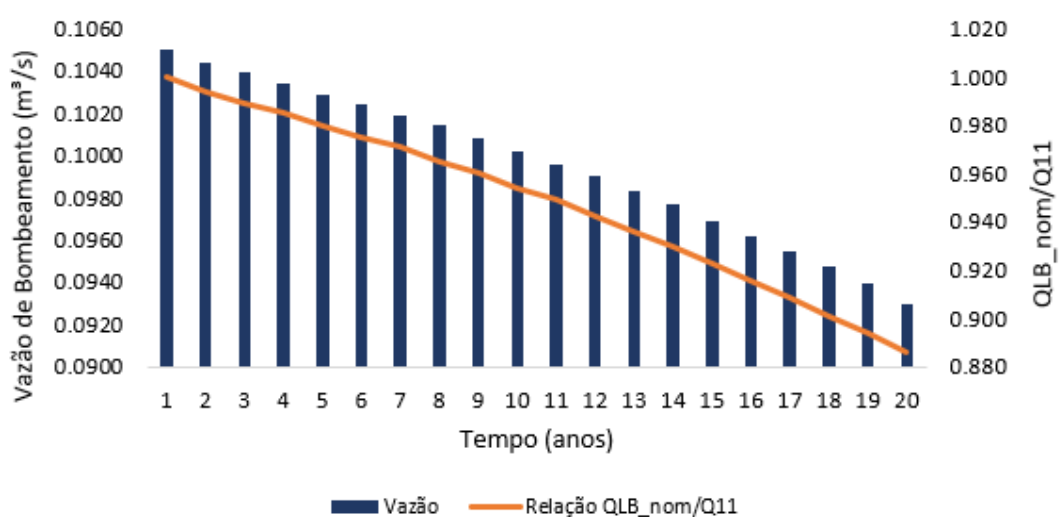
A variação da relação entre a vazão de bombeamento individual da bomba pela vazão de máximo rendimento ($Q_{LB_nom}/Q_{1,1}$) é apresentada nas Figuras 39 e 40, respectivamente. Uma vez que a vazão de bombeamento é ajustada com o decorrer do tempo em função do deslocamento da curva do sistema, a relação $Q_{LB_nom}/Q_{1,1}$ (Equação 18) também sofre variação.

Figura 39 – Variação da relação $Q_{LB_nom}/Q_{1,1}$ no decorrer do período de análise – Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 40 – Variação da relação $Q_{LB_nom}/Q_{1,1}$ no decorrer do período de análise – Sistema Nordeste



(fonte: elaborada pela autora)

Percebe-se que, para o Sistema Norte, a variação desta relação é bem sutil, decrescendo 0,66%. Para o Sistema Nordeste, esta relação tem um maior decréscimo, chegando em 12% de redução. Entretanto, ambas as soluções propostas para os sistemas estudados permaneceram acima do limite inferior (0,8) indicado na curva de confiabilidade de Barringer-Nelson (Figura 12).

A Tabela 8 apresenta de forma resumida os principais parâmetros calculados a partir das soluções tidas como Linha Base Otimizada.

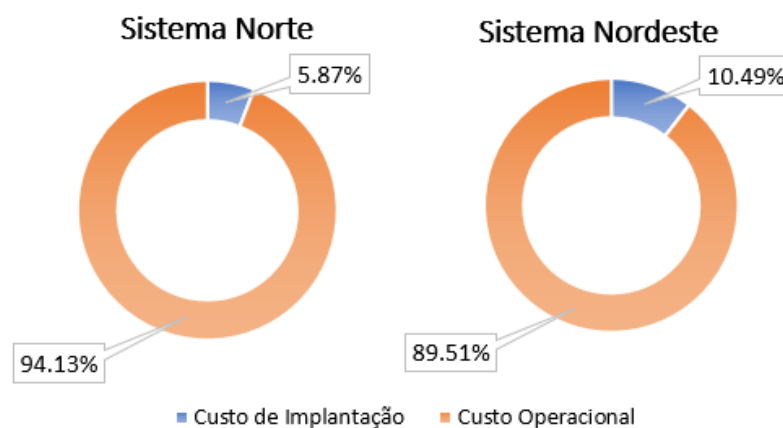
Tabela 8 – Soluções definidas como Linha Base Otimizada para os sistemas em estudo

| LINHA BASE OTIMIZADA | NORTE | NORDESTE |
|--|--------------|-----------------|
| Número de Bombas | 1 | 1 |
| Vazão de dimensionamento (m³/s) | 0,123 | 0,105 |
| Velocidade de dimensionamento (m/s) | 0,9 | 1,4 |
| Volume útil de operação (m³) | 500 | 1.000 |
| Potência do Motor (CV) | 75 | 150 |
| Rendimento da Bomba (%) | 84 | 83 |
| Tempo de Bombeamento (h/período analisado) | 132.616 | 95.068 |
| Tempo de Operação na Ponta (h/período analisado) | 19.040 | 3.823 |
| Tempo de Operação Fora Ponta (h/período analisado) | 113.576 | 91.245 |
| Volume Bombeado (m³/período analisado) | 58.439.352 | 33.998.318 |
| Consumo de Energia (kWh/período analisado) | 6.940.397 | 9.110.621 |
| Consumo de Energia na Ponta (kWh/período analisado) | 996.464 | 358.917 |
| Consumo de Energia Fora Ponta (kWh/período analisado) | 5.943.933 | 8.751.705 |
| Custo de Energia (R\$/período analisado) | 3.093.943,73 | 2.477.856,71 |
| Custo de Implantação (R\$) | 193.076,50 | 290.426,40 |
| Custo Global | 3.287.020,23 | 2.768.283,11 |

(fonte: elaborada pela autora)

A partir dos valores exibidos na Tabela 8, obtém-se as proporções dos custos de implantação e operacional em relação ao custo global obtido pela Linha Base Otimizada para cada sistema estudado (Figura 41). Observa-se, de maneira geral, que o custo de implantação possui pouca expressão frente ao custo operacional restante para o período de análise.

Figura 41 – Percentagem das parcelas constituintes do custo global obtido para ambos os sistemas



(fonte: elaborada pela autora)

A pequena representatividade do custo de implantação na composição do custo global observada para os sistemas estudados reforça a importância de realizar uma avaliação detalhada da operação ao longo do período de análise, uma vez que o custo inicial com implantação pode ser facilmente compensado com a redução no custo operacional.

5.2.3 Benefício técnico-financeiro do sistema proposto

A avaliação do desempenho técnico-financeiro das operações propostas (Linha Base Otimizada) para ambos os sistemas estudados foi realizada a partir da análise de parâmetros técnicos resultantes das simulações e indicadores de desempenho, verificando o benefício da sua operação em relação às condições de operação correntes para um mesmo período de tempo.

A Tabela 9 traz o comparativo dos parâmetros resultantes das simulações, os quais serão complementados e discutidos com maior detalhamento a seguir.

Tabela 9 – Comparativo entre operação existente e operação proposta pela Linha Base

| PARÂMETROS | NORTE | | NORDESTE | |
|--|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Oper. Existente | Linha Base | Oper. Existente | Linha Base |
| Número de Bombas | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Vazão Total Bombeada (m³/s) | 0,133 | 0,123 | 0,090 | 0,105 |
| Vazão Nominal Individual (m³/s) | 0,067 | 0,123 | 0,045 | 0,105 |
| Altura manométrica (m.c.a) | 40,7 | 34,2 | 69,3 | 74,9 |
| Velocidade (m/s) | 1,0 | 0,9 | 1,2 | 1,4 |
| Volume útil de operação (m³) | 500 | 500 | 1.000 | 1.000 |
| Potência Unitária do Motor (CV) | 60 | 75 | 150 | 150 |
| Rendimento da Bomba (%) | - | 84 | 41 | 83 |
| Tempo de Bombeamento (h/período analisado) | 115.492 | 132.616 | 111.412 | 95.068 |
| Tempo de Operação na Ponta (h/período analisado) | 18.201 | 19.040 | 16.087 | 3.823 |
| Tempo de Operação Fora Ponta (h/período analisado) | 97.291 | 113.576 | 95.325 | 91.245 |
| Volume Bombeado (m³/período analisado) | 58.396.774 | 58.439.352 | 34.108.749 | 33.998.318 |
| Consumo de Energia (kWh/período analisado) | 10.193.359 | 6.940.397 | 24.583.058 | 9.110.621 |
| Consumo de Energia na Ponta (kWh/período analisado) | 1.606.436 | 996.464 | 3.549.640 | 358.917 |
| Consumo de Energia Fora Ponta (kWh/período analisado) | 8.586.922 | 5.943.933 | 21.033.418 | 8.751.705 |
| Custo de Energia (R\$/período analisado) | 6.098.046,63 | 3.093.943,73 | 10.171.782,31 | 2.477.856,71 |
| Custo de Implantação (R\$) | - | 193.076,50 | - | 290.426,40 |
| Custo Global (R\$) | 6.098.046,63 | 3.287.020,23 | 10.171.782,31 | 2.768.283,11 |

(fonte: elaborada pela autora)

Os gráficos exibidos nas Figuras 42 e 43 apresentam o comportamento do tempo de bombeamento (ponta, fora de ponta e total) para a operação da Linha Base Otimizada e para a operação vigente no Sistema Norte e Nordeste, respectivamente.

Figura 42 – Tempo de bombeamento x Tempo – Sistema Norte

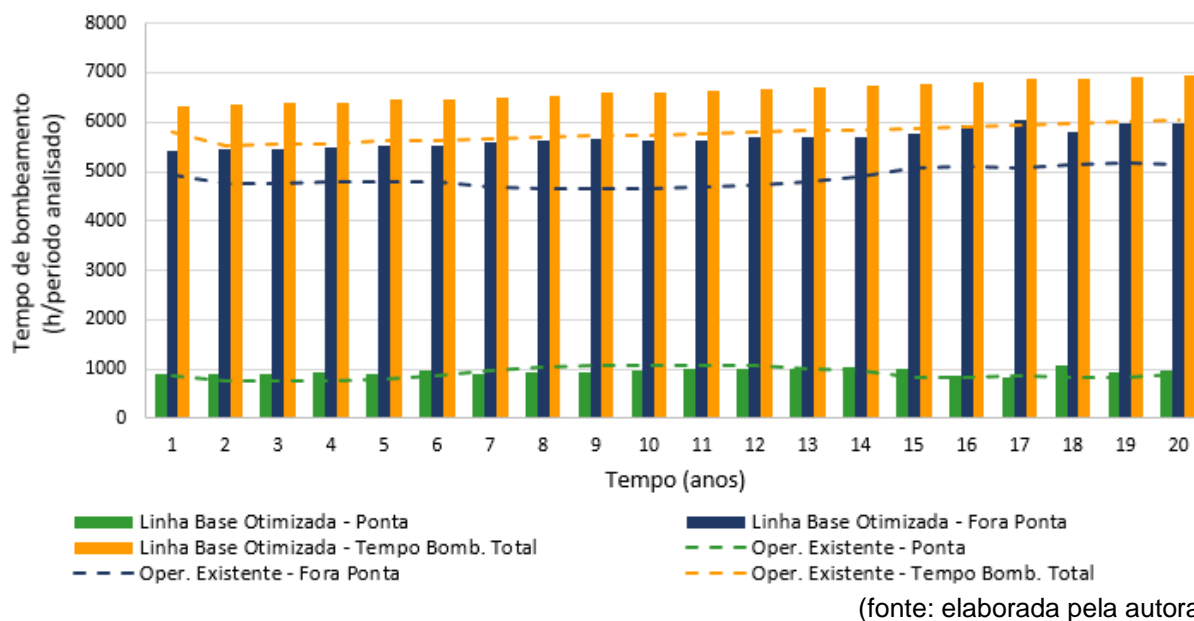
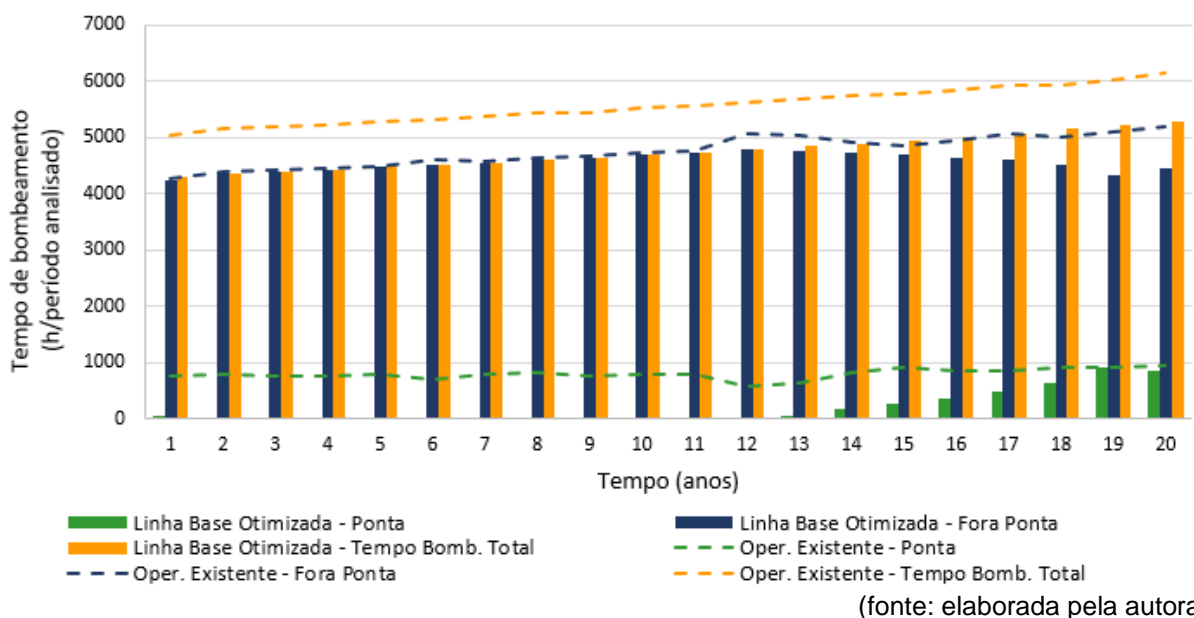


Figura 43 – Tempo de bombeamento x Tempo – Sistema Nordeste



Nota-se que a operação da Linha Base estabelecida para Sistema Norte apresenta tempo de bombeamento maior que a operação vigente, representando um aumento de cerca de 14,8%. Fato decorrente da otimização da vazão de bombeamento (Q_{LB}), que foi reduzida cerca de 7,5% em relação à condição existente.

Ademais, é possível observar que, tanto para a operação atual quanto para a Linha Base Otimizada, é necessário operar durante o período de ponta em todo o período

de análise. Este fato está relacionado à limitada capacidade de armazenamento do reservatório instalado (500 m³), que representa apenas 6,5% da demanda diária de água.

No Sistema Nordeste, a solução proposta indicou aumento da vazão de bombeamento em 14% em relação à vazão existente e, portanto, uma redução no tempo de operação total de 14,7%. A redução mais significativa é observada para o bombeamento no horário de ponta, que é evitado por 11 anos consecutivos. Para a operação vigente, o bombeamento adentra à esta faixa horária em todos os anos analisados.

As Figuras 44 e 45 apresentam a variação do consumo de energia ano a ano para os Sistemas Norte e Nordeste. Observa-se que, para ambos os sistemas estudados, o consumo de energia elétrica obtido para as soluções propostas segue o mesmo padrão da curva do tempo de bombeamento, de acordo com a faixa horária considerada, sendo observada redução nesse parâmetro para ambos os casos.

Destaca-se que, embora o Sistema Norte tenha resultado em tempos de operação da Linha Base maiores que aqueles obtidos para as condições operacionais existentes, ainda assim se nota queda no consumo de energia elétrica tanto para o horário de ponta quanto fora ponta, totalizando 31,9% de redução.

No Sistema Nordeste, o destaque é o não acionamento do sistema no horário de ponta, o que levou a uma redução expressiva no seu custo operacional, resultando em uma economia de 75,6%.

Outros aspectos importantes e que foram determinantes para a redução dos consumos de energia foi a diminuição no número de conjuntos motobombas operativos e da potência elétrica associada à sua operação.

Figura 44 – Consumo de energia x Tempo – Sistema Norte

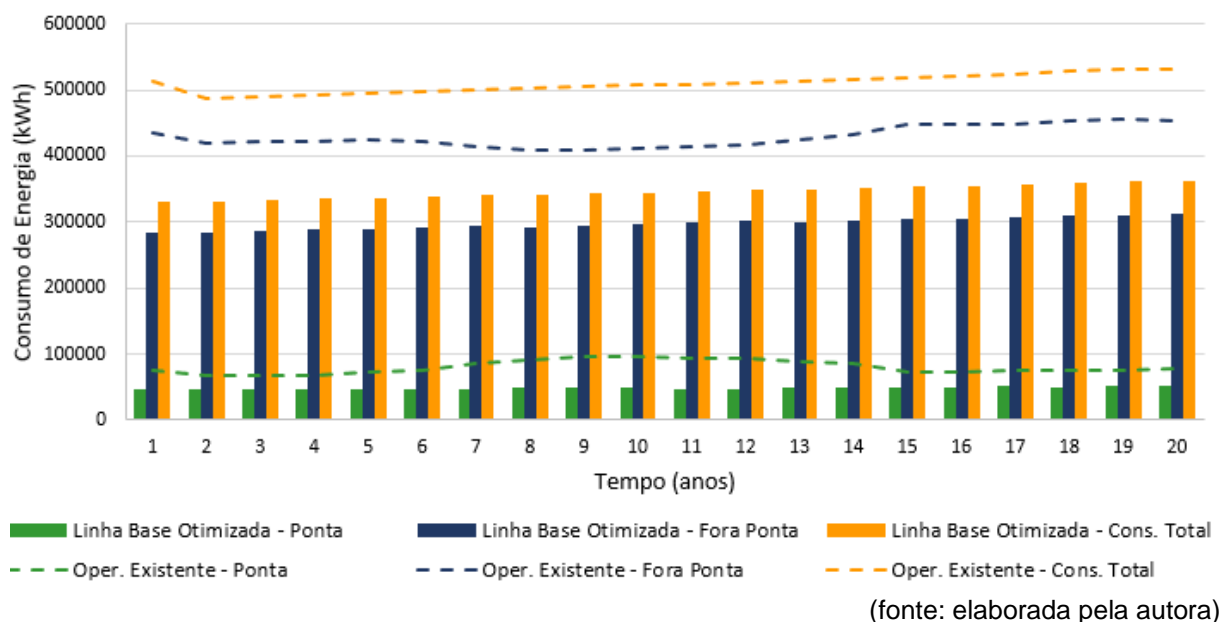
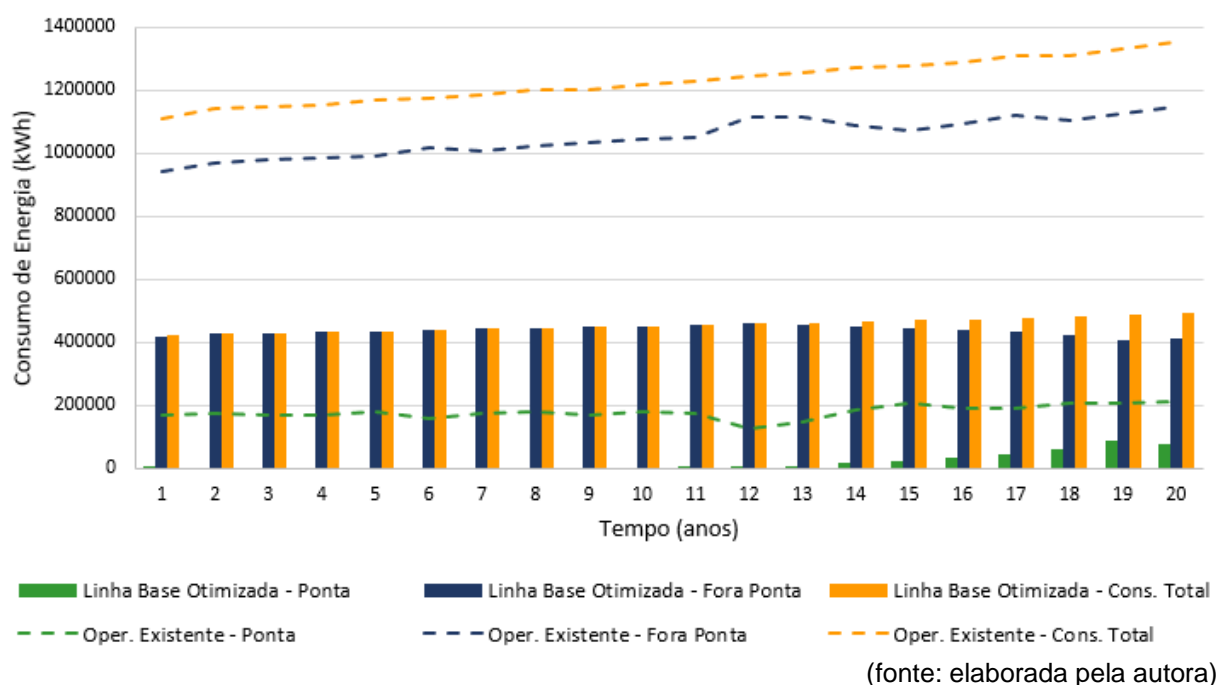
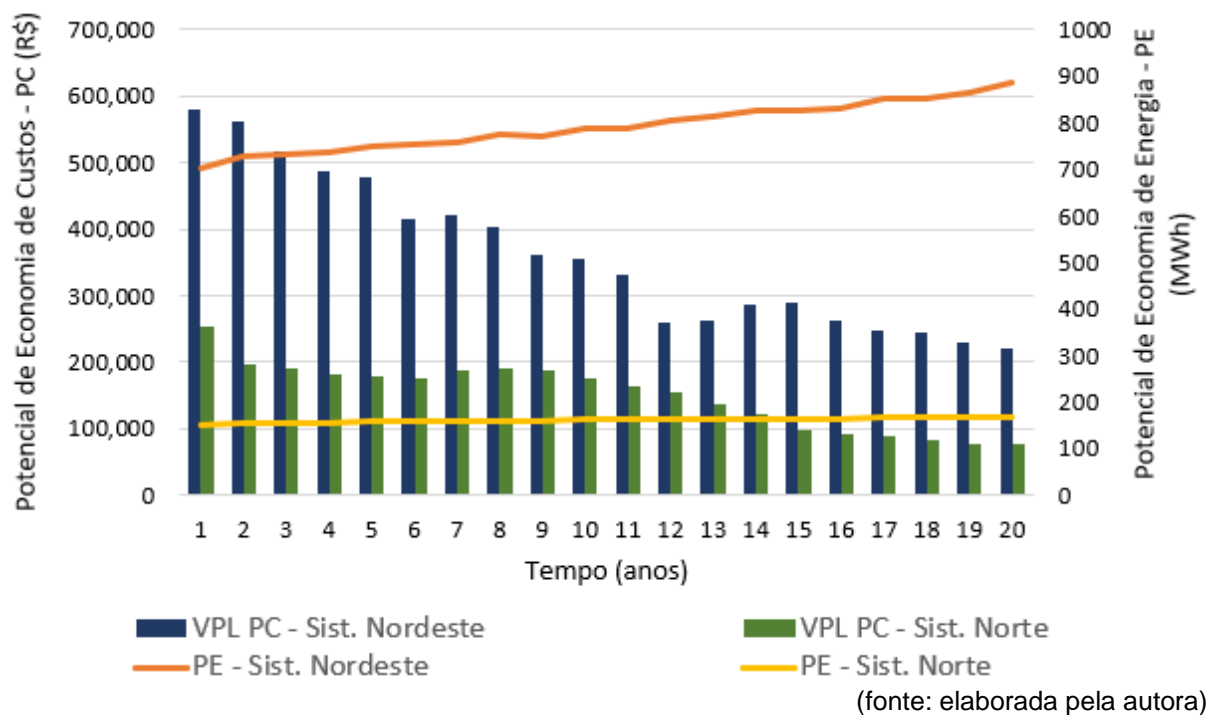


Figura 45 – Consumo de energia x Tempo – Sistema Nordeste



Dois são os potenciais de economia utilizados para avaliação dos sistemas em estudo: o de custos e o de energia. Ambos são apresentados na Figura 46.

Figura 46 – Potencial de Economia de Custos (PC) e Potencial de Economia de Energia (PE) – Sistema Nordeste e Norte

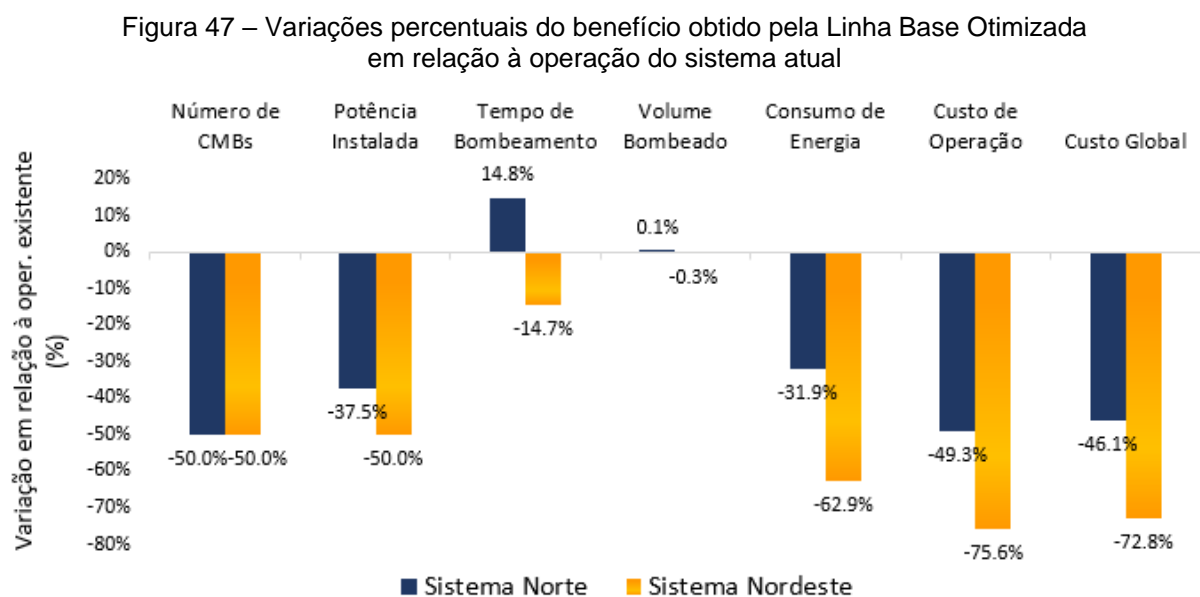


Avaliando o potencial de economia de custos (PC), verifica-se que o Sistema Nordeste apresenta um grande benefício econômico, uma vez que o montante economizado com a operação proposta representa cerca de 75,6% do custo resultante para as condições operacionais correntes.

Para este sistema, verifica-se também o acentuado crescimento do indicador PE ao longo do período de análise. Tendo em vista que este indicador representa a diferença entre os consumos de energia observados nas duas operações simuladas (operação vigente e operação proposta pela LBO), atribui-se este comportamento ao incremento significativo do consumo de energia neste mesmo período, o que pode ser observado na Figura 45.

Para o Sistema Norte, o valor percentual de PC é menor do que no Sistema Nordeste, contudo, ainda assim, surge bem expressivo, ficando em torno de 49,3% de economia na operação. Em relação ao indicador PE, este se desenvolve com pouca amplitude de variação ao longo dos anos, em concordância ao evidenciado pelas curvas de consumo de energia exibidas na Figura 44.

A Figura 47 sintetiza os benefícios obtidos, através da sua variação percentual em relação aos resultados obtidos para a operação vigente dos sistemas em estudo, nos principais parâmetros operacionais calculados.



(fonte: elaborada pela autora)

De acordo com o panorama geral fornecido pela Figura 47, destaca-se o aumento de horas de operação do Sistema Norte proposto em relação ao sistema existente, causado pela redução da vazão de bombeamento, conforme Figura 39. Ainda assim, verifica-se a diminuição do consumo de energia (31,9%) e custo operacional (49,3%), considerando o ajuste da modalidade tarifária contratada da horo-sazonal verde para a horo-sazonal azul.

Para o Sistema Nordeste, observa-se a redução em todos os parâmetros exibidos, com destaque para a expressiva diminuição do consumo de energia (62,9%) e, conseqüentemente, dos custos operacional e global. Salienta-se que, neste caso, não foi necessário o ajuste da modalidade tarifária contratada, recomendando-se a permanência na modalidade horo-sazonal verde.

Em ambos os sistemas estudados, foi possível reduzir o número de CMBs operativos e promover o uso mais eficiente destes equipamentos. Assim, houve redução na potência instalada da elevatória, causando redução da demanda contratada junto à concessionária de energia e, portanto, do custo global associado à Linha Base Otimizada.

Em complemento as análises dos parâmetros operacionais, foram calculados os indicadores hidroenergéticos dos sistemas analisados, apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Indicadores de desempenho calculados para os sistemas estudados

| INDICADORES | NORTE | | NORDESTE | |
|--|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | Operação Existente | Linha Base Otimizada | Operação Existente | Linha Base Otimizada |
| Consumo Específico – CE (kWh/m ³) | 0,17 | 0,12 | 0,72 | 0,27 |
| Consumo Específico Normalizado – CEN (kWh/(m ³ .100m)) | 0,45 | 0,35 | 1,00 | 0,35 |
| Consumo Diário de Energia Elétrica – CDE (kWh/dia) | 1.396 | 951 | 3.368 | 1.248 |
| Custo Médio de Energia Elétrica – CME (R\$/kWh) | 1,03 | 0,77 | 0,72 | 0,50 |
| Custo por Volume Bombeado – CVB (R\$/m ³) | 0,18 | 0,09 | 0,52 | 0,14 |
| Payback Simplificado do Investimento (meses) | - | 10 | - | 6 |

(fonte: elaborada pela autora)

Em ambos os sistemas, o Consumo Específico – CE calculado para a operação proposta (Linha Base Otimizada) sofreu uma melhora, indicando um menor consumo de energia por volume bombeado. Como referência para a avaliação do Consumo Específico, adotou-se o valor 0,37 kWh/m³, indicado pelo *United Nations World Water Assessment Programme* (CONNOR *et al.*, 2014) para captações superficiais. Assim sendo, verifica-se que o Sistema Norte, mesmo em sua operação corrente, já apresentava valor dentro deste limite de referência. Entretanto, o destaque na avaliação do CE fica a cargo do Sistema Nordeste, que melhorou em 62,5% este indicador, passando a permanecer dentro do limite recomendado.

Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos (2020) apresenta faixas de referência para classificação do indicador CEN em bom (0,27 – 0,40 kWh/(m³.100)), mediano (0,40 – 0,54 kWh/(m³.100)) ou insatisfatório (0,54 – 5,00 kWh/(m³.100)). Assim, observa-se uma expressiva melhora deste indicador na solução proposta, deixando de ser classificados como mediano (Sistema Norte) e insatisfatório (Sistema Nordeste), para serem classificados como bom.

Os indicadores de custo (CME e CVB) são influenciados diretamente pela minimização do consumo de energia elétrica observada através do indicador CDE.

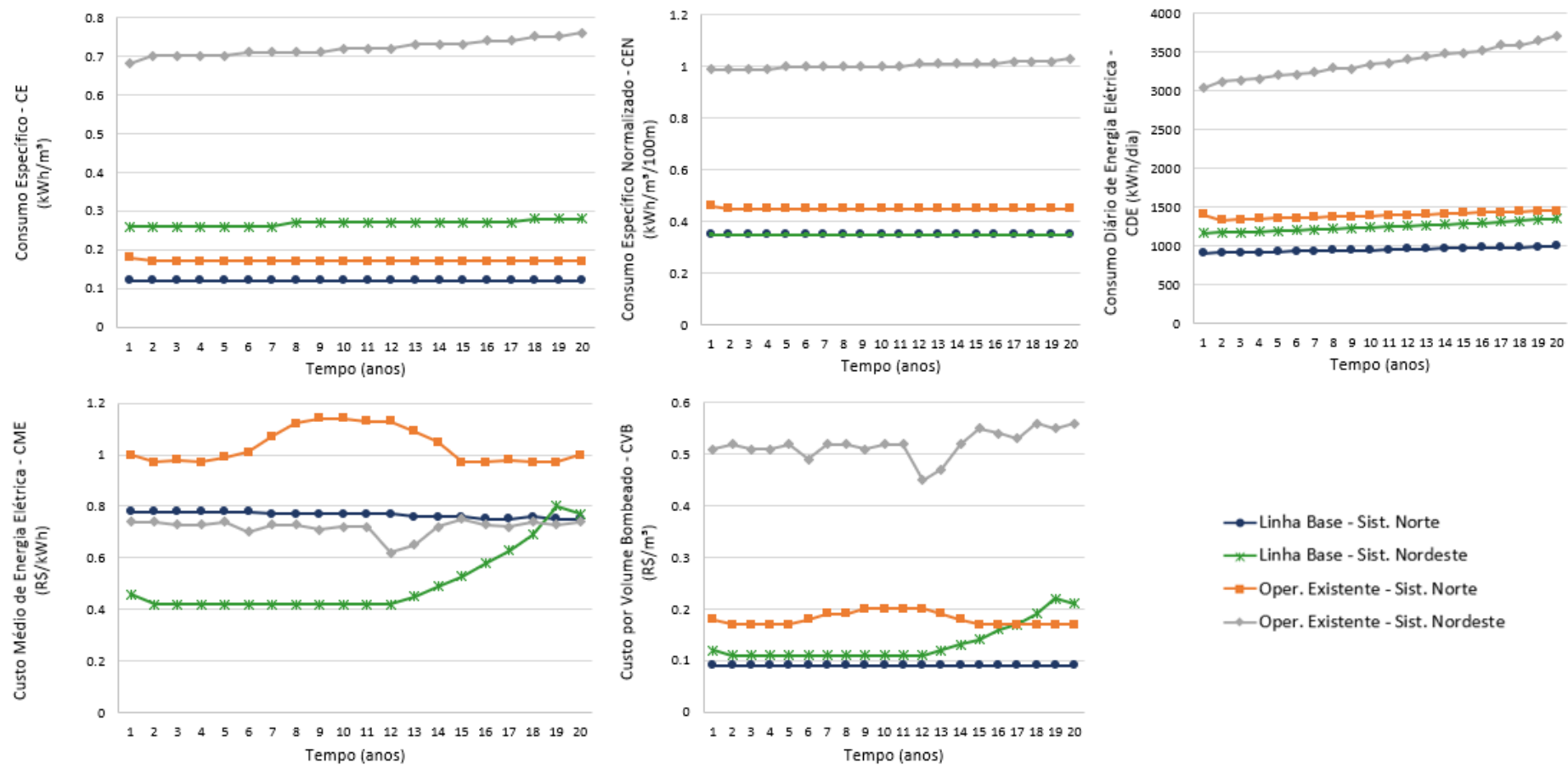
Assim, observa-se uma melhora nesses indicadores, confirmando o aumento da eficiência obtida pela Linha Base para ambos os sistemas.

A Figura 48 apresenta o comportamento desses indicadores de desempenho ao longo dos 20 anos analisados.

Percebe-se a volatilidade dos indicadores de custo (CME e CVB) em relação ao tempo de bombeamento no período de ponta. Nos anos em que é necessário adentrar por mais tempo nesta faixa horária, observa-se um incremento nesses indicadores, enquanto que nos anos em que a operação na ponta tem seu tempo reduzido, os valores obtidos são menores.

Assim, destaca-se o acentuado crescimento de CME e CVB a partir do ano 13 de análise da operação de Linha Base Otimizada, quando foi necessário retomar o bombeamento na ponta no Sistema Nordeste.

Figura 48 – Comportamento dos indicadores de desempenho ao longo do período de análise – Sistema Nordeste e Norte



(fonte: elaborada pela autora)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo principal propor uma metodologia para análise da eficiência energética em sistemas de bombeamento de água através da definição de uma Linha Base Otimizada, fornecendo dados e informações para realizar o pré-diagnóstico hidroenergético e subsidiar a tomada de decisão quanto às ações de melhoria que culminam em uma maior efficientização da operação e, conseqüentemente, redução de custo.

A partir da construção de uma rotina computacional baseada em algoritmo de busca exaustiva para otimização de mínimos, cuja modelagem matemática se sustenta na aplicação da metodologia para definição de Linha Base Otimizada, foi possível investigar os aspectos que estiveram mais estreitamente correlacionados com a otimização do custo global associado às da regra de operação. Para isso, foram variadas algumas características dos sistemas adotados como estudo de caso, tais como número de bombas operativas associadas em paralelo, volume útil do reservatório e vazão de bombeamento através de um multiplicador α (alfa), além de calculados indicadores de desempenho para avaliar a eficiência da solução otimizada, bem como da operação corrente de cada sistema.

A rotina computacional evidenciou que, de maneira geral, para a faixa de vazão estudada, o bombeamento a partir de um conjunto motobomba é mais vantajoso, independente da modalidade tarifária adotada. Este fato conduziu à redução do número de conjuntos motobombas operativos em 50% para ambos os estudos de casos apresentados.

Em termos de vazão, ambos os sistemas resultaram em soluções com alfas (α) maiores que 1 e, conseqüentemente, em vazões otimizadas superiores às vazões de pico. Para o Sistema Norte, a vazão de dimensionamento foi 10% superior à esta vazão, enquanto que para o Sistema Nordeste este incremento foi de 50%.

No que tange às estratégias para redução do custo operacional, deve-se ter em mente a forte correlação entre o volume útil de reserva disponível e o formato da curva de demanda, para favorecer a operação em períodos alternativos ao de ponta de energia. Neste sentido, a modelagem matemática de ambos os sistemas não conseguiu indicar uma solução que evitasse a operação na faixa de maior demanda de energia, conseqüentemente, mais onerosa.

O Sistema Norte, teve a vazão de bombeamento reduzida em relação à operação corrente, conduzindo ao aumento do tempo de operação em 14,8% em relação ao observado na operação vigente. Por outro lado, no Sistema Nordeste foi possível evitar o bombeamento no horário de ponta por 11 anos consecutivos do período analisado, além de ter o tempo de operação total reduzido devido ao aumento de 14% na vazão de bombeamento.

O enquadramento tarifário dos sistemas foi fortemente influenciado pelo consumo de energia na ponta e pela potência instalada das soluções propostas, resultando na recomendação de migração do Sistema Norte para a modalidade horo-sazonal azul, uma vez que a variação do volume útil não teve grande sensibilidade na redução do bombeamento na ponta para este sistema. O mesmo não ocorreu para o Sistema Nordeste, que deve permanecer na modalidade horo-sazonal verde, já que sua operação adentra no horário de ponta por menos tempo, além de necessitar de uma maior potência instalada, refletindo em maior demanda contratada junto à concessionária de energia.

Outro destaque importante a se fazer é a redução no consumo de energia, verificada a partir da melhora significativa dos indicadores CE, CEN e CDE, indicando ganhos econômicos e ambientais. Os indicadores de custos (CME e CVB) também evidenciaram um grande benefício financeiro associado à adoção das características de operação e intervenções recomendadas pela LBO, calculado em 46,1% para o Sistema Norte e 72,8% para o Sistema Nordeste.

De maneira geral, os resultados obtidos permitiram identificar a faixa de operação na qual a bomba funciona com maior confiabilidade e menor desgaste, estendendo a vida útil do equipamento, além de resultar em menores custos operacionais. Ambos os

sistemas estudados permaneceram dentro da faixa de confiabilidade recomendada em todo o período de análise.

Observa-se que a ferramenta desenvolvida em momento algum visou substituir o olhar crítico do profissional, que deve avaliar se, dentre as soluções com variação de custos mínima em relação à solução ótima, existe alguma com aspectos operacionais mais desejáveis, a ponto de ser recomendável adotá-la como LBO. Essa necessidade foi observada no Sistema Norte, tendo sido adotada como LBO a solução com segundo menor custo global (variação de 0,2% da solução de menor custo calculado), por apresentar maior segurança e flexibilidade operacional.

Por fim, conclui-se que a metodologia proposta foi capaz de estabelecer a Linha Base Otimizada (LBO) e delinear características operacionais desejáveis a sistemas elevatórios mais eficientes do ponto de vista hidroenergético, conduzindo a grandes reduções no consumo de energia e necessidade de menor aporte financeiro para sua operação. Ademais, é de simples aplicação e apresenta grande potencial de contribuição para o sistema de gestão financeiro e ambiental de companhias de saneamento e dos municípios por elas geridos.

Tendo em vista as considerações ora apresentadas, pode-se concluir que a metodologia desenvolvida atendeu os objetivos desta pesquisa. Contudo, ainda há muito a ser estudado e explorado dentro de um tema tão importante para os dias atuais, como é a eficiência de sistemas. Portanto, para futuros trabalhos, sugere-se:

- a) estudar a possibilidade de ampliação do volume útil de reservação testado, estendendo o estudo à uma maior gama de iterações e, conseqüentemente, à soluções ótimas em potencial;
- b) avaliar a aplicação da metodologia para estações de recalque de porte distinto, por exemplo, sistemas de recalque prediais;
- c) verificar o benefício técnico-financeiro em trabalhar com um sistema de recalque modulado, ou seja, com a introdução de novas bombas em paralelo de acordo com o aumento da demanda;
- d) avaliar a influência da posição do pico de demanda nos resultados;
- e) avaliar o desempenho da metodologia proposta quando se considera a redução da demanda, caso que poderia ocorrer quando colocado em prática um plano de ações de redução de perdas, por exemplo;

- f) adaptar a metodologia elaborada por esta pesquisa para aplicação a dimensionamento de projetos econômicos, através da implementação de outras variáveis que, para diagnósticos são consideradas fixas, mas poderiam ser otimizadas quando se trata de um sistema em fase de projeto. Por exemplo: diâmetro da tubulação e volume de reservação.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 12.214**: Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. **NBR 12.217**: Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR ISO 50006**: Sistemas de gestão de energia – medição do desempenho energético utilizando linhas de base energética (LBE) e indicadores de desempenho energético (IDE) – princípios gerais e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 12.215-1**: Projeto de adutora de água. Parte 1: Conduto forçado. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

_____. **NBR 12.218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, L. M.; PARENA, R. **Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água**. Tradução: Patrícia Duarte, Helena Alegre, Jaime Melo Baptista. Lisboa: LNEC/IRAR/IWA, 2004. Versão portuguesa de Performance Indicators for Water Supply Services. Série Guia Técnicos 1.

ANEEL. **Fique por Dentro da Conta de Luz da Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Aneel, 2007.

_____. **Tarifa branca é nova opção para os consumidores a partir de 2018**. Brasília, DF: Aneel, 2019. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/saladeimprensaexibicao//asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/tarifa-branca-e-nova-opcaoparaosconsumidoresapartirde2018/656877?inheritRedirect=false. Acesso em: 3 fev. 2019.

_____. **Bandeiras tarifárias**. Brasília, DF: Aneel, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 15 jul. 2021.

AZEVEDO NETTO, J. M. de; NETTO, M. F. y F. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

BARRINGER, P. **Pump Practices & Life**. Humble, TX, USA: Barringer & Associates, Inc., 2004. Disponível em: http://www.barringer1.com/oct97prb_files/Pump%20Practices%20&%20Life.pdf. Acesso em: 9 fev. 2019.

BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água**: tecnologias de controle. 1 ed. João Pessoa: Editora da UFPB., 2013.

BID. **Avaliação de Sistemas de Bombeamento de Água**: manual de eficiência energética. 1. ed. Washington: BID, 2011.

BLOCH, H. P. **Pump Wisdom**: problem solving for operators and specialists. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.

BOLOGNESI, A.; BRAGALLIA, C.; LENZIB, C.; ARTINA, S. Energy efficiency optimization in water distribution systems. **Procedia Engineering**, n. 70, p. 181-190, 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Boas Práticas no Abastecimento de Água: procedimentos para minimização de riscos à saúde. Brasília, DF: MS, 2006a

_____. Ministério da Saúde. **Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano**. Brasília, DF: MS, 2006b. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/vigilancia_controle_qualidade_agua.pdf. Acesso em: 11 ago. 2021.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética**: Premissas e Diretrizes Básicas. Brasília, DF: MME, 2012.

_____. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 4. ed. Brasília, DF: Funasa, 2015.

_____. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **21. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**: 2015. Brasília, DF: MCID, 2017b.

_____. Ministério de Minas e Energia; Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações de Comunicações; Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviço. **Portaria Interministerial n. 1** de 29 de junho de 2017. [Aprovar o Programa de Metas para Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo]. Brasília, DF: MME, 2017a.

_____. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Ações de Assistência Técnica em Redução e Controle de Perdas de Água e Uso Eficiente de Energia Elétrica**. Brasília, DF: MCID, 2018.

_____. Ministério da Saúde. **ÁguaBrasil**: Sistema de Avaliação da Qualidade de Água, Saúde e Saneamento. Brasília, DF: MS, 2019a. Disponível em: <https://www.aguabrasil.icict.fiocruz.br/index.php?pag=sane>. Acesso em: 14 mar 2019.

_____. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **23. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**: 2017. Brasília, DF: MCID, 2019b.

_____. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **25. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**: 2019. Brasília, DF: MCID, 2020a.

_____. Presidência da República. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Brasília, DF: Presidência da República, 2020b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 17 set. 2021.

_____. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888**, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: MS, 2021.

CEEE. Tarifas e Custos. Porto Alegre: CEEE, 2021. Disponível em: <https://www.ceee.com.br/a-ceee/tarifas-e-custos>¹. Acesso em: 17 jan. 2021

CONNOR, R.; FRIDLEIFSSON, I. B.; WEBBER, M.; WINPENNY, J. Energy's thirst for water. *In*: UNITED NATIONS. **The United Nations World Water Developmen Report 2014**. Paris: United Nations World Water Assessment Programme, 2014. v. 1. Chapter 3. p. 28-43.

COSTA, G. J. C. **Iluminação econômica**: cálculo e avaliação. Porto Alegre: Edipucrs, 1998.

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

ELETOBRAS. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. Procel Sanear: Eficiência Energética no Saneamento Ambiental. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2016. Não paginado. Disponível em: <https://www.eletrobras.com/pci/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMID6D82CF76DD284E7B8A607F31CB419A79PTBRIE.htm>. Acesso em: 28 jan. 2019.

¹ Ao acessar este *link* é necessário, inicialmente, selecionar a opção "CEEE GERAÇÃO E CEEE TRANSMISSÃO" que dá acesso a página com título "Tarifas e Custos": os dados de PIS/COFINS são encontrados na última tabela desta página.

_____. Procel. **Manual de Tarifação da Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2011.

ENTIDADE REGULADORA DOS SERVIÇOS DE ÁGUA E RESÍDUOS. **Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (2020)**: caracterização do setor de águas e resíduos. Lisboa: ERSAR, 2020. v. 1 Disponível em: <https://www.ersar.pt/pt/site-publicacoes/Paginas/edicoes-anuais-do-RASARP.aspx>. Acesso em: 24 ago. 2021.

EQUATORIAL ENERGIA. Valores de Tarifas e Serviços. Belém: Equatorial Energia, 2021. Disponível em: <https://pa.equatorialenergia.com.br/informacoes-gerais/valor-de-tarifas-e-servicos/#tarifas-grupo-a²>. Acesso em: 18 ago. 2021.

ENERGISA. Tudo que o que precisa da Energisa ao alcance de um clique. Belo Horizonte: Energisa, 2021. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/empresa/Paginas/pequenas-e-medias-empresas/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx³>. Acesso em: 18 ago. 2021.

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

GOMES, H. P. Dimensionamento Econômico de Instalações de Recalque. Engenharia Sanitária e Ambiental, São Paulo, v. 6, n.3, jul./set. 2001; n. 4, out./dez. 2001. Nota Técnica.

_____. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento**. 2 ed. rev. e ampl. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009a.

_____. **Sistemas de abastecimento de água**: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias. 3. ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009b.

_____. **Avaliação Econômica Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2014.

² Ao acessar este *link*, chega-se à página intitulada “Valores de Tarifas e Serviços”. Para acessar os dados de tarifas do Grupo A, é necessário selecionar a opção “Grupo A” na coluna “Tarifas”. Os dados de tarifas utilizadas, seja para a modalidade tarifária verde ou azul, são referentes ao subgrupo A4 (2,3 a 25 kV).

³ Ao acessar este *link*, chega-se à página intitulada “Tudo que o que precisa da Energisa ao alcance de um clique”. Deve-se, inicialmente, selecionar “PB”, no campo UF, e “Joao Pessoa” no campo Cidade. A página intitulada “Tipos de Tarifas” é aberta. Os dados utilizados estão contidos nas Tabelas “Modalidade Tarifária Horária Azul” e “Modalidade tarifária Horária Verde” para o subgrupo A4 (13,8 kV).

GOMES, H. P.; BEZERRA, S. de T. M. Ações de Eficiência Energética. *In*: GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. de. (org). **Manual de Sistemas de Bombeamento**: eficiência energética. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2012. p. 129-140.

GOMES, H. P.; BEZERRA, S. de T. M.; CAMBOIM, W. L. L.; CARNEIRO, G. B. Otimização Operacional dos Sistemas Adutores Pears e Jucazinho, Pernambuco, Brasil. *In*: GOMES, H. P. (org.) **Sistemas de Abastecimento**: eficiência energética. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2010. p. 29-36.

HAGUIUDA, C. Avaliação da Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento de Água da Sabesp. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 30, Natal, 2019. **Anais [...]** São Paulo: AESabesp, 2019. Artigo 104. p. 1-6.

HOFFMAN, A. R. The Connection: Water and Energy Security. **Energy Security**, USA, 13 Aug. 2012. Disponível em: <http://www.iags.org/n0813043.htm>. Acesso em: 20 SET 2020.

IBGE. **Projeção da população do Brasil e das unidades da Federação**. Rio de Janeiro: IBGE, 10 fev. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 10 fev. 2019.

JAMES, K.; CAMPBELL, S. L.; GODLOVE, C. E. **Watergy**: taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems. Washington: The Alliance to Save Energy, 2002.

KSB. **Manual de Operação e Montagem Meganorm**. Wein: KSB, 2013.

KURITZA, J. C. **Metodologia para avaliação da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água com velocidade de rotação variável**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

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**, Porto Alegre, v. 22, e45, 2017.

LOPES, R. M. **Metodologia para otimização da regra de operação e avaliação do custo do ciclo de vida de sistemas de bombeamento de água**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MAGNIN, G.; BAHIA, S. R.; CAVALHAES, P. de T.; REIS, L. A. A.; DAVIS, R. da S. **Gestão Energética Municipal**. 2 ed., rev. e atual. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2004.

MONTEIRO, J. R. do R. **Plano Nacional de Saneamento – Planasa**: análise e desempenho. [S. l.: s. n.], 1993. Vs2 - PNS93-04.DOC.

MOREIRA, H. A. M. **Controle Neuro-Fuzzy para eficiência energética de sistemas de abastecimento de água com demanda variável**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

MUÑOZ, H. B.; PALADINES, J. S. Gestión para la eficiencia hidráulica y energética en sistemas de distribución de agua. *In*: GOMES, H. P. (org.). **Abastecimento de água: o estado da arte e técnicas avançadas**. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2007. p. 179-197.

SALVINO, L R. **Eficiência energética em sistemas pressurizados de distribuição de água com o uso de redes neurais artificiais**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

SANTOS, S. L. **Bombas e Instalações Hidráulicas**. São Paulo: LTC, 2007.

SCHMIDLIN JUNIOR, C. R. **Operação do conjunto bomba centrífuga, motor de indução trifásico e conversor de frequência visando a eficiência no uso da energia elétrica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

TELES, M. L.; GOMES, H. M. Comparação de algoritmos genéticos e programação quadrática sequencial para otimização de problemas em engenharia. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, n.15, p. 29-39, abr., 2010.

TONIAL, F. de C. **Eficiência energética de estações de bombeamento: estudo de caso do Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

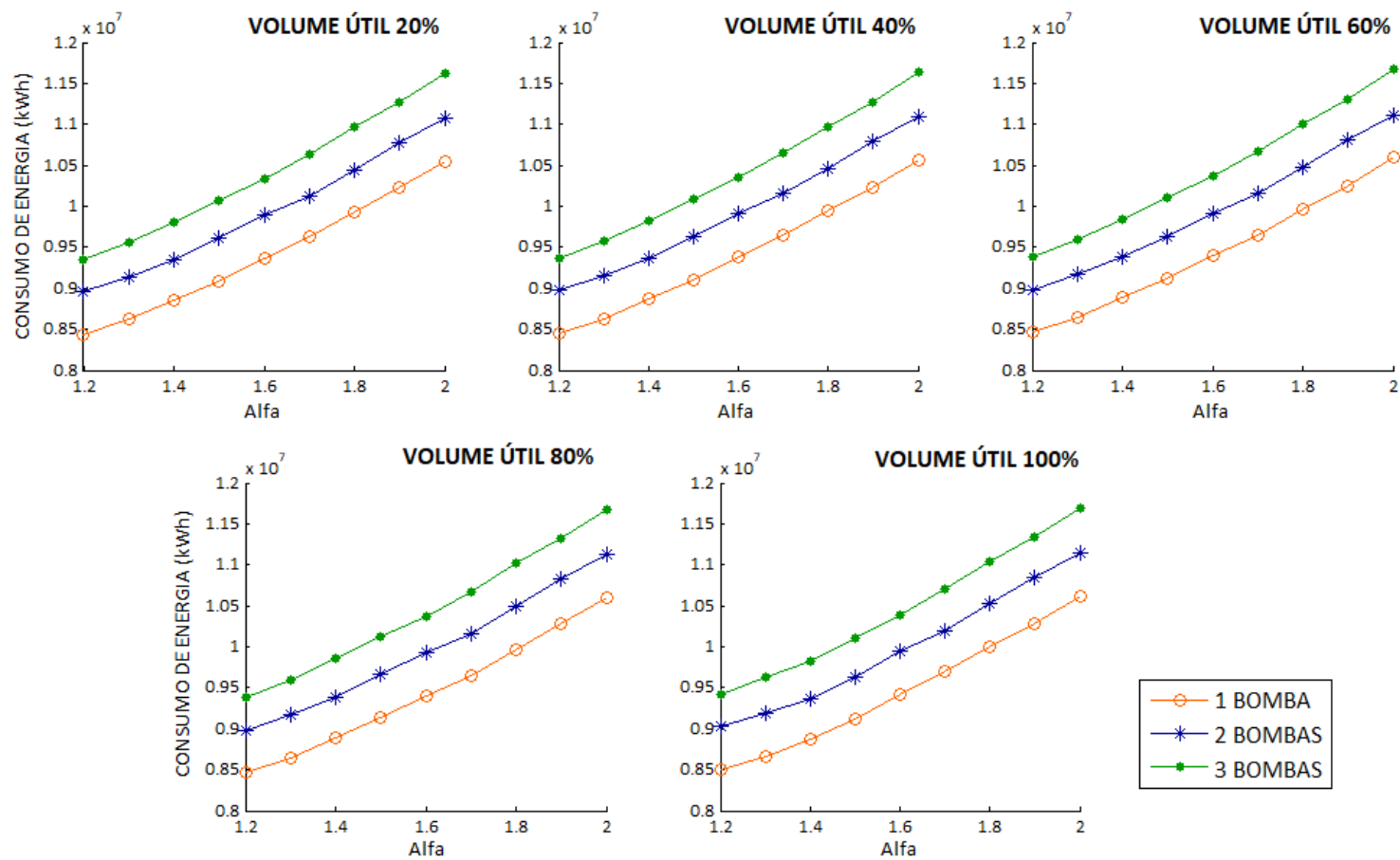
TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3 ed. São Paulo: EESC-USP, 2006.

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**. 2012, Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

WU, Z. Y.; SIMPSON, A. R. Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution system. **Journal of Computing in Civil Engineering**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 89-101, 2001.

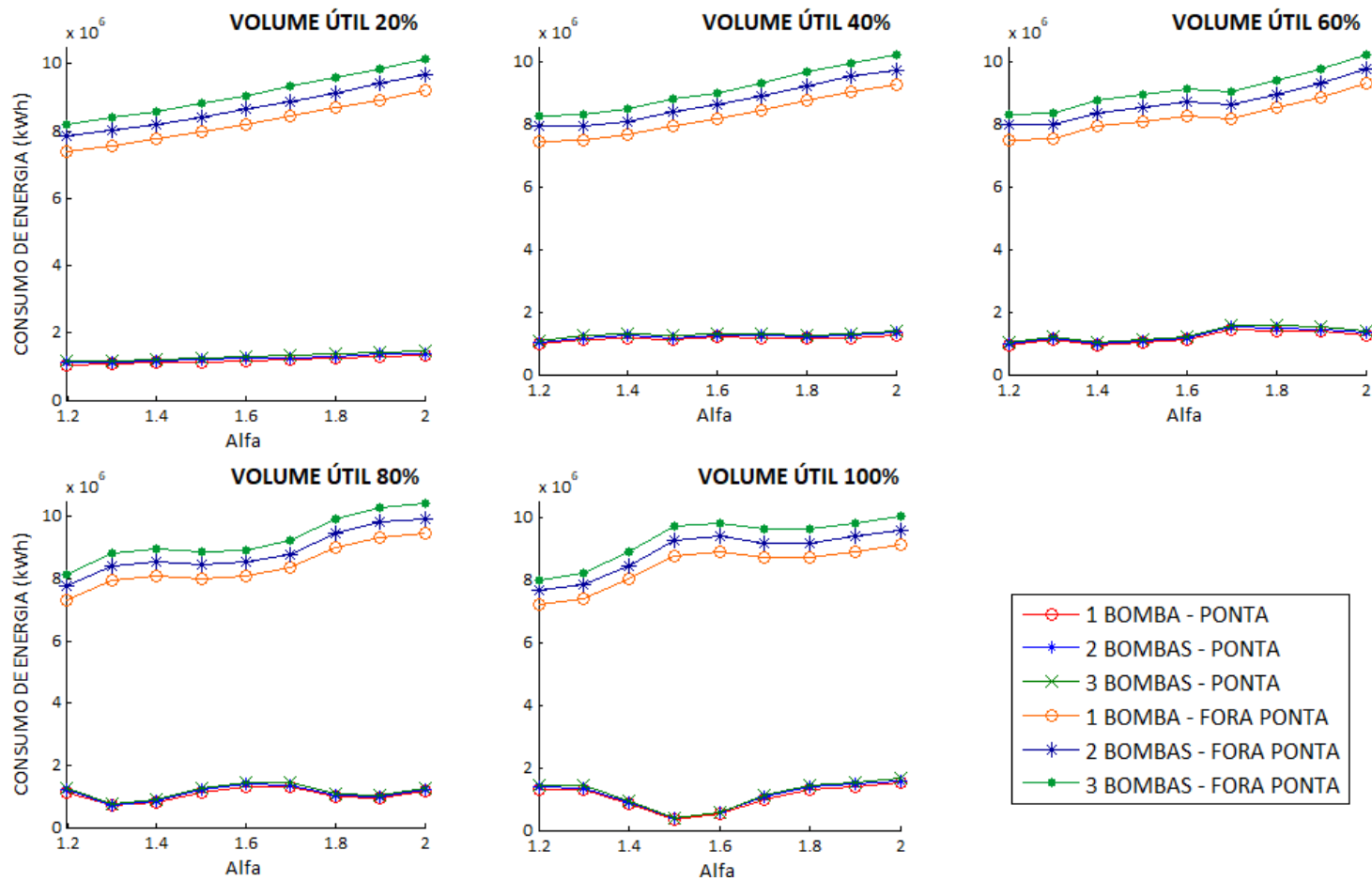
APÊNDICE

Consumos de energia associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Nordeste



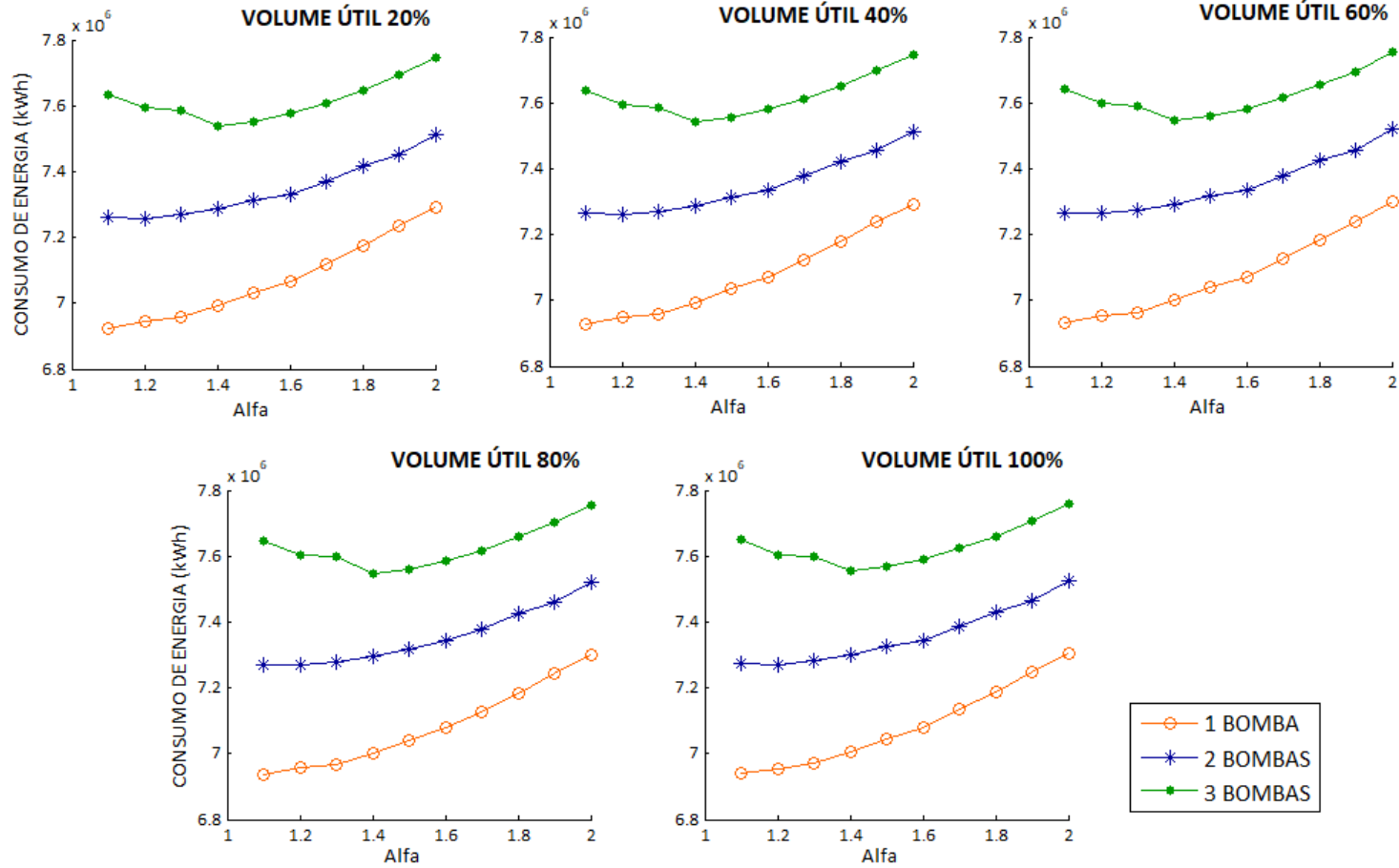
(fonte: elaborada pela autora)

Consumos de energia na ponta e fora da ponta associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Nordeste



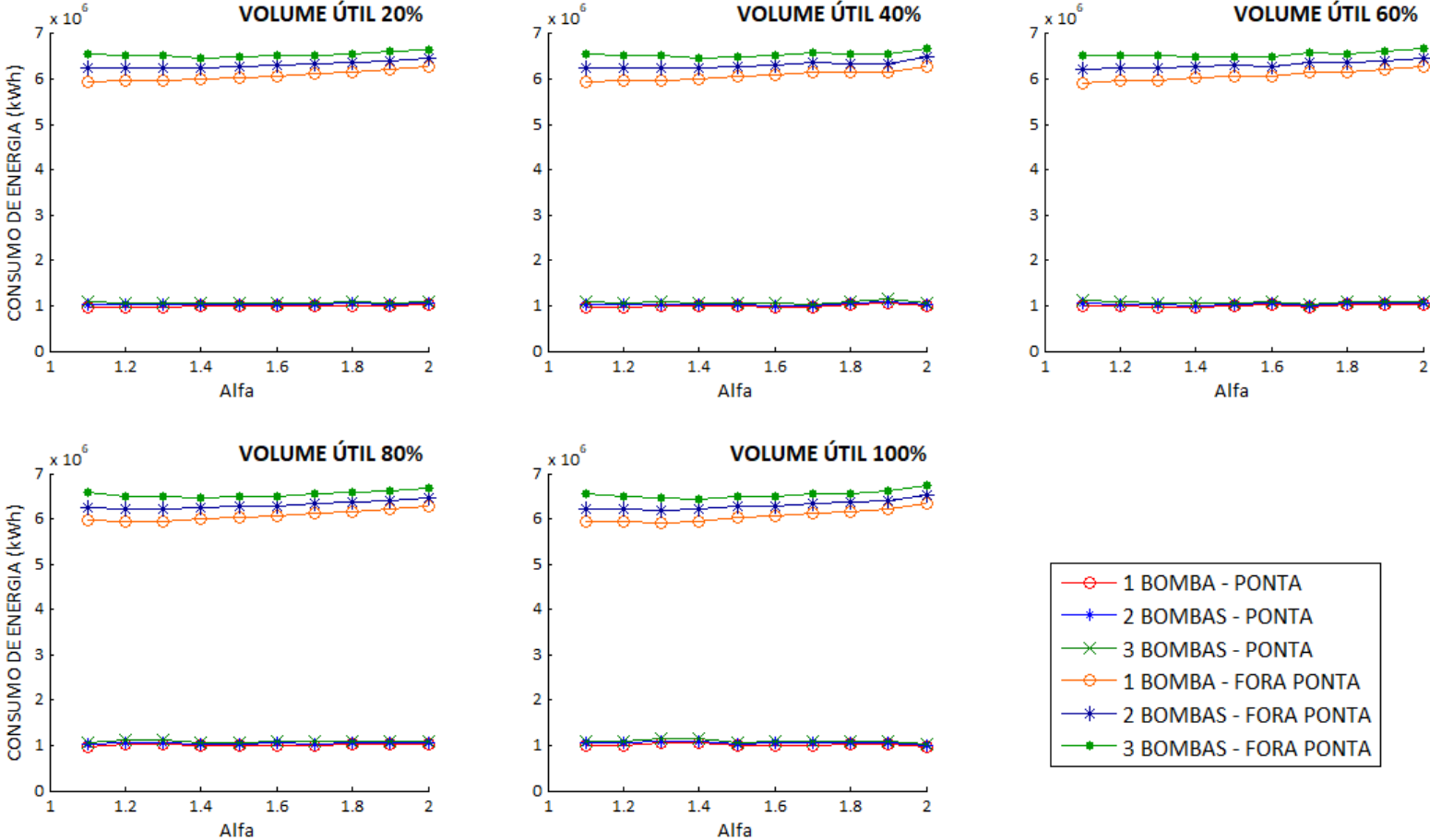
(fonte: elaborada pela autora)

Consumos de energia associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Norte



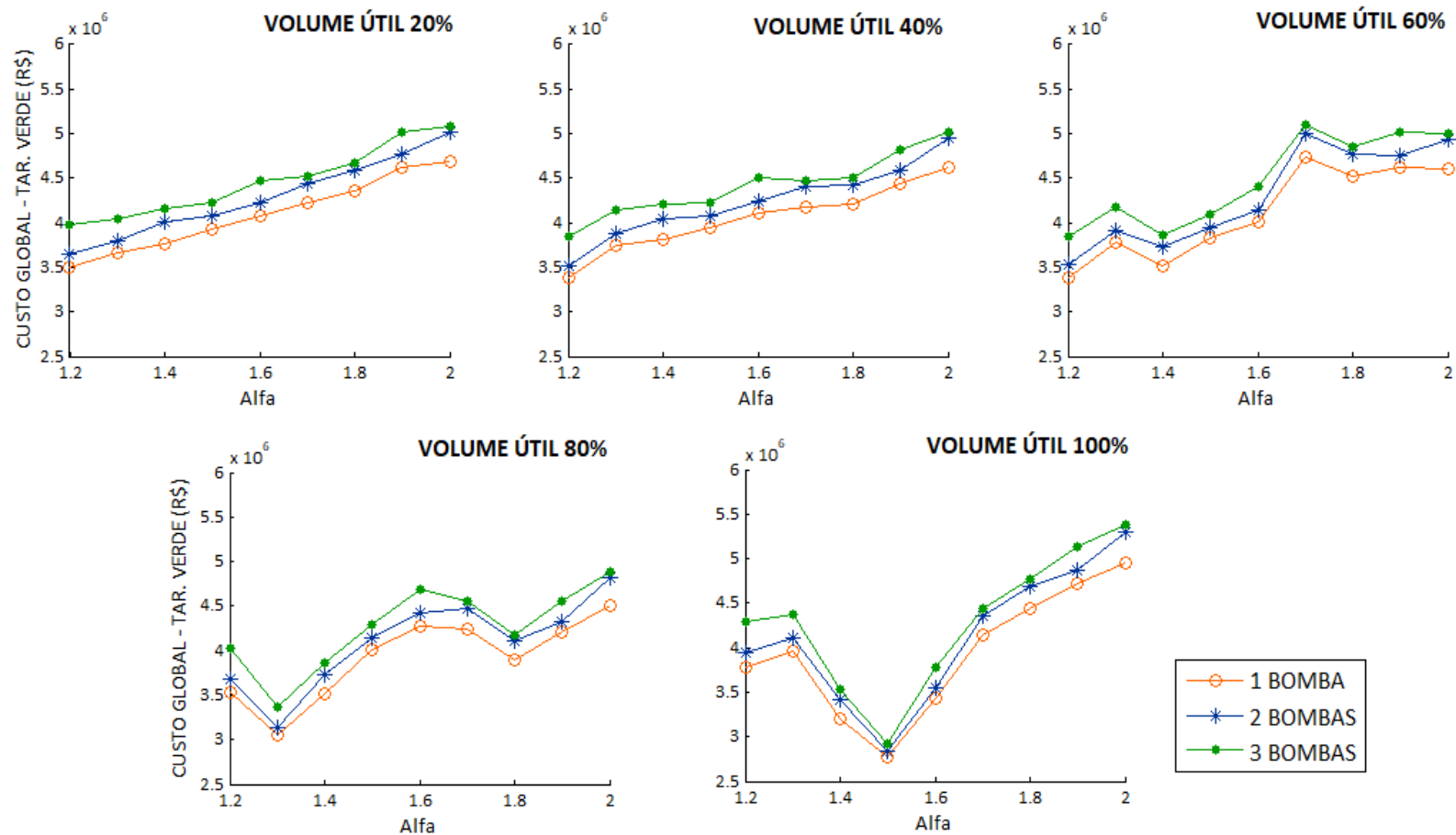
(fonte: elaborada pela autora)

Consumos de energia associados às diferentes soluções para o período de análise – Sistema Norte



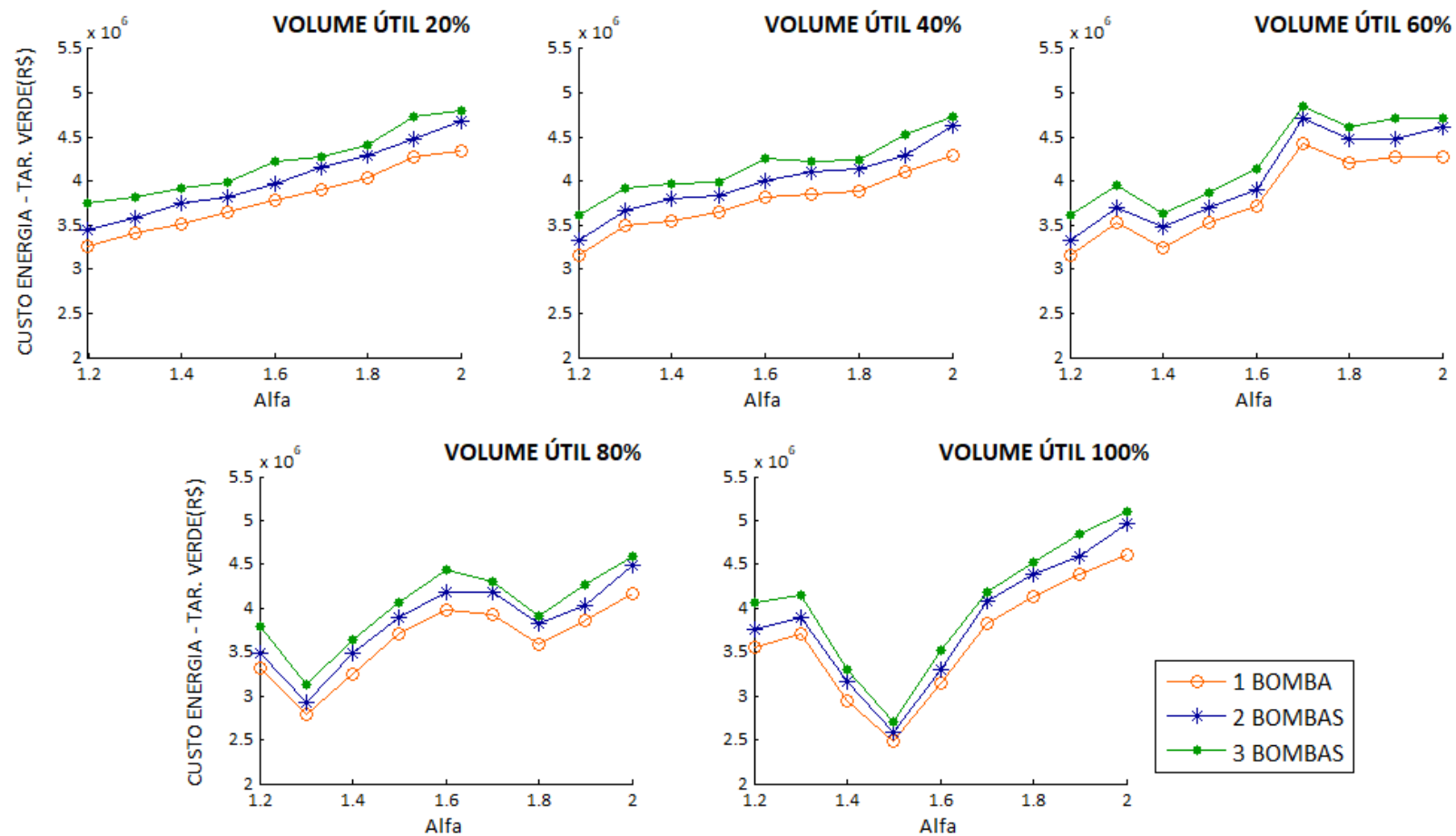
(fonte: elaborada pela autora)

Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise – Tarifa horo-sazonal verde - Sistema Nordeste



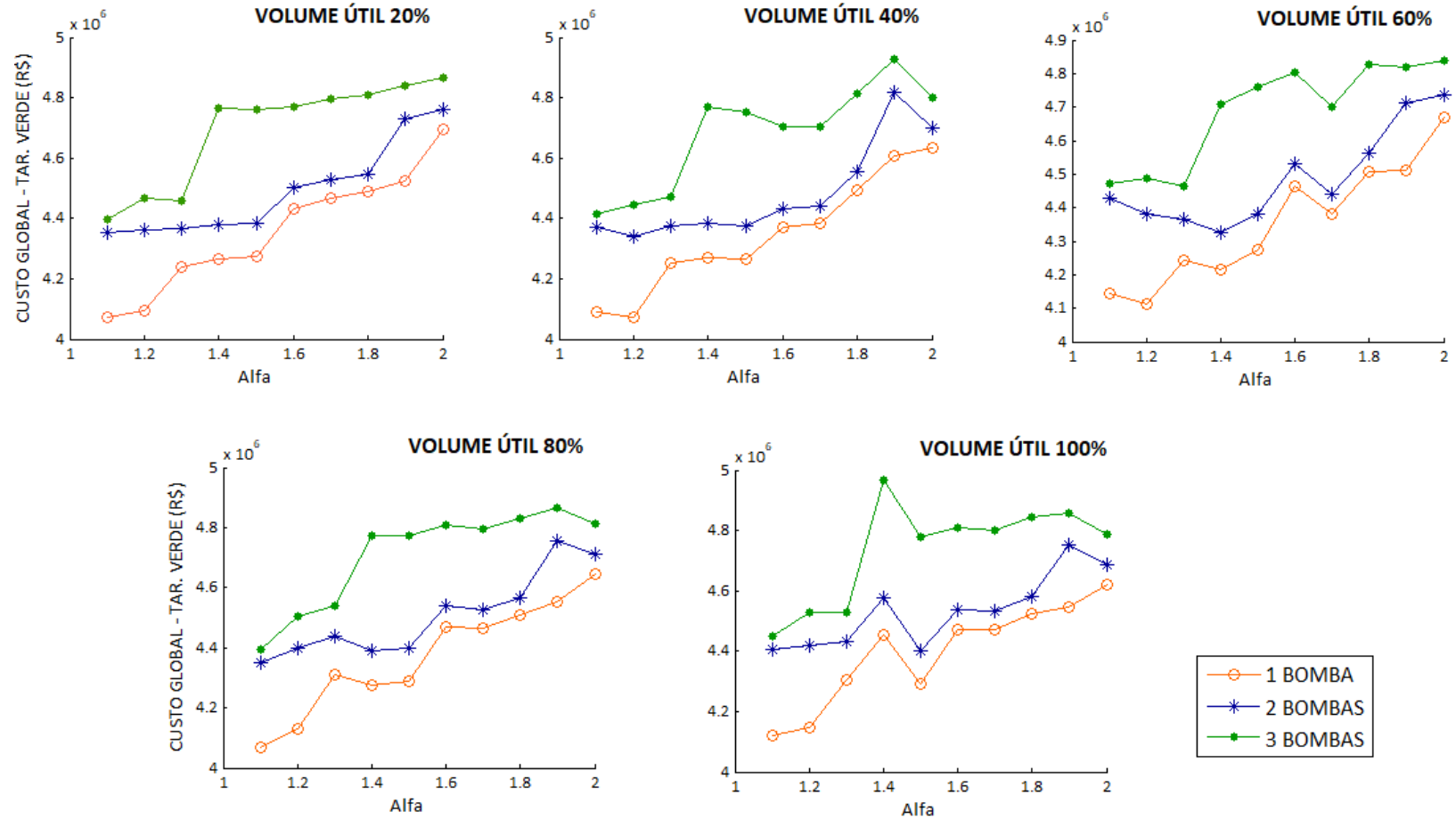
(fonte: elaborada pela autora)

Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise – Tarifa horo-sazonal verde - Sistema Nordeste



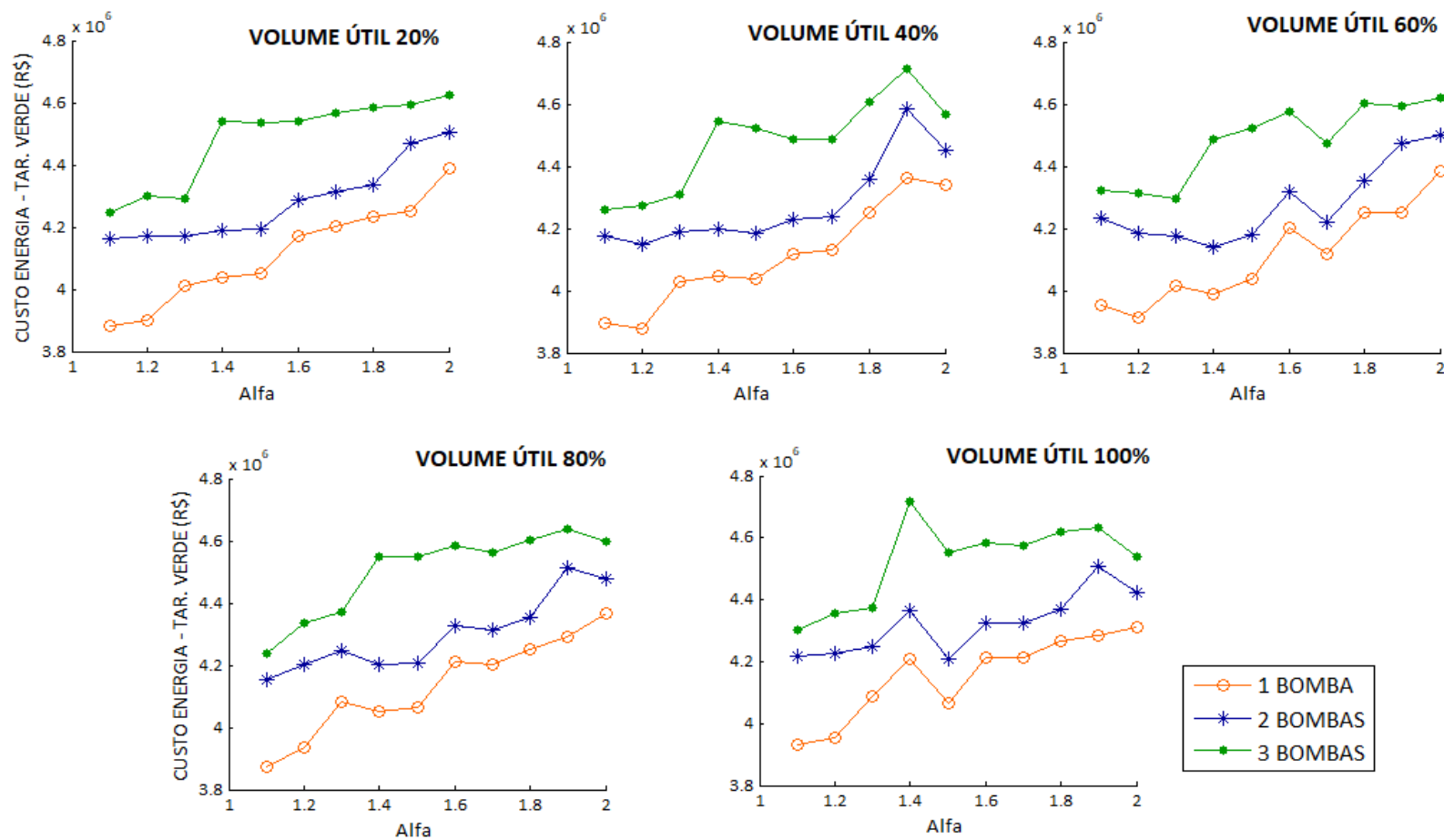
(fonte: elaborada pela autora)

Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise – Tarifa horo-sazonal verde - Sistema Norte



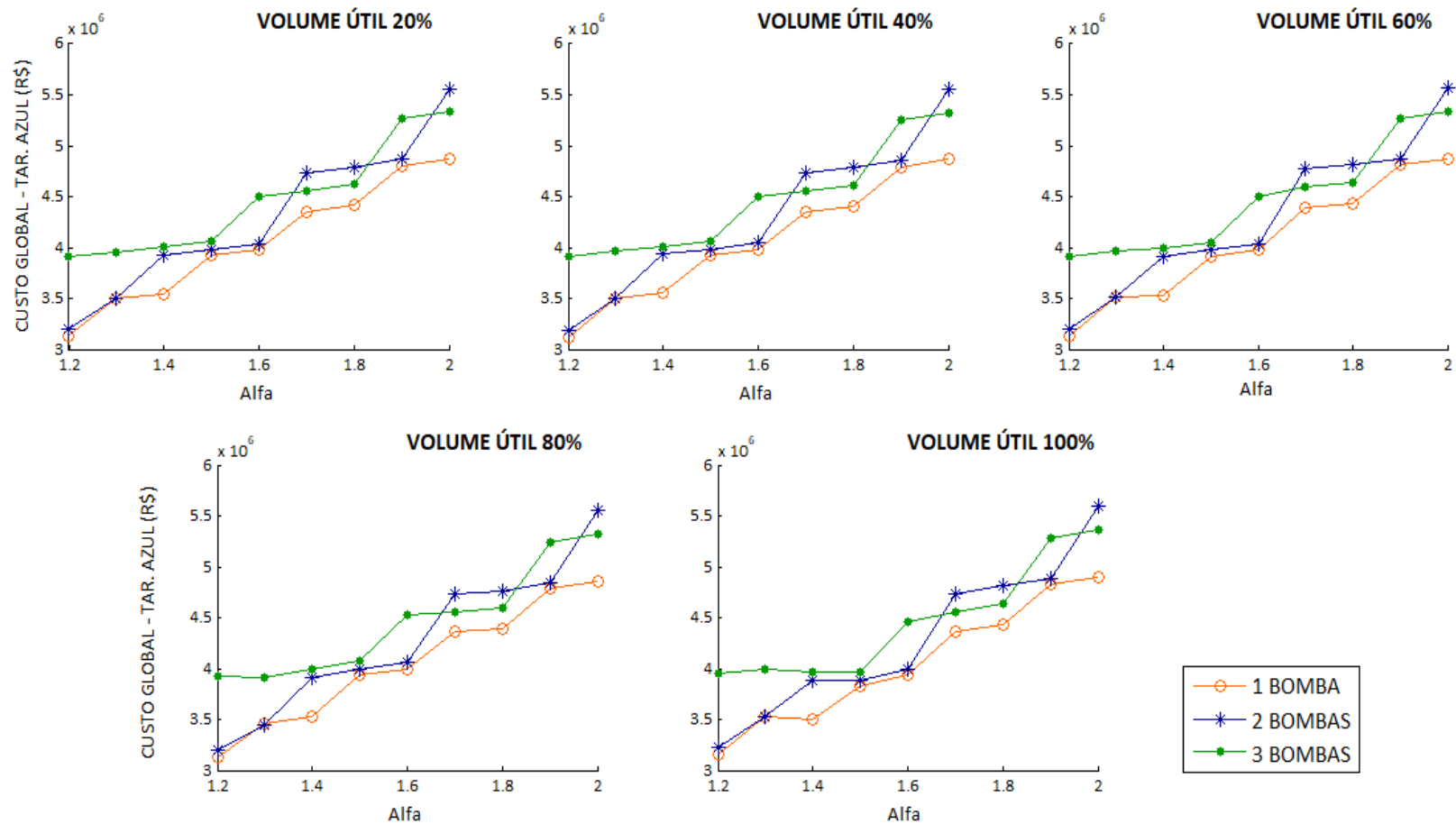
(fonte: elaborada pela autora)

Custos com energia elétrica associados às diferentes soluções para o período de análise – Tarifa horo-sazonal verde - Sistema Norte



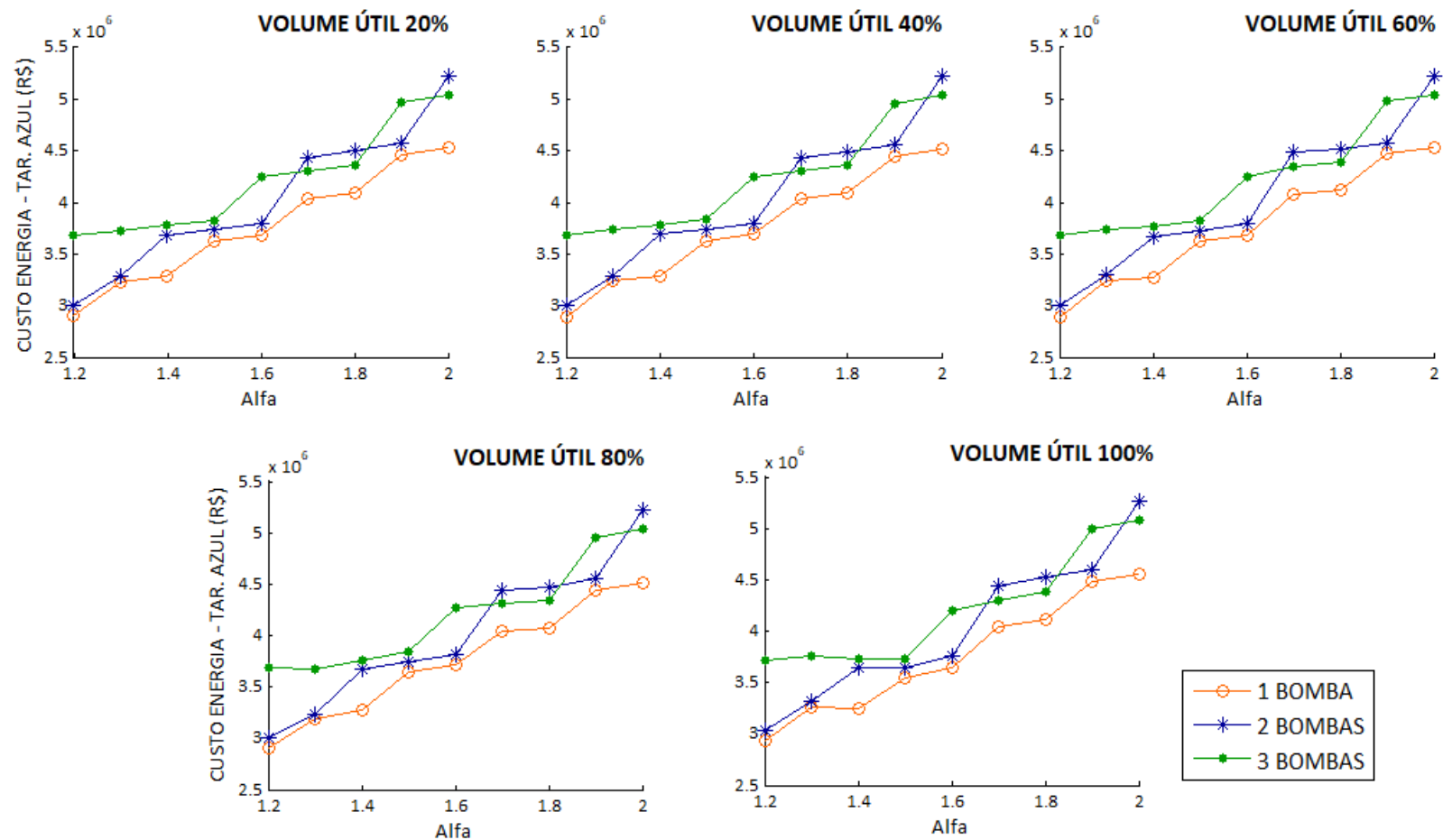
(fonte: elaborada pela autora)

Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise – Tarifa horo-sazonal azul - Sistema Nordeste



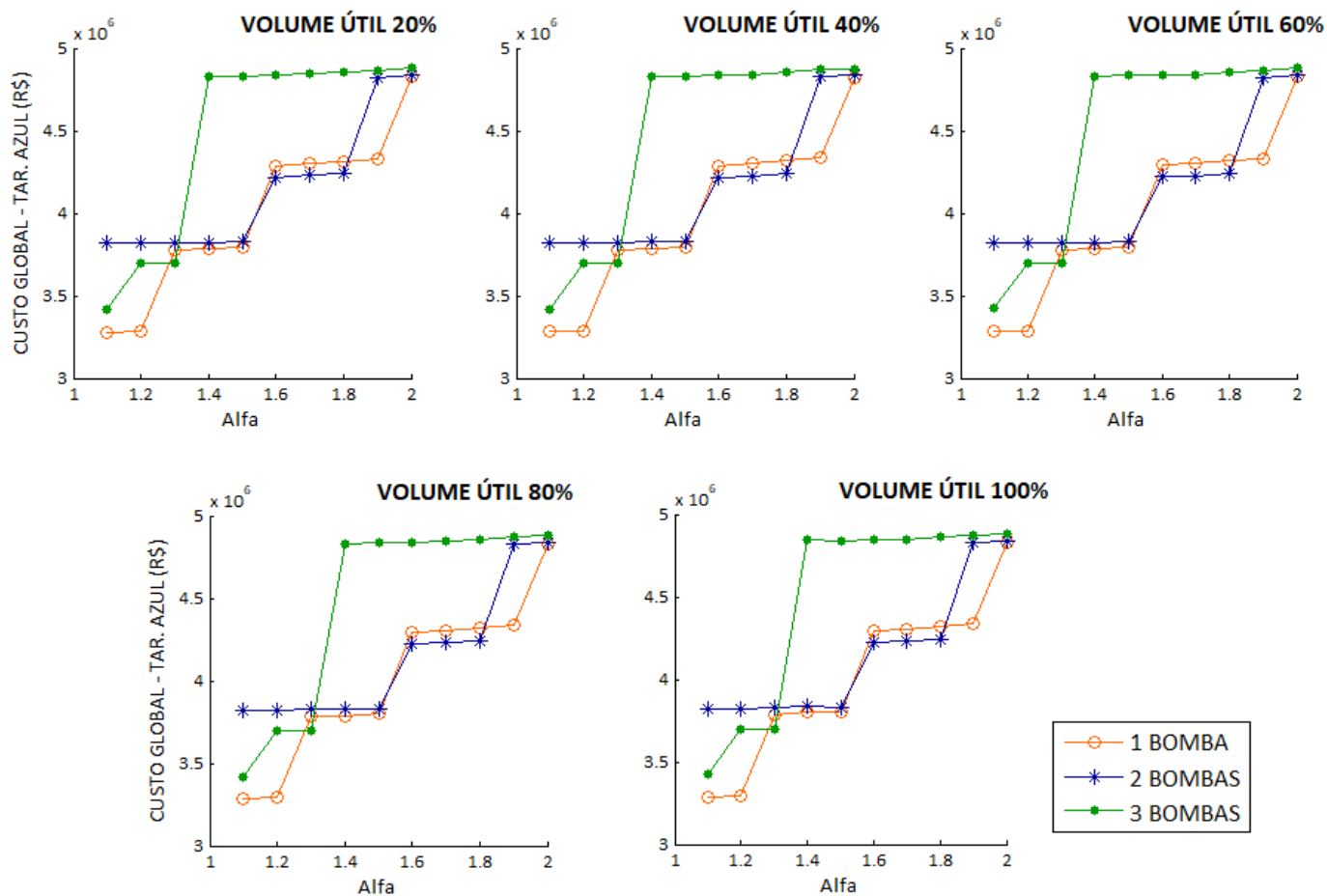
(fonte: elaborada pela autora)

Custos globais associados às diferentes soluções para o período de análise – Tarifa horo-sazonal azul - Sistema Nordeste



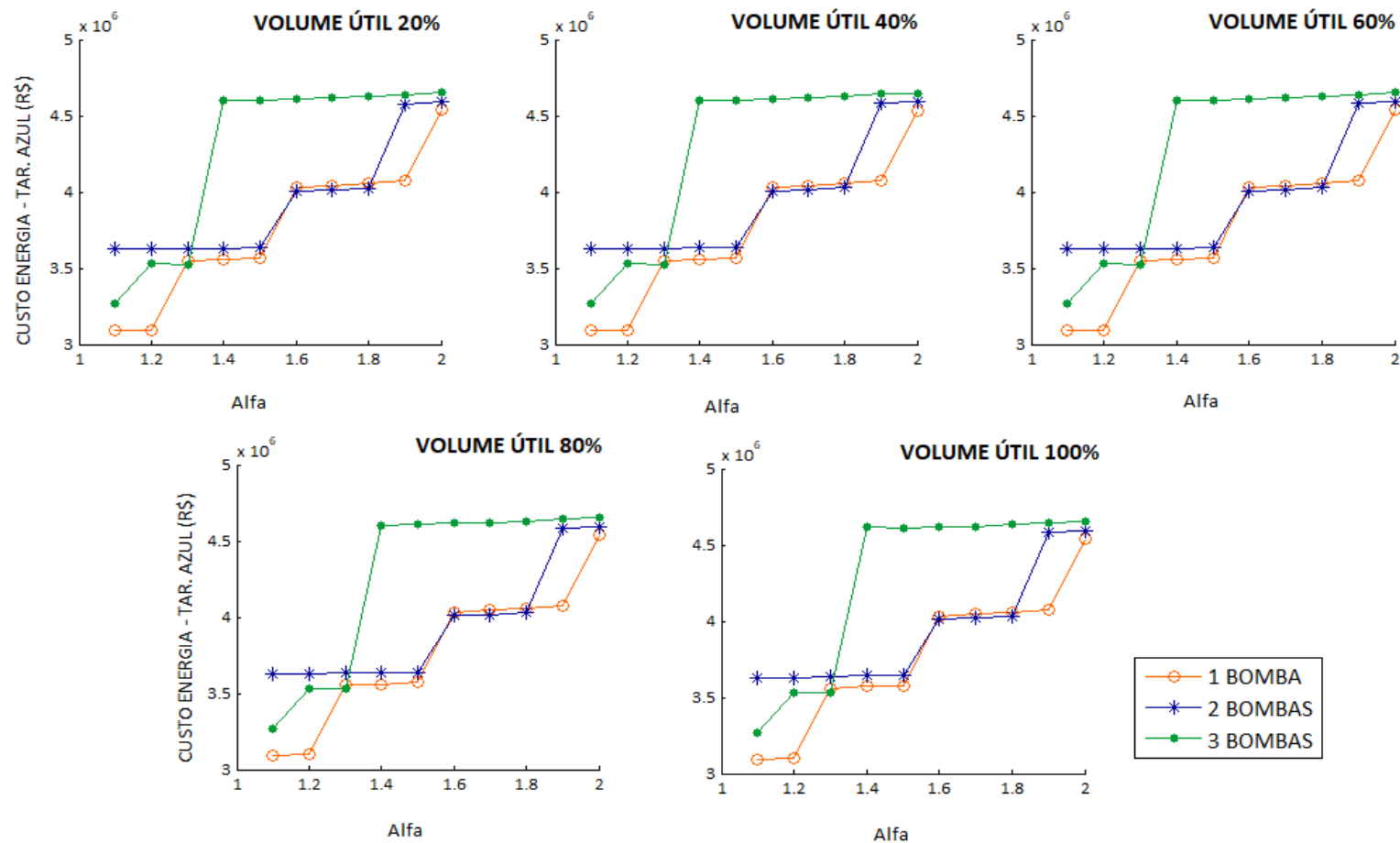
(fonte: elaborada pela autora)

Custos globais associados às diferentes combinações de variáveis para o período de análise – Tarifa horo-sazonal azul - Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)

Custos com energia elétrica associados às diferentes combinações de variáveis para o período de análise – Tarifa horo-sazonal azul - Sistema Norte



(fonte: elaborada pela autora)