

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Débora Salomé Móller

**LOCALIZAÇÃO OTIMIZADA DE ESTAÇÕES
ELEVATÓRIAS DE REFORÇO (*BOOSTERS*) EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Belo Horizonte

2021

Débora Salomé Móller

**LOCALIZAÇÃO OTIMIZADA DE ESTAÇÕES
ELEVATÓRIAS DE REFORÇO (*BOOSTERS*) EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Sistema de Recursos Hídricos

Orientador: Gustavo Meirelles Lima

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2021

M726l

Móller, Débora Salomé.

Localização otimizada de estações elevatórias de reforço (boosters) em redes de distribuição de água [recurso eletrônico] / Débora Salomé Móller. – 2021.

1 recurso online (xiii, 89 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Gustavo Meirelles Lima

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Água - Distribuição - Teses. 4. Otimização - Teses. 5. Estações elevatórias - Teses. I. Lima, Gustavo Meirelles. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

["Localização Otimizada de Estações Elevatórias em Redes de Distribuição de Água "]

[Débora Salomé Móller]

Dissertação de Mestrado] defendida e aprovada, no dia [25 de fevereiro de 2021], pela Banca Examinadora designada pelo [Colegiado do Programa de Pós-Graduação **EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**] da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

[Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior] - **Membro Externo**]

[UNICAMP]

[Prof. Marcos Rocha Vianna] - **Membro Interno**]

[UFMG]

[Prof. Aloysio Portugal Maia Saliba - **Membro Interno**]

[UFMG]

[Prof. Gustavo Meirelles Lima - **Orientador**]

[UFMG]

APROVADA PELO COLEGIADO DO PPG SMARH

Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima - Coordenadora

Belo Horizonte, 25 de fevereiro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Rocha Vianna, Usuário Externo**, em 25/02/2021, às 12:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Meirelles Lima, Servidor(a)**, em 25/02/2021, às 13:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edevar Luvizotto Junior, Usuário Externo**, em 25/02/2021, às 15:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aloysio Portugal Maia Saliba, Professor do Magistério Superior**, em 26/02/2021, às 14:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0578231** e o código CRC **A35168A0**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha Mãe, Sônia, quem me deu todo apoio e possibilidades durante a trajetória até os dias de hoje, que tanto me compreendeu nos momentos de apreensão. Aos meus irmãos, Natália e Breno, que sempre estiveram me apoiando e torcendo pelas minhas conquistas. A Sarah e Bebel, meus anjinhos de quatro patas, fizeram momentos pequenos tão especiais. A Família, tios e primos, por torcerem pelas minhas conquistas. A minha Vó Many pelo carinho incondicional.

Ao Matheus, que sempre esteve comigo, me apoiando e escutando, passando por todos os momentos de uma forma tão companheira e compreensiva.

Ao meu orientador, Prof. Gustavo Meirelles Lima, pela dedicação e apoio durante o desenvolvimento da pesquisa. Aos professores do SMARH que dedicaram tempo para passar seus conhecimentos. Ao Prof. Bruno Brentan e colega Daniel Bezerra pelas ideias e ensinamentos durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas de pesquisa e amigos, em especial ao Luan, Júlio e Felipe, pelo companheirismo, pelas trocas de conhecimento, pelo suporte constante e por todos os momentos de distração.

Aos amigos de longa data, em especial Anna, Júlia e Marina, pelo apoio e conselhos durante os dois anos, e a todas as saídas, séries e passeios compartilhados.

Aos colegas do trabalho pela compreensão, conselhos e experiências que tive a oportunidade de viver. Em especial, ao Dhieison, pela motivação e condução durante este período.

Agradeço as pessoas queridas que fazem parte da minha vida mas que não estão mais aqui. Em especial a Dodora e Vó Lourdes, que nos deixaram nesse período, com tanta história para

contar. Ao meu pai, Leonardo, que mesmo tendo nos deixando há tanto tempo, segue me influenciando nas escolhas de vida.

Ao CNPq pelo apoio financeiro através de bolsa de mestrado, possibilitando o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

As Estações Elevatórias têm um papel importante nos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), representando um dos maiores gastos operacionais do sistema. Portanto, bombas e motores eficientes, e uma boa estratégia operacional, são importantes para reduzir os custos operacionais. Para avaliar o desempenho dos equipamentos, um grande esforço foi feito por alguns governos e institutos, que classificaram os equipamentos de acordo com sua eficiência, permitindo uma comparação fácil e rápida entre os produtos. Apesar dessas informações, a seleção de bombas continua sendo um problema complexo, pois o comportamento dinâmico dos SAA impõe diferentes condições operacionais, alterando a eficiência das bombas, que pode estar longe de seu melhor ponto de eficiência (*Best Efficiency Point* - BEP), aumentando o consumo geral de energia. Em vista disso, a otimização da operação das estações elevatórias nas redes de distribuição de água tem sido amplamente estudada, principalmente com o desenvolvimento dos conversores de frequência, que permitem que as máquinas ajustem a potência hidráulica de acordo com as demandas requeridas. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo geral desenvolver um modelo de otimização que permita fazer análise das alternativas mais econômicas e eficientes para bombeamento de água tratada em redes de distribuição de água. A seleção da bomba com o melhor ponto de operação e o número de bombas operando em paralelo na rede são definidos através da técnica *Particle Swarm Optimization* (PSO), minimizando os custos de energia e perdas de água. Já a localização otimizada das estações elevatórias é feita pela análise da Rede Troncal, obtida através da teoria de grafos. Os tubos da Rede Troncal (TN) são importantes para todo o sistema, pois atendem um grande número de consumidores e, portanto, a locação das estações elevatórias será priorizada nesses tubos. O modelo de otimização foi aplicado em três redes de distribuição de água fictícias amplamente estudadas na literatura: Anytown, NET3 e D-Town. A pesquisa evidencia que permitir uma rotina operacional mais flexível às bombas e otimizar a localização dos *Boosters* na rede podem proporcionar uma operação dos SAA mais eficiente.

Palavras-chave: Sistema de Distribuição de Água, *Boosters*, Rotação Variável, Otimização

ABSTRACT

The Pumping Stations have an important role in the Water Distribution Networks (WDNs), representing one of the main operating expenses of the system. Therefore, efficient pumps and motors, and a good operating strategy, are important to reduce operational costs. To evaluate the performance of the machines, a great effort have been made by some governments and institutes, classifying the equipment according to its efficiency, allowing an easy and fast comparison among the products. Despite this information, pump selection remains a complex problem, as WDNs dynamic behavior imposes different operating conditions, changing pump efficiency, which may be far from its Best Efficiency Point (BEP), increasing overall energy consumption. Thus, the optimization of pumping stations operation in the water distribution networks has been widely studied, mainly with the development of speed driver, which allow the machines to adjust the hydraulic power according to the required demands. In this context, this study has the general objective of developing an optimization model that allows the analysis of the most economical and efficient alternatives for pumping treated water in water distribution networks. The selection of the pump with the best operating point and the number of pumps operating in parallel in the network are defined using the Particle Swarm Optimization (PSO) technique, minimizing energy costs and water losses. The optimized location of the pumping stations is done by the analysis of the trunk network, obtained through graph theory. The Trunk Network (TN) pipes are important for the entire system, as they serve a large number of consumers and, therefore, the location of the pumping stations will be prioritized in these tubes. The optimization model was applied to three fictitious water distribution networks commonly studied in the literature: Anytown, NET3 and D-Town. The research shows that allowing a more flexible operational routine for the pumps and optimizing the location of the Boosters in the network can provide a more efficient operation of the WDN.

Keyword: Water Distribution System, Boosters, Variable Speed, Optimization

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Estágio do uso da água em que há consumo de energia.	20
Figura 3.2 – Modelo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, 2010.....	26
Figura 3.3 – Relação entre vazamento e pressão.....	28
Figura 3.4 – Curva de eficiência em duas velocidade de rotação: (A) $\eta \times C_Q$; (B) $\eta \times Q$	31
Figura 3.5 – Predefinição da eficiência η_2/η_1 em função da redução da velocidade de rotação N_2/N_1 e a eficiência η_1 para rotação N_1	33
Figura 4.1 - Relação entre a eficiência da bomba e suas características: a) Velocidade de rotação; b) Vazão.....	43
Figura 4.2 - Fluxograma geral do algoritmo para seleção da Estação Elevatória	47
Figura 4.3 - Mapa de Conisberga e Diagrama de Euler.	50
Figura 4.4 – Fluxograma geral para obter a Rede Troncal.....	52
Figura 5.1 – Rede <i>Anytown</i>	53
Figura 5.2 – Curva de demanda.....	57
Figura 5.3 – Resultados usando umas bomba: a) Potência da bomba; b) Pressão média na rede.	59
Figura 5.4 – Nível de água no tanque: a) Tanque 1; b) Tanque 2.	59
Figura 5.5 - Variação Tarifária da Demanda: a) H_{BEP} ; b) Q_{BEP}	61
Figura 5.6 – Nível de água no tanque: a) Tarifa mínima; b) Tarifa máxima.	62
Figura 5.7 – Rede NET3.....	63
Figura 5.8 - Potência das bombas e pressões média: a) rede com vazamento; b) rede sem vazamento.....	66
Figura 5.9 – Nível de água nos tanques: a) rede com vazamento; b) rede sem vazamento. ...	66
Figura 5.10 - Resultados usando umas bomba: a) Potência da bomba “Lake”; b) Potência da bomba “River”; c) Pressão média na rede.	71
Figura 5.11 - Nível de Água nos tanques: a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3.	72
Figura 5.12 - Rede Troncal das redes: a) NET3; b) D-town.	73
Figura 5.13 – Localização dos Boosters locados na Rede NET: a) 10 boosters; b) 4 boosters.	74
Figura 5.14 – Potência dos bombas da rede com 4 Boosters.	76
Figura 5.15 - Nível de água nos tanques da rede NET3 com 4 <i>Boosters</i>	77

Figura 5.16 – Níveis de água dos tanques: a) Caso 1 com uma bomba; b) Caso 1 com duas bombas em paralelo; c) 4 <i>Boosters</i> ; d) 10 <i>Boosters</i>	78
Figura 5.17 – Potência das bombas para o caso com 4 <i>Boosters</i> na rede.....	79
Figura 5.18 – Rede D-Town.....	80
Figura 5.19 - Nível de Água nos tanques: a) Tanque 1; b) Tanque 2; c) Tanque 3; d) Tanque 4.	86
Figura 5.20 - Nível de Água nos tanques: a) Tanque 5; b) Tanque 6; c) Tanque 7.	87
Figura 5.21 - Rede Troncal das redes: a) NET3; b) D-town.	88
Figura 5.22 – Locação dos 13 <i>Boosters</i> na rede D-town.....	89
Figura 5.23 – Pressão médias da rede nos Caso 1, 2 e com 13 <i>Boosters</i>	90
Figura 5.24 – Potência de cada <i>Booster</i> locados na rede D-town.	94
Figura 5.25 - Nível de Água nos tanques: a) Tanque 1; b) Tanque 2; c) Tanque 3; d) Tanque 4.	95
Figura 5.26 - Nível de Água nos tanques: a) Tanque 5; b) Tanque 6; c) Tanque 7.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Indicadores do bombeamento.	22
Tabela 3.2 – Critérios para definição da classe do conjunto motobomba	27
Tabela 3.3 – Resumo de pesquisas que otimizaram a operação das bombas nos sistemas de abastecimento de água	39
Tabela 4.1 – Configurações do PSO.....	49
Tabela 5.1 – Valores Padrão de tarifa de energia e demanda.....	54
Tabela 5.2 – Resultados para diferentes bombas e processos de otimização	55
Tabela 5.3 - Dados médios da rede.....	56
Tabela 5.4 - Valores das despesas totais com os serviços por m ³ faturado adotados.	64
Tabela 5.5 – Valores Padrão de tarifa de energia e demanda.....	64
Tabela 5.6 - Valores dos consumos, demanda e pressões médias das redes.	65
Tabela 5.7 – Resultados para os cenários com e sem vazamento de água.	65
Tabela 5.8 - Resultado da otimização para os Caso 1, 2 e 3, considerando dois cenários.	67
Tabela 5.9 - Dados dos gastos energéticos e pressão média da rede NET3 – bomba únicas. .	69
Tabela 5.10 - Dados dos gastos energéticos e pressão média da rede NET3 – bombas em paralelo.	70
Tabela 5.11 – Resultados da otimização da Rede NET3 com 10 <i>Boosters</i> e 4 <i>Boosters</i>	75
Tabela 5.12 - Dados dos gastos energéticos e pressão média da rede NET3 – 3 <i>Boosters</i>	76
Tabela 5.13 – Resultado dos casos analisados trabalhando sem os Tanques 2 e 3.	77
Tabela 5.14 - Tarifas de Energia aplicadas na rede D-town.....	81
Tabela 5.15 – Resultados da potência de operação das bombas do Caso 2.....	82
Tabela 5.16 - Resultados da potência de operação das bombas do Caso 1	83
Tabela 5.17 – Resultados da otimização para o Caso 1 e 2 para a rede D-town	84
Tabela 5.18 – Resultados do caso com 13 <i>Boosters</i>	91
Tabela 5.19 - Dados dos gastos energéticos e pressão média da rede D-town – Caso com 13 <i>Boosters</i>	93

LISTA DE ABREVIATURAS

AG	Algoritmo Genético
ASPV	<i>Accumulated Shortest Path Value</i> - Valores Acumulados do Menor Caminho
BEP	<i>Best Efficiency Point</i> – Melhor Ponto de Operação
BFS	<i>Bradth Firt Search</i> - Largura da Primeira Pesquisa
BFT	Bomba Funcionando como Turbinas
BIN	Balanco Energético Nacional
ED	Evolução Diferencial
EEA	Estação Elevatória de Água
EEAT	Estação Elevatória de Água Tratada
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Eq.	Equação
ETA	Estação de Tratamento de Água
FO	Função Objetivo
iELGP	<i>iterative Lexicographoc Goal Programming</i>
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IWA	<i>Internacional Water Association</i> - Associação Internacional de Água
LP	Linear Programming
LPG	Greedy Algorithm
NLP	Nonlinear Programming
pag.	Página
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> - Otimização por Enxame de Partículas
RD	Rede de Distribuição
RNA	Rede Neural Artificial
RT	Rede Troncal
RTC	<i>Real Time Control</i> - Controle em tempo Real
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SCADA	Sistema de Controle de Supervisão e Aquisição de Dados
SNIS	Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento
VRP	Válvula Redutora de Pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

$ASP_{V_{MÁX}}$	Valores Acumulados do Menor Caminho máximo encontrado, antes da normalização
$ASP_{V_{NORMALIZADO}}$	Valores Acumulados do Menor Caminho normalizado
$ASP_{V_{TUBO}}$	Valores Acumulados do Menor Caminho antes da normalização
C	Coeficiente de vazão
c	Constante em (%) que definir a classificação da bomba
C_1	Coeficiente cognitivo
C_2	Coeficiente social
C_7	Capacidade máxima de bombeamento operacional (kW)
$C_{água}$	Despesas com a produção de água (R\$/m ³)
C_Q	Coeficiente adimensional de vazão
D	Diâmetro (m)
D_1	Consumo de energia de bombeamento (kWh)
D_2	Máximo consumo de energia diário de bombeamento (kWh)
D_3	Fator de normalização do consumo de água (m ² .100m)
D_4	Consumo de energia reativa (kVar)
D_5	Recuperação de energia (kWh)
G	Melhor posição do grupo (\$)
H	Altura manométrica (m)
H_{BEP}	Altura manométrica do melhor ponto de operação (mca)
H_i	Altura manométrica da bomba no tempo i (m)
K	Perdas
m	Expoente de relação entre os número de Reynolds para duas velocidades distintas
n	Rotação nominal (rpm)
N	Velocidade de rotação (rpm)
NA_{final}	Nível de água no tanque no tempo final da simulação (m)
NA_i	Nível de água no tanque no tempo i (m)
$NA_{inicial}$	Nível de água no tanque no tempo inicial da simulação (m)
$NA_{máx}$	Nível máximo de água no tanques (m)
N_P	Número de bombas operando na rede
N_s	Rotação Especifica (rpm)
P	Potência da bomba (W)
P	Melhor posição da partícula (R\$)
Pen	Função penalidade (R\$)
$Perda$	Perda de água na rede no tempo i (m ³ /s)
Ph_4	Utilização da bomba (%)
Ph_5	Consumo de energia padronizado (kWh/m ³ /100m)
Ph_6	Consumo de energia reativa (%)
Ph_7	Energia recuperada (%)

$P_{j,i}$	Pressão no nó j e tempo i (m)
$P_{máx}$	Potência máxima (kW)
$P_{mín}$	Pressão mínima estabelecida (m)
Q	Vazão (m^3/s)
Q_{BEP}	Vazão do melhor ponto de operação (m^3/s)
Q_i	Vazão da bomba no tempo i (m^3/s)
$Q_{MÁX}$	Vazão máxima (m/s)
Q_{TUBO}	Vazão de escoamento na tubulação (L/s)
R^2	Coefficiente de determinação
Re	Número de Reynolds
Re_1	Número de Reynolds para velocidade de rotação n_1
Re_2	Número de Reynolds para velocidade de rotação n_2
t_{ai}	Tarifa da demanda no tempo i (R\$/kW)
t_{ei}	Tarifa de energia no tempo i (R\$/kWh)
V	Velocidade (m/s)
V	Velocidade da partícula (R\$/s)
X	Posição da partícula (R\$)
Y	Coefficiente emissor
z	Número de estágios da bomba
β	Coefficiente de panalidade
γ	Peso específico da água (N/m^3)
η	Eficiência da Bomba (%)
ν	Viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)
ω	Coefficiente de inercia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1	CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	19
3.1.1	<i>Indicadores de Eficiência Energética.....</i>	<i>22</i>
3.2	MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	24
3.2.1	<i>Substituição do Conjunto Motobomba</i>	<i>24</i>
3.2.2	<i>Controle de Pressão e Geração de Energia</i>	<i>28</i>
3.2.3	<i>Operação com Rotação Variável.....</i>	<i>30</i>
3.3	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS À OPERAÇÃO DOS SISTEMAS	35
3.3.1	<i>Métodos Meta-Heurísticos.....</i>	<i>35</i>
3.3.2	<i>Exemplos de Estudos de Caso</i>	<i>37</i>
4	MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1	DIMENSIONAMENTO DE ESTAÇÃO ELEVATÓRIA	41
4.1.1	<i>Características da bomba.....</i>	<i>42</i>
4.1.2	<i>Seleção da Bomba</i>	<i>43</i>
4.2	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	48
4.2.1	<i>Particle Swarm Optimization – PSO.....</i>	<i>48</i>
4.2.2	<i>Modelo de PSO utilizado</i>	<i>49</i>

4.3	LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS	49
4.3.1	<i>Teoria dos Grafos</i>	49
4.3.2	<i>Método da Rede Troncal</i>	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	REDE ANYTOWN	53
5.1.1	<i>Descrição da rede</i>	53
5.1.2	<i>Resultados da Seleção das Bombas</i>	54
5.1.3	<i>Análise de Sensibilidade das Tarifas de Energia</i>	60
5.2	REDE NET3	62
5.2.1	<i>Descrição da Rede</i>	62
5.2.2	<i>Análise da influência dos vazamentos de água na rede</i>	64
5.2.3	<i>Seleção da Bomba para Rede NET3</i>	67
5.2.4	<i>Localização das Estações Elevatórias</i>	73
5.2.5	<i>Análise da influência dos tanques na rede NET3</i>	77
5.3	REDE D-TOWN.....	79
5.3.1	<i>Descrição da Rede</i>	79
5.3.2	<i>Seleção das Bombas</i>	81
5.3.3	<i>Localização das Estações Elevatórias</i>	87
5.4	ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	96
7	CONCLUSÕES	98
8	RECOMENDAÇÕES	101
	REFERÊNCIAS	102

1 INTRODUÇÃO

A operação das Estações Elevatórias de Água representa um dos maiores custos operacionais para as concessionárias de água, e também têm um papel importante nos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), fornecendo água para consumidores que estão localizados distantes ou em cotas superiores ao do reservatório de distribuição da Estação de Tratamento de Água (ETA) (JOWITT; GERMANOPOULOS, 1992; TARQUIN; DOWDY, 1989; VENKATESH; BRATTEBØ, 2011). Portanto, bombas e motores com alta eficiência, e uma estratégia operacional adequada, são importantes para reduzir os custos operacionais. Entretanto, a seleção das bombas é um problema complexo devido ao comportamento dinâmico dos SAA, que impõem diferentes pontos operacionais, alterando a eficiência das bombas, que pode estar longe de seu melhor ponto de eficiência (*Best Efficiency Point* - BEP), e aumentando o consumo geral de energia.

Duas alternativas principais podem ser utilizadas para reduzir o problema de uma alta queda de eficiência durante o dia. A primeira é o uso de várias bombas em paralelo, acionando mais ou menos conjuntos de acordo com a demanda. Esse procedimento permite que as bombas operem em uma faixa mais restrita de eficiência, próxima ao seu BEP (GIACOMELLO; KAPELAN; NICOLINI, 2013; KOOR; VASSILJEV; KOPPEL, 2014; OLSZEWSKI, 2016). A segunda opção é o uso dos conversores de frequência, que permitem ajustar a velocidade de rotação da bomba de acordo com a demanda. Esse procedimento, não apenas mantém uma alta eficiência, mas também reduz a energia consumida (BRENTAN, B. *et al.*, 2018; HASHEMI; TABESH; ATAEEKIA, 2014). As duas opções podem ser combinadas para aumentar ainda mais a eficiência da Estação Elevatória.

Em um sistema dinâmico como o SAA, o BEP da bomba não afeta apenas o consumo de energia, mas o comportamento de todos os componentes do sistema, como os níveis de água dos tanques. Esse é um parâmetro importante, pois, durante o horário de pico, em que as tarifas de energia são mais altas, a distribuição de água poderia ser feita apenas pelo tanques, reduzindo os gastos energéticos do bombeamento (WALSKI, 1993; BOULOS *et al.*, 2001). Assim, uma bomba de maior capacidade pode não ser a mais eficiente ao longo do dia, mas a possibilidade

de desligá-la durante um período de operação com tarifas mais caras pode levar à sua viabilidade econômica.

Como apresentado por Mala-Jetmarova *et. al.* (2018) a otimização das bombas dos SAA é importante para reduzir os custos operacionais, e por isso tem sido amplamente estudada. A pesquisa sobre otimização de bombas concentra-se em três linhas principais: localização, seleção e operação da bomba (BRENTAN *et al.*, 2018; TANG *et. al.*, 2014; ZHANG *et. al.*, 2012).

Portanto, neste trabalho, a seleção da bomba é vista como um problema de otimização, minimizando os custos de energia e perdas de águas. O algoritmo de enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO) é usado para resolver o problema. Três redes fictícias são analisadas: *Anytown*, NET3 e *D-Town*, as quais apresentam portes diferentes: pequeno, médio e grande, respectivamente. As redes analisadas são comumente utilizadas na literatura para validação de códigos e compreensão dos programas criados, afim de entender a aplicação, para posterior aplicação em redes reais. Dentro da análise de cada rede são estudados diferentes cenários, de forma a identificar um padrão que possa ser relevante para a seleção e localização de estações elevatórias em redes de distribuição de água.

Para a rede *Anytown* foram estudados três cenários diferentes: bombas com rotação fixa e ponto de operação variável, rotação das bombas variável e ponto de operação fixo e o terceiro cenário considerou tanto o ponto de operação como a rotação de trabalho variáveis durante o processo de otimização. Também foi feita uma análise de sensibilidade na rede *Anytown* para os valores das tarifas de energia. Os resultados apontaram que o caso que o SAA operou com bombas com rotação variável, sendo o BEP escolhido de acordo com esta operação, obteve os menores gastos energéticos.

Na rede de médio porte, NET3, a seleção das bombas foi feita variando-se seu BEP durante o processo de otimização, e considerando que as bombas operam com rotação variável. Neste caso o estudo focou na influência que os custos de produção de água tem na rotina operacional das redes, uma vez que a água perdida em vazamentos possui este valor econômico. Outro ponto importante, foi a otimização da localização das estações elevatórias de água tratada, que foi

feita através do método da rede troncal (RT), o que permitiu a distribuição de *boosters* ao longo da rede.

Para finalizar, através da rede de grande porte *D-town*, foram analisados inicialmente dois casos, um com as Estação Elevatória de Água Tradada (EEAT) funcionando com bombas únicas e outro com duas ou três bombas em paralelo. Os resultados corroboraram com os resultados obtidos para as redes *Anytown* e NET3, que bombas maiores podem ter rotinas operacional com eficiência energética maior do que bombas menores funcionando em paralelo. O terceiro caso analisado foi a localização otimizada de estação elevatórias, em que no caso da rede *D-town*, foram distribuídos 13 *boosters* ao longo da rede. Os resultados mostraram que a distribuição dos *Boosters* na rede pode dar maior controle ao sistema no controle das pressões nos nós.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de otimização que permita determinar as alternativas mais econômicas e eficientes para bombeamento de água tratada em redes de distribuição de água.

2.2 *Objetivos específicos*

Para obtenção do objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma rotina computacional para otimizar, através da técnica PSO, o local de instalação de *boosters* e selecionar as bombas a serem utilizadas;
- Analisar a influência que as tarifas de energia e de água têm na seleção das bombas;
- Analisar a influência que a perda de água nos sistemas de distribuição de água têm na seleção das bombas;
- Comparar diferentes alternativas de bombeamento em termos de consumo de energia e controle de pressão (vazamentos);
- Comparar os resultados gerados para cada rede de distribuição analisada, observando a influência do porte de cada rede.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo do trabalho é apresentado o embasamento teórico da pesquisa, sendo dividido em três partes principais: i) o consumo de energia nas redes de abastecimento de água, em que serão apresentados os principais pontos de consumo e quais indicadores utilizados para avaliar operação das bombas; ii) medidas de eficiência energética, em que técnicas clássicas para redução do consumo de energia serão apresentadas; e iii) os métodos de otimização aplicadas à operação de bombas, em que serão apresentados os conceitos de otimização a serem aplicados na busca pela melhor estratégia operacional

3.1 Consumo de Energia em Sistemas de Abastecimento de Água

Os sistemas de abastecimento de água geram gastos energéticos significativos, que devem ser controlados, de forma que custos energéticos evitáveis não ocorram. Como apontado por diversos autores (ABDALLAH; KAPELAN, 2019; COELHO, BERNARDETE; ANDRADE-CAMPOS, 2016), nos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) a unidade componente do sistema que apresenta os maiores custos energéticos são as Estações Elevatórias de Água. Estas têm ganhado especial atenção, pois são fundamentais para o controle dos custos de operação do sistema.

Como apresentado por Bene e Hos (2012), o ciclo do uso da água apresenta vários pontos de consumo de energia, principalmente nas fases operacionais e de manutenção. Nessas fases a quantidade e qualidade da água exigida pelo consumidor. Está diretamente relacionada ao consumo de energia. Como apresentado na Figura 3.1, quanto mais exigentes são os consumidores com relação a qualidade e quantidade, maiores serão os gastos energéticos.

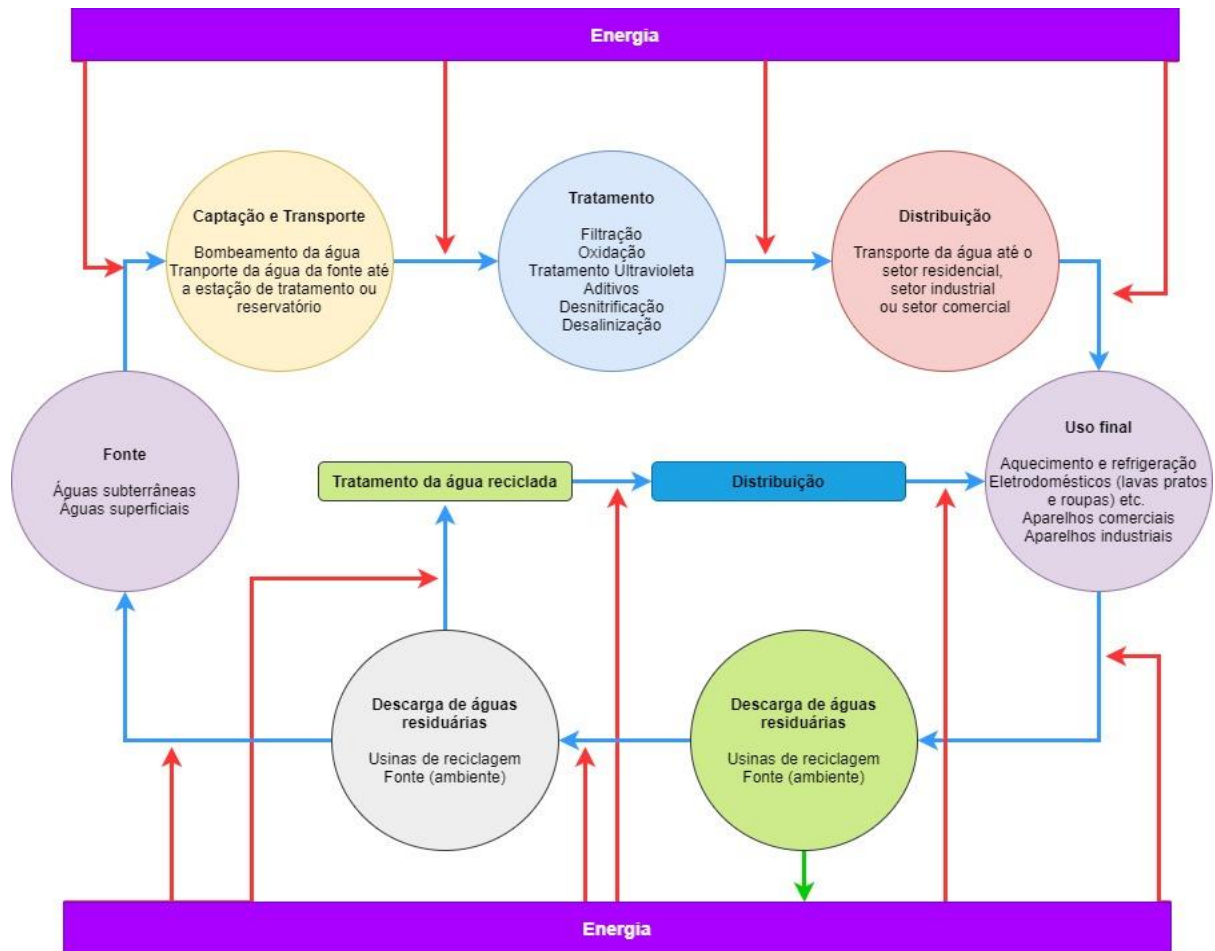


Figura 3.1 – Estágio do uso da água em que há consumo de energia.

Fonte: Adaptado de Wakeel *et al.* (2016).

Conforme apresentado por Shekofteh *et al.* (2020) no estudo sobre o consumo de energia no ciclo da água, em que dependendo do tipo de captação (subterrânea ou superficial) e tratamento, o consumo de energia pode variar entre 3 e 7 % do valor total de consumo de energia de cada país analisado. Já para o Brasil, segundo dados do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) (2019), a quantidade de energia demandada pelos prestadores de serviços de saneamento foi de 12,9 TWh, sendo que 11,5 TWh referentes aos sistemas de distribuição de água e 1,4 TWh para os sistemas de esgotamento sanitário. Esse valor, corresponde a 2,4 %, se comparado com a demanda total de energia no Brasil, de 535,4 TWh (2019), computado pelo Balanço Energético Nacional (BIN) (EPE, 2019).

Como apresentado por Coelho e Andrade-Campos (2014) no ano de 2010, por exemplo, o consumo de energia com o saneamento foi de 10,8 TWh, e se comparado com o total

consumido no Brasil neste ano, de 498 TWh, corresponde a 2,17%. No entanto, nota-se que existe um aumento no consumo de energia no geral, em todos os setores, e se forem comparados apenas o custos energéticos no sistemas distribuição de água e esgotamento sanitário, houve um aumento considerável de quase 20%. Como mencionado anteriormente, o consumo de energia nos sistemas de distribuição de água é proporcional ao que é demandado, e nota-se uma tendência de aumento das exigências da população quanto a qualidade e quantidade nos serviços de abastecimento de água, justificando os valores apresentados. Além disso, o Brasil é um país que apresenta baixos índices de atendimento de água tratada, e nota-se uma melhora nos últimos anos desse índice, que em 2017 era de 74,3%, passando para 83,6% em 2019.

Anteposto ao cenário brasileiro dos sistemas de abastecimento de água, tem-se grandes desafios pela frente, e conforme apresentando por Alegre *et al.* (2018), as pressões pela excelência do serviço só têm aumentado em âmbito mundial devido aos seguintes fatores:

- Adaptação às mudanças climáticas, levando em consideração situações potenciais de estresse hídrico e fenômenos extremos;
- Redução do consumo de energia, devido às operações e equipamentos mais eficientes;
- Acompanhar as taxas de crescimento populacional, principalmente em regiões urbanas, e também as mudanças no cenário social, tais como: migrações, envelhecimento, etc.;
- Pressões financeiras induzidas pela economia mundial;
- A evolução das expectativas dos consumidores e pressões políticas quanto aos valores das tarifas;
- Enquadrar os sistemas à era da infraestrutura e à sustentabilidade global do sistema.

Todos esses fatores apresentados por Alegre *et al.* (2018) devem ser foco de análise dos sistemas. Foram criados pela *Internacional Water Association* (IWA) vários indicadores do sistema de abastecimento de água, também apresentados por Alegre *et al.* (2018), que englobam todos os aspectos do sistema, de forma que as concessionárias possam ter maior controle dos processos e consigam melhores resultados nos serviços de abastecimento. No item subsequente são apresentados os indicadores de eficiências energética comumente utilizados.

3.1.1 Indicadores de Eficiência Energética

Os indicadores de desempenho dos serviços de abastecimento de água indicados por Alegre *et al.* (2018) são divididos nos seguintes grupos: Recursos Hídricos, Pessoal, Físicos, Operacionais, Qualidade do serviço e Econômicos e financeiros. Para a análise do sistema de bombeamento os indicadores importantes pertencem ao grupo Físicos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Indicadores do bombeamento.

Indicador	Equação
<i>Ph4</i> – Utilização da bomba em relação a um dado período de tempo (%)	
Capacidade de bombeamento residual do sistema para o dia de maior consumo de energia.	$Ph4 = D2 / (C7 \cdot 24) \cdot 100$
<i>Ph7</i> – Energia recuperada (%)	
Porcentagem do consumo total de energia para bombeamento recuperado usando bombas trabalhando como turbinas	$Ph7 = D5 / D1 \cdot 100$
<i>Ph6</i> – Consumo de energia reativa (%)	
Porcentagem do consumo total de energia para bombeamento que corresponde à energia reativa	$Ph6 = D4 / D1 \cdot 100$
<i>Ph5</i> – Consumo de energia padronizado (kWh/m ³ /100 m)	
Consumo médio de energia para o bombeamento de 1m ³ a cada 100 m de altura.	$Ph5 = D1 / D3$

Fonte: Alegre *et al.* (2018).

Nas equações apresentadas na Tabela 3.1, tem-se que:

C7 – Capacidade máxima de bombeamento operacional (kW);

D1 – Consumo de energia de bombeamento (kWh);

D2 – Máximo consumo de energia diário de bombeamento (kWh);

D3 – Fator de normalização do consumo de água (m³ . 100m);

D4 – Consumo de energia reativa (kVar);

D5 – Recuperação de energia (kWh).

Dentre todos os indicadores, o indicador “Utilização da bomba” é o único que representa a capacidade residual de bombeamento do sistema. Neste caso, é definida a razão da capacidade de bombeamento máxima já utilizada e a capacidade total instalada dos equipamentos do sistema, podendo desta forma aferir a capacidade residual de bombeamento para possíveis aumentos de demanda. Já os outros indicadores são indicadores de eficiência energética. O indicador “Energia Recuperada” é mais indicado para sistemas por gravidade que apresentam

“sobra” de energia, podendo se tratar de casos extremamente particulares, conforme sugerido por Monachesi (2005). O terceiro indicador, denominado “Consumo de energia reativa” é a razão entre a energia reativa e total consumida. A energia elétrica é composta por dois componentes: energia ativa e energia reativa, sendo que:

“Energia Ativa: É a energia capaz de produzir trabalho. A unidade de medida usada é o quilowatt-hora (kWh).

Energia Reativa: É a energia solicitada por alguns equipamentos elétricos, necessária à manutenção dos fluxos magnéticos e que não produz trabalho. A unidade de medida usada é o quilovar-hora (kVArh).” (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005)

A energia reativa é um elemento importante, todavia se os equipamentos apresentam valores excessivos pode ser prejudicial ao sistema elétrico, podendo aumentar a perda de energia por aquecimento e quedas de tensão, além de poder causar o superdimensionamento dos condutores elétricos. No entanto, na prática, este indicador não é aplicável, visto que os dados de energia reativa do equipamentos não são de fácil acesso.

Já o quarto indicador “Consumo de Energia Padronizado”, como apresentado por Monachesi (2005) divide a quantidade de energia consumida por m^3 de água distribuída a cada 100 metros de rede de distribuição. Essa padronização permite a comparação entre diferentes sistemas.

Os indicadores usualmente utilizados pelas companhias de saneamento brasileiras são:

- Custo unitário da energia adquirida da concessionária (R\$/MWh):

“tem por finalidade aferir com que eficiência a empresa/serviço está adquirindo energia, levando em conta que para elevatórias a partir de um certo porte (potência instalada) as concessionárias de energia elétrica oferecem vantagens no preço para compromissos de desligamento ou redução de consumo em determinadas horas do dia e/ou do ano.” (Monachesi, Monteiro e Rocha, 2001, pag.16)

- Indicadores de energia consumida pelo volume de água bombeado (kWh/ m^3):

“Este parâmetro mede o desempenho dos equipamentos de bombeamento do sistema em termos de rendimento, além da concepção do próprio sistema, uma vez que valores elevados deste indicador podem significar perdas de carga excessivas nas linhas de recalque ou má concepção de zonas de pressão (excesso de bombeamento), dentre outras possibilidades.” (Monachesi, Monteiro e Rocha, 2001, pag.16)

Este último indicador apresentado, pode ser muito útil para analisar as atividades de um sistema ou uma elevatória ao longo de sua vida útil. Porém, quando é utilizado para comparar diferentes sistemas pode gerar análises irrealistas, visto que os sistemas apresentam características físicas distintas. Nesse caso, é interessante o uso do indicador da IWA “Consumo de Energia Padronizado”, que como já exemplificado padroniza o total de energia consumido por m³ por 100 metros de rede.

3.2 Medidas de Eficiência Energética

Várias medidas estudadas na literatura podem aumentar a eficiência energética dos sistemas de distribuição de água (MALA-JETMAROVA *et. al.*, 2018). Algumas medidas comumente vistas são: substituição dos conjuntos motobomba, controle de pressão e geração de energia no sistema, e operação com rotação variável.

3.2.1 Substituição do Conjunto Motobomba

Os Sistemas de Abastecimento de Água apresentam um comportamento dinâmico, tanto para uma análise de curto prazo, como para longo prazo. Desta forma, é necessário que sejam sempre monitorados durante todo o período em que estiver em operação, principalmente os sistemas que dependem dos conjuntos motobomba para dar-se a distribuição de água. Existem várias causas recorrentes nos SAA associadas aos conjuntos motobombas, que reduzem a eficiência energética do sistema (COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, 2014), dentre elas estão:

- Superdimensionamento dos conjuntos;
- Conjuntos motobomba trabalhando fora do ponto ótimo de operação;
- Redução da eficiência energética devido ao desgaste dos equipamentos.

Como exposto por Mala-Jetmarova *et al.* (2018), o constante crescimento populacional nas áreas urbanas, deixam os SAA defasados, sendo necessárias complementações, tais como o fortalecimento com instalações de tubulações em paralelo, a reabilitação através da limpeza e alteração do revestimento das tubulações, e expansão da malha de distribuição. Todas as possibilidades citadas necessitam também da reavaliação do sistema de recalque, que provavelmente opera com as bombas funcionando fora do melhor ponto de operação, equipamentos desgastados, ou ambos.

Em consonância com as causas de ineficiência energéticas dos sistemas de abastecimento de água no Brasil, foi promulgada a Portaria nº 455/2010 que estabelece os “Requisitos de Avaliação da Conformidade para as Bombas e Motobombas”. Assim, instituiu-se um mecanismo de etiquetagem, com a aplicação da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE. O mecanismo de etiquetagem visa:

“... à eficiência energética através da comparabilidade entre todos os produtos comercializados de uma linha de produtos, anualmente, de forma a situar o consumidor sobre o desempenho dos produtos, nas diversas faixas de vazão e pressão (altura manométrica) disponíveis com os seus respectivos consumos de energia.” (Portaria nº 455, 2010, Anexo I, pag. 1)

O mecanismo de etiquetagem é composto por quatro etapas, descritas a seguir:

- **Primeira Etapa – Solicitação de Etiquetagem e Análise de Documentação:** a empresa deve solicitar a ENCE e os documentos solicitados são encaminhados ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro;
- **Segunda Etapa - Comparação Interlaboratorial:** o fornecedor do conjunto motobomba ou bombas centrifugas encaminha todos os componentes para laboratório acreditado que realiza testes, e em seguida encaminha os resultados da comparação ao Inmetro;
- **Terceira Etapa – Concessão:** se os resultados forem aprovados na comparação interlaboratorial, o fornecedor deve encaminhar a Solicitação de Etiquetagem ao Inmetro;

- **Quarta Etapa – Avaliação da Manutenção da Conformidade do Produto:** visando verificar a manutenção dos equipamentos etiquetados, o Inmetro e Eletrobrás/PROCEL definem os modelos de conjuntos que deverão ser submetidos a ensaios a cada ano.

Pela etiquetagem seguindo o ENCE, nota-se que existem cinco classificações, classe A a E, sendo que a classe A engloba os produtos mais eficientes e a classe E se refere àqueles com menores eficiências, conforme apresentado na Figura 3.2.

Energia (Elétrica)		MOTOBOMBAS CENTRÍFUGAS
Fabricante		ABCDEF
Marca		XYZ(Logo)
Tipo		ABCDFGH
Modelo/Monofásico-Trifásico		IPQR/M-T
Mais eficiente 		
Menos eficiente		
CONSUMO DE ENERGIA (kWh/h) RENDIMENTO DO CONJUNTO (%) RENDIMENTO DA BOMBA (%)		XYZ XYZ XYZ
Vazão (m³/h)		000
Altura Manométrica (m.c.a)		000
Rotação Corrigida (rpm)		000
Diâmetro do rotor (mm)		000
<small>Requisitos: Para Uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia Bombas Centrífugas</small>		
IMPORTANTE: A REMOÇÃO DESTA ETIQUETA ANTES DA VENDA ESTÁ EM DESACORDO COM O CÓDIGO DE DEFESA DO CONSUMIDOR		

Figura 3.2 – Modelo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, 2010.

Fonte: Brasil, 2009.

Conforme apresentado por Brasil (2010) a determinação da classe das bombas é feita inicialmente através da separação dos tipos de bombas mais utilizadas no Brasil, e em seguida é calculado o rendimentos mínimo de cada classe. No caso, é utilizada a rotação específica (N_s) como parâmetro de comparação, através da Eq. (3.1)

$$N_s = n \frac{Q_{BEP}^{1/2}}{\left(\frac{H_{BEP}}{Z}\right)^{3/4}} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Sendo que:

n – rotação nominal (rpm);

Q_{BEP} – vazão do melhor ponto de operação (m^3/s);

H_{BEP} – altura manométrica do melhor ponto de operação (mca);

z – número de estágios da bomba.

Para determinar o rendimento mínimo da bomba, é utilizada a Eq (3.2), definida por Stoffel e Lauer (1994):

$$\eta_r = -11,48x^2 - 0,85y^2 - 0,38xy + 88,59x + 13,46y - c \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Em que:

η_r – rendimento de referência (%);

$x = \ln(N_s)$, N_s (min^{-1});

$y = \ln(Q_{BEP})$, Q_{BEP} em (m^3/h);

c – constante em (%) que define a classificação da bomba.

A constante c é definida para cada tipo de bomba pelo Inmetro, de forma que cada classe contenha aproximadamente o mesmo número de bombas.

Pela Eq. 3.2 é definida a eficiência mínima para cada classe e tipo de bomba, considerando os intervalos de valores da Q_{BEP} e N_s . Assim, a classe da bomba é definida considerando o rendimento mínimo calculado pela Eq. (3.2) e o rendimento obtido no ensaio da bomba, seguindo os seguintes critérios apresentados no Tabela 3.2. O η_r (%) é o rendimento referência calculado pela Eq. 3.2 e η_{BEP} (%) é o rendimento declarado pelo fabricante.

Tabela 3.2 – Critérios para definição da classe do conjunto motobomba

Classe da Bomba	Critério
Classe A	$\eta_{BEP} \leq \eta_{r A}$
Classe B	$\eta_{r B} \geq \eta_{BEP} > \eta_{r A}$
Classe C	$\eta_{r C} \geq \eta_{BEP} > \eta_{r B}$
Classe D	$\eta_{r D} \geq \eta_{BEP} > \eta_{r C}$
Classe E	$\eta_{BEP} > \eta_{r D}$

Fonte: BRASIL (2009).

3.2.2 Controle de Pressão e Geração de Energia

O controle da pressão ao longo da rede é muito importante pois está diretamente relacionado com o volume de vazamento de água, e consequentemente com perdas energéticas (COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, 2014; SHEKOFTEH *et. al.*, 2020). A Figura 3.3 apresenta um gráfico que mostra os resultados de vários experimentos realizados pela Water Research Center, publicado em 1985, que investigaram a relação da pressão de serviço e os índices de vazamentos apresentados nas redes de distribuição de água.

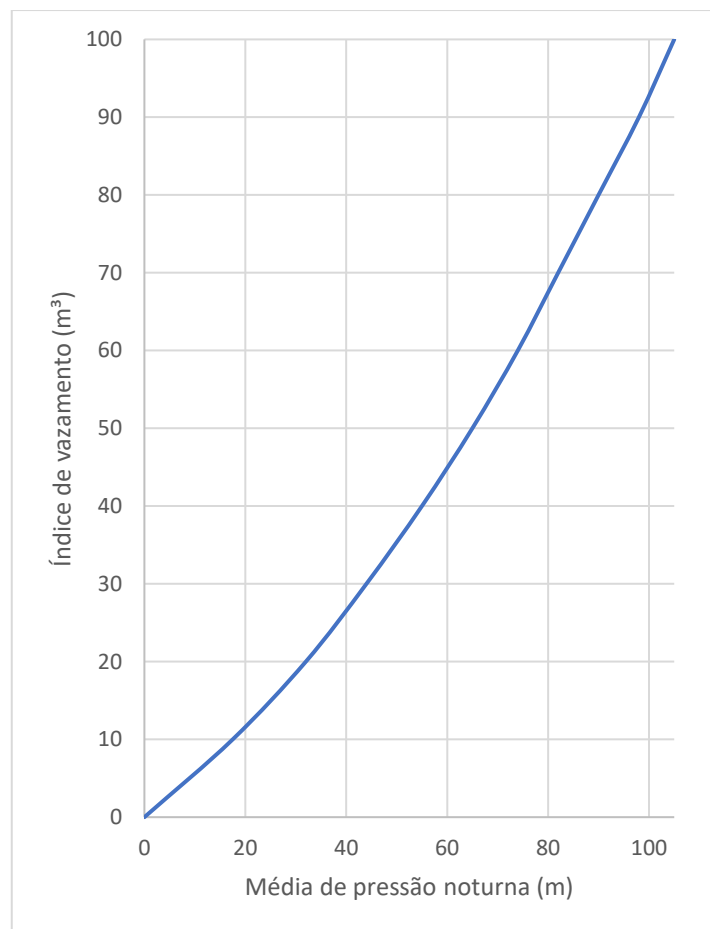


Figura 3.3 – Relação entre vazamento e pressão.

Fonte: WRC – Water Research Center, 1985.

O trabalho apresentado por Shekofteh *et. al.* (2020) apresenta uma metodologia de controle de vazamento em que utiliza a teoria dos grafos e rede neural artificial (RNA). A metodologia aplicada consiste em decompor uma rede de grande escala em grupos, e encontrar os grupos com os maiores vazamentos. O primeiro passo é dividir a rede em dois, pela teoria dos grafos,

que foi aplicada através do algoritmo Girvan–Newman. O segundo passo é, através do treinamento de uma RNA, de acordo com os dados gerados pelo simulador hidráulico, determina qual das duas partes tem mais vazamento. No método proposto, os vazamentos são detectados em cada parte usando os registradores de dados de pressão disponíveis e RNA. O processo para detecção do vazamento é feito diversas vezes, até chegar a uma área de estudo relativamente pequena no alcance da rede. A metodologia foi aplicada em uma rede existente e apresentou boa precisão na detecção de vazamentos.

Também exposto por Coelho e Andrade-Campos (2014), entre as melhores formas de melhorar a eficiência energética dos sistemas, a operação eficiente das estações elevatórias e o controle das pressões nas redes podem apresentar conflitos. Isto porque a operação eficiente das bombas ocasiona em maior tempo de funcionamento durante a noite, podendo aumentar a pressões na rede nesse período, e conseqüentemente o volume de vazamentos no período. Considerando o exposto anteriormente, os autores apresentaram um modelo híbrido de otimização, que permite a operação inteligente das bombas e válvulas redutoras de pressão, que apresentaram resultados promissores na redução das perdas de água nos sistemas.

Outra vertente que tem sido apresentada em diversos trabalhos é a utilização de microturbinas, possibilitando a cogeração de energia nos sistemas de distribuição de água (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014; MALA-JETMAROVA *et. al.*, 2018). O trabalho desenvolvido por Lima *et. al.* (2017) propõe um método de seleção e localização de Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs), de forma que o objetivo da otimização foi maximizar os benefícios através da maior produção de energia e menor volume de vazamento na rede. Os resultados foram favoráveis para a cogeração de energia mas constataram que BFTs pequenas podem apresentar poucos benefícios. Outro trabalho que seguiu a linha do aproveitamento energético em SAAs foi o apresentado por Irene e Aonghus (2020), que fizeram a otimização da quantidade de BFTs e sua localização por uma nova metodologia *Nonlinear Programming* (NLP). Os resultados mostraram que das cinco redes avaliadas, apenas duas apresentaram potencial viabilidade para instalação das BFTs, recuperando entre 43 kWh e 232 kWh de energia.

3.2.3 Operação com Rotação Variável

A utilização de bombas com rotação variável tem ganhado a cada dia mais notoriedade, pois tem apresentado maiores atrativos econômicos e ambientais. Entretanto, com o exposto por Monachesi (2005), a utilização dos conversores de frequência para variação da rotação das bombas pode não apresentar vantagens econômicas, devido ao custo do equipamento, que pode não ser compensado pela economia de energia. Além dos custos de aquisição, existem os custos de implantação do controle e automação do sistema. (MONACHESI, 2005). No entanto, os equipamentos tem se apresentado cada dia mais tecnológicos, ganhando cada vez mais espaço na aplicação do saneamento. Vale ressaltar, a importância de um estudo econômico em que faz-se o comparativo entre a alternativa utilizando o equipamento, e outra não, avaliando se existem vantagens com a economia de energia.

Como elencado por Coutinho e Soares (2017), bombas com rotação variável são equipadas com inversores de frequência, que alteram a frequência do sinal elétrico, podendo assim, a bomba trabalhar com velocidade de rotação variável. A operação com diferentes velocidades de rotação, se assemelha à operação de bombas com diferentes curvas características e com desempenhos diferentes. Para determinar estas alterações, pode ser aplicado o conceito da hidráulica básica, a “teoria de semelhança”, em que “parte-se da suposição de que máquinas geometricamente semelhantes trabalham em condições de semelhança, desde que tenham o mesmo rendimento” (PORTO, 2006, pag. 135). As Equações (3.3) a (3.5) apresentam as relações de semelhança:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{Eq. (3.3)}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad \text{Eq. (3.4)}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad \text{Eq. (3.5)}$$

Em que:

Q - Vazão da bomba (m³/s);

H – Altura manométrica da bomba (m);

P – Potência da bomba (W);

N - velocidade de rotação da bomba (rpm).

Como pode ser observado na Figura 3.4, a curva de eficiência (η) versus coeficiente adimensional de vazão (C_Q) não se altera em função da velocidade de rotação, mas há alteração na curva de eficiência (η) versus vazão (Q) (COUTINHO; SOARES, 2017). Como explicado por Simpson e Marchi (2013), a lei de semelhança apresentada pela hidráulica básica não leva em consideração os fatores que se ajustam com a velocidade de rotação, e que a magnitude destas diferenças depende do tamanho da bomba. Desta forma, desconsidera-se erros que podem ser relativamente significativos ao sistema, como para os casos da eficiência das bombas de menor porte.

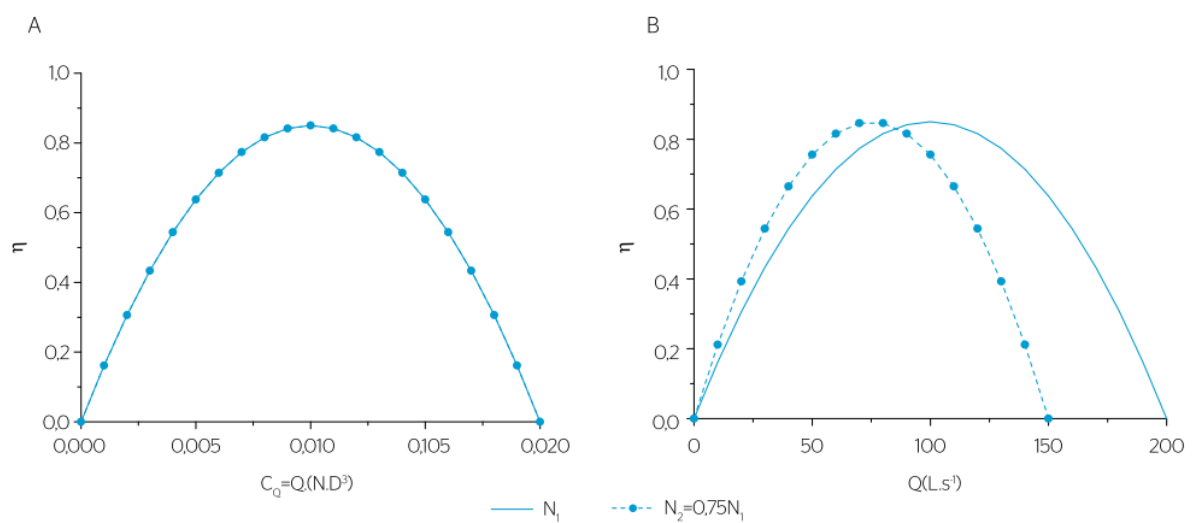


Figura 3.4 – Curva de eficiência em duas velocidades de rotação: (A) $\eta \times C_Q$; (B) $\eta \times Q$.

Fonte: Coutinho e Soares (2017).

Considerando a diferença da eficiência devido a mudança da rotação da bomba apontada anteriormente, várias pesquisas apresentaram métodos para encontrar a eficiência que a bomba de fato estaria operando com a nova rotação, como a utilização de métodos gráficos para definir a nova curva, e um método que relaciona a nova eficiência com a eficiência original e a velocidade de rotação da bomba (MORTON, 1975; SÁRBU; BORZA, 1998). Uma abordagem apresentada por Gulich (2003) utiliza o número de Reynolds como parâmetro para fazer a relação com a nova curva da bomba. De acordo com Gulich (2003), a eficiência das bombas centrífugas pode ser afetada por várias maneiras, que dependem da viscosidade do fluido, do tamanho da bomba, velocidade e rugosidade. Desta forma, a Eq. (3.6) apresenta a eficiência das

bombas geometricamente semelhantes em função do número de Reynolds (Eq. 3.7) e da rugosidade.

$$\frac{1-\eta_2}{1-\eta_1} = K + (1 - K) \left(\frac{Re_1}{Re_2} \right)^m \quad \text{Eq. (3.6)}$$

$$Re = VD / \nu \quad \text{Eq. (3.7)}$$

Em que:

Re – número de Reynolds (adimensional);

V – velocidade de escoamento do fluido na tubulação (m/s);

D – diâmetro (m);

ν – viscosidade cinemática do fluido (m²/s);

Re_1 - número de Reynolds para velocidade de rotação N_1 ;

η_1 – eficiência para velocidade de rotação N_1 ;

Re_2 - número de Reynolds para velocidade de rotação N_2 ;

η_2 – eficiência para velocidade de rotação N_2 ;

K – perdas (adimensional);

m – expoente de relação entre os número de Reynolds para duas velocidades distintas.

Como descrito Simpson e Marchi (2013), quando assume-se que as perdas são independentes do número de Reynolds, ou seja, $K=0$, que m é igual a 0,1, e que a razão entre R_1/R_2 é substituída pela razão entre as velocidades de rotação (N_1/N_2), então a Eq (3.6) pode ser reescrita como apresentado por Sauby e Borza (1998) (Eq. 3.8):

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{0,1} \quad \text{Eq. (3.8)}$$

Simpson e Marchi (2013), utilizando a Eq. (3.8), analisou os resultados previstos de eficiência para redução da rotação. Como pode ser observado na Figura 3.5, a eficiência prevista mostra-se quase igual à original se o ponto tiver a eficiência elevada e apresentar velocidade relativa acima de 0,7. Porém, se a eficiência estiver abaixo de 0,5, a fórmula prevê uma eficiência menor para a n_2 , mesmo se apresentar uma pequena redução na velocidade. Nota-se também, que

valores da relação de N_2/N_1 acima de 50% apresentam melhores resultados para a eficiência da segunda rotação, com menor alteração. Em consonância com o exposto, Lidstedt e Karvinen (2016) recomenda trabalhar com a razão da variação das rotações acima de 50%.

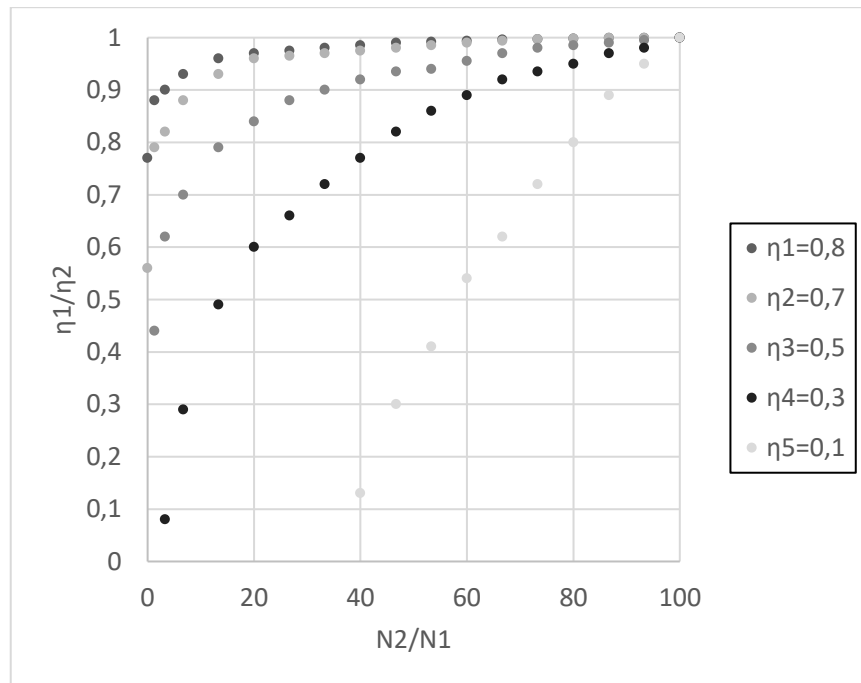


Figura 3.5 – Predefinição da eficiência η_2/η_1 em função da redução da velocidade de rotação N_2/N_1 e a eficiência η_1 para rotação N_1 .

Fonte: Simpson e Marchi (2013).

A utilização das bombas com rotação variável deve ser bem analisada, e aplicada de forma planejada para que se obtenha vantagens econômicas. Como apresentado por Coelho e Andrade-Campos (2016), o interesse pelo uso de bombas com rotação variável tem ganhando notoriedade nos últimos anos, isto devido ao aumento da preocupação com a sustentabilidade e eficiência do sistemas. Além disso, a tecnologia tem ganhado cada vez mais espaço na área do saneamento, devido a diversas vantagens que podem trazer, dentre elas as descritas na sequência obtidas de Creaco *et al.* (2019), Lidstedt e Karvinen (2016) e Lingireddy e Wood (1998):

- As pressões podem ser mantidas nos níveis muito próximos aos valores exigidos pela legislação;
- As perdas de água por vazamento poderão ser minimizadas;

- O tempo de operação da bomba pode ser controlado, sendo que o uso fora do horário de pico poderá ser priorizado, reduzindo seu custo operacional;
- Os fluxos nos tanques de abastecimento poderá ser controlado, podendo ser importante para manter a qualidade da água;
- Melhores respostas a situações de emergências, como demanda de incêndios e, rompimento de tubulação;
- Os transientes hidráulicos ocasionados pelas paradas das bombas podem ser atenuados;
- Permite fazer um controle da vazão distribuída no sistema.

Em consonância com o apresentado, foi estudada na Tese de Rodrigues (2007) duas instalações de bombeamento em que fazem um comparativo entre vantagens, desvantagens, possibilidades e limitação da utilização dos conversores de frequência. Após a realização de todos os procedimentos da pesquisa constatações importantes foram feitas, como a necessidade de entendimento da instalação desta tecnologia, sendo necessário considerar inicialmente o sistema de tarifação e as características da unidade (topologia, rotina operacional, curva real do sistema, curva real da bomba, rendimento real, ponto de operação, pontos críticos, limitações, etc.). Como foi explanado, a avaliação prévia da utilização do inversor de frequência em um sistema de bombeamento mostra-se necessária, visto que a utilização pode não trazer os ganhos energéticos desejados em um sistema que não seja compatível a tecnologia.

A Tese desenvolvida por Lubienska (2007), motivada pelos altos custos energéticos que as estações de bombeamento geram as concessionárias de saneamento e a tendência de novas tecnologias trazerem grandes economias energéticas, buscou otimizar a operação de bombas com rotação variável. Na pesquisa, foi aprimorado o Modelo Híbrido Multiobjetivo, inicialmente proposto por Ribeiro (2002), que mostrou-se muito consistente, sendo possível extrair roteiros operacionais para as bombas com rotação variável.

No trabalho realizado por Creaco *et. al.* (2019) é feita uma revisão bibliográfica com o atual estado da arte do controle em tempo real (*real time control* - RTC) das SAA. Nele, são apresentados os principais sistemas de controle: controle de pressão de serviço, válvulas de controle de pressão; bombas com velocidade de rotação variável, controle do nível de água nos

tanques e controle de pressão de serviço e maximização da produção de energia usando controle de fluxo. Na comparação realizada entre o uso de válvulas redutoras de pressão (VRP) e bombas com rotação variável, constata-se que a utilização das bombas permite um melhor controle do consumo de energia, reduzindo os gastos das companhias de saneamento a longo prazo.

Na pesquisa realizada por Abdallah e Kapelan (2019) justificada pelo custos energéticos elevados das estações elevatórias, devido ao aumento das exigências dos padrões da qualidade da água, fez-se a otimização simultânea da qualidade da água (cloro residual) e dos custos com a energia do sistema. A otimização feita pelo método denominado *iterative Lexicographic Goal Programming* (iELGP), analisou bombas com rotação fixa e variável, que apresentaram redução dos custos e melhora na qualidade da água para bombas com rotação variável. Vários outros artigos na literatura utilizaram como método para aumentar a eficiência energética no processo de distribuição de água bombas com rotação variável. (BENE; HOS, 2012; COELHO, BERNARDETE; ANDRADE-CAMPOS, 2016; COUTINHO; SOARES, 2017; SANTO; COUTINHO; SOARES *et. al.*, 2020)

3.3 Métodos de Otimização Aplicados à Operação dos Sistemas

3.3.1 Métodos Meta-Heurísticos

Em um sistema de abastecimento de água existe uma infinidade de possibilidades de locação e operação das estações elevatórias, podendo ser adotado os métodos convencionais para selecionar a melhor alternativa, como o método de tentativa e erro. A aplicação deste método apresenta dificuldades devido a complexidades que os SAA apresentam, podendo ter infinitas possibilidades de operação, dimensionamento e vários tipos de dispositivos a serem implantados (COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, 2014). Desta forma, os métodos de otimização computacional têm sido amplamente aplicados para solução de problemas da Engenharia Hidráulica, conforme exposto por Mala-Jetmarova *et. al.* (2018).

Por se tratar de problemas mais complexos, que envolvem mais de uma variável e equações não-lineares, a aplicação de técnicas de otimização convencionais se torna pouco eficiente, como o caso do *Linear Programming* (LP), *Nonlinear Programming* (NLP), *Integer Nonlinear Programming* e *Dynamic Programming*. Desta forma, o uso de técnicas meta-heurísticas tem

sido amplamente aplicadas. Essas técnicas, como apresentado por Brownlee (2011), estão inseridas no conceito da Inteligência Computacional bio-inspirada, que pode ser descrita como técnicas que concentram-se em estratégias e resultados, que abrange amplamente os sistemas adaptativos e de inteligência. Os métodos meta-heurísticos podem ser divididos em dois grandes grupos, os algoritmos de base populacional e os métodos baseados em pontos únicos. Ganha-se cada vez mais destaque os algoritmos de base populacional, que são: Algoritmo Genético (AG)(MONTANA; DAVIS, 1989), *Particle Swarm Optimization* (PSO)(EBERHART, R.; KENNEDY, 1995), Colônia de Formigas (DORIGO *et. al.*, 1996), Colônia Artificial de Abelhas (KARABOGA; BASTURK, 2007), etc.

Conforme exposto por Mala-Jetmarova *et. al.* (2018) os algoritmos meta-heurísticos que ganharam mais força ao longo do anos foram o AG e PSO, por apresentarem robustez e velocidade de processamento. Os algoritmos PSO e AG vêm sendo amplamente comparados na resolução de problemas da Engenharia Hidráulica acoplados ao *software* EPANET (EBERHART; SHI, 2001; MAIER *et al.*, 2014).

O PSO, algoritmo aplicado na pesquisa desta Dissertação, foi proposto por Eberhart e Kennedy (1995), é baseado no comportamento coletivo de animais, e apresenta natureza estocástica, ou seja, existe uma aleatoriedade nas soluções obtidas. Já o AG é baseado na evolução biológica, de forma que os cromossomos dos indivíduos mais adaptados transmitem suas características para as gerações seguintes (Simpson *et. al.*, 1993). Em cada algoritmo, a solução é obtida através da melhoria de uma característica populacional, como por exemplo o cromossomo dos indivíduos mais adaptados no AG, e a posição das partículas mais próximas do alimento do PSO.

Vários trabalhos utilizaram o AG para otimização dos SAA, como por exemplo na otimização da localização de válvulas de controle (REIS *et. al.*, 1997), dimensionamento das redes (ANDRADE *et al.*, 2016; KANG; LANSEY, 2012), e otimização da operação de bombas (BOULOS *et. al.*, 2001; OLSZEWSKI, 2016). O PSO também apresentou vários trabalhos que otimizam a operação das unidades dos SAA, o dimensionamento, locação dos dispositivos, entre outros (BRENTAN; LUVIZOTTO, 2014; TANG *et. al.*, 2014; ZHANG *et. al.*, 2012). No item seguinte são apresentados alguns trabalhos da literatura com mais detalhes.

Os métodos meta-heurísticos, por serem métodos irrestritos, exigem a aplicação de funções de penalidade na função objetivo. Assim pode-se resolver os problemas sem violar as restrições dos sistemas (MARCHIORI *et al.*, 2017). Como apresentado por Yeniay (2005) existem diversos métodos para aplicar a penalização. Alguns exemplos são: Fatal (rejeita as soluções inviáveis); Estática (um valor constante é adicionado as soluções inviáveis); Dinâmica (a penalização varia de acordo com as soluções inviáveis apresentadas); Adaptativo (o coeficiente de penalização varia de acordo com cada população apresentada); entre muitos outros métodos apresentados.

Para os SAA normalmente aplicam-se restrições relacionadas à hidráulica, limites normativos e pressões do sistemas. O trabalho realizado por Marchiori *et al.* (2017) analisa oito funções de penalização aplicadas nos algoritmos AG e PSO, em duas redes de distribuição de água, e ressaltou a importância da escolha de métodos adequados, pois como também apresentado por Wu e Simpson (2002), se o método aplicado estiver impondo altas penalizações podem criar barreiras no espaço de busca, e se as penalizações forem muito baixas podem gerar soluções que não são viáveis.

3.3.2 Exemplos de Estudos de Caso

A questão energética tem sido alvo em várias pesquisas apresentadas na literatura, em virtude da importância dos impactos econômicos e ambientais a que está associada. Nos últimos anos, vários métodos de otimização foram testados e aplicados, para minimizar os custos energéticos da operação dos sistemas de abastecimentos de água. Desta forma, este capítulo apresenta um compilado de vários trabalhos da literatura que aplicaram métodos de otimização nas variáveis dos SAA. (ABDALLAH; KAPELAN, 2019; BENE; HOS, 2012; BRENTAN, B. M.; LUVIZOTTO, 2014; COELHO, BERNARDETE; ANDRADE-CAMPOS, 2016; GIACOMELLO; KAPELAN; NICOLINI, 2013; FILHO *et al.* 2017; ODAN *et al.*, 2015)

Giustolisi *et al.* (2013) investigou a importância dos vazamentos de água nos custos de operação. Desta forma, fizeram um comparativo dos custo com a água não lucrativa e os custos com a energia. Mostram que a redução de vazamentos conflita com o custo de energia. Os resultados apontam que algumas pesquisas negligenciam a importância que os custos com a perda de água tem no sistema, isto porque a prática de preencher o tanques durante a noite

devido ao menor nível de demanda e à tarifa de eletricidade, podem aumentar os custos devido à perda de água por vazamentos.

Giacomello *et. al.* (2013), objetivando melhorar a aplicação do Sistema de Controle de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), propôs a resolução do problema da operação das bombas pelo método de otimização híbrido, em que usa a Programação Linear (LP) e um *greedy algorithm* (LPG). A metodologia foi aplicada em dois estudos de caso: uma referência artificial da rede *Anytown* e o problema real de programação das bombas da rede de distribuição de água de Richmond no Reino Unido. Os resultados apontaram que, diferentemente da otimização através do AG, o número de bombas no sistema de distribuição de água aparenta não afetar de forma relevante o tempo computacional de otimização da operação das bombas. Esse fator, foi demonstrado através do comparativo de tempo entre as duas redes analisadas, em que a rede Richmond tem aproximadamente o espaço de busca 10^{29} maior que da rede *Anytown*, e ainda assim, o aumento no tempo computacional para resolver o problema de programação foi desprezível, 3 s para Rede Richmond e 2 s para rede *Anytown* para o método LP. Destacaram ainda a importância de pesquisas mais aprofundadas aplicando o modelo híbrido proposto para confirmar a hipótese apresentada.

Preocupados com a aplicabilidade dos modelos de otimização apresentados pela literatura, Coelho e Andrade-Campos (2016) propõem um método para prever a curva de eficiência de bombas de velocidade de rotação variável, que apresentaram resultados satisfatórios para prever o comportamento das bombas, através de ferramentas de modelagem. Os autores utilizam o método de otimização apresentado por Coelho e Andrade-Campos (2013), que desenvolveram uma ferramenta que processa as informações de cada rede disponibilizada pelo usuário e as envia automaticamente para um módulo de otimização conectado ao simulador hidráulico EPANET 2.0. O algoritmo de otimização utilizado foi o Evolução Diferencial (ED), algoritmo evolutivo meta-heurístico, inicialmente introduzido por Storn e Price (1997).

O trabalho apresentado por Abdallah e Kapelan (2019) otimiza, através do algoritmo *iterative Extended Lexicographic Goal Programming* (iELGP), a operação das bombas e qualidade da água. Kurek e Ostfeld (2014) também utilizam um modelo multiobjetivo para o equilíbrio entre custo de bombeamento e qualidade da água para operação de sistemas de distribuição de água.

O algoritmo utilizado é o AG do tipo SPEA2 em que otimiza duas funções objetivo, uma que minimiza o custo de operação das bombas do sistema e outra que faz o controle de qualidade da água.

Frente a esses trabalhos, nota-se que existem avanços na pesquisa no ramo da otimização dos SAA nas últimas décadas. Como apresentado na Tabela 3.3, a preocupação com a eficiência dos sistemas de abastecimentos de água tem sido resolvida como um problema de otimização já há vários anos na engenharia hidráulica, mas ainda abordadas nos trabalhos mais recentes.

Tabela 3.3 – Resumo de pesquisas que otimizaram a operação das bombas nos sistemas de abastecimento de água

Referência	Resumo
(WEGLEY; <i>et. al.</i> , 2000)	Este artigo apresenta a otimização da operação de um SAA, considerando minimizar os custos operacionais do sistema, pelo PSO. Consideraram bombas com velocidade de rotação variável, objetivando manter os níveis dos tanques e pressões do sistema em valores aceitáveis. O objetivo da pesquisa era entender a aplicação que o algoritmo PSO tem nos problemas de otimização das engenharia hidráulica, e conclui-se que é interessante a aplicação visto que otimiza os resultados e por ser intuitivo e fácil de configurar.
(LANSEY; AWUMAH, 1994)	O trabalho apresenta um modelo de pré-otimização que otimiza o período de operação das bombas, sendo que o número de bombas e o número de vezes que as bombas são desligadas foram variáveis limitantes do método. O resultados mostraram que a otimização tem forte relação com a operação dos tanques de abastecimento, e que resultados melhores de otimização da operação das bombas poderiam ser encontrados, se fossem feitas análises para horizontes de planejamento maiores.
(LINGIREDDY; WOOD, 1998)	Apresenta a otimização de bombas com velocidade de rotação variável, através do Algoritmo Genético. A bomba com velocidade de rotação variável é trazida como uma tecnologia que pode trazer grandes vantagens as redes de distribuição de água. Foram aplicados três exemplos, que através dos resultados gerados mostraram ganhos com a flexibilização operacional das bombas. Salientam sobre a necessidade de pesquisas que abordem a ampla gama de fatores que devem ser considerados na operação das bombas.
(ORMSBEE; LANSEY, 1994)	O artigo traz um resumo de várias pesquisas que utilizam a otimização aplicada na operação das bombas. É feito um comparativo do número de tanques, modelo hidráulico, modelo de demanda e algoritmo de controle. O artigo enfatiza que na época não haviam muitos trabalhos que implementassem a tecnologia de rede neural no desenvolvimento de estratégias de controle otimizados. Também ressalta a pouca ênfase dada em projetos de operação dos sistemas, principalmente devido a robustez de operação.

Na literatura são encontrados vários outros trabalhos que utilizam a otimização através dos método meta-heurísticos nos SAA, em que otimizam o dimensionamento das redes (ANDRADE *et al.*, 2016; PRASAD, 2010), a operação em tempo real (DÖTSCH *et al.*, 2010; RAO; SALOMONS, 2010), predição da demanda de água (BARNETT *et al.*, 2004; CUTORE *et al.*, 2008), otimização dos sistemas com produção de energia (FERNÁNDEZ GARCÍA; MC NABOLA, 2020; LIMA *et al.*, 2019), entre outros.

Através do AG, Prasad (2010) fez o dimensionamento dos tubos, bombas e tanques, minimizando os custos totais, que inclui custo do capital e custo de energia. No método apresentado, como diferencial, a simulação foi realizada para um período prolongado e o dimensionamento dos tanques não foi feito considerando explicitamente algumas restrições operacionais, como os limites dos níveis máximos e mínimos de água. A metodologia foi aplicada na rede *Anytown*, e apresentou custos 15% menores que outras metodologias aplicadas para a mesma rede. A comparação dos resultados obtidos com os publicados na literatura mostram a vantagem da utilização do modelo proposto na obtenção de soluções ótimas ou quase ótimas.

Já Zheng *et al.* (2017) resolveram problemas de dimensionamento das redes de abastecimento de água pelo Algoritmo de Colônia de Formigas, em que propõem uma estratégia adaptativa de parâmetros inovadores para algoritmos de otimização de colônia de formigas, objetivando melhorar o desempenho do algoritmo quando aplicado nas redes de abastecimento reais. A eficácia da metodologia foi comprovada aplicando em seis SAA. O trabalho apresentado por Ostfeld e Tubaltzev (2008), também aplicou o Algoritmo de Colônia de Formigas para otimizar o dimensionamento dos tubos e a operação do sistema de abastecimento, visando os menores custos. O trabalho tinha como principal objetivo o entendimento da funcionalidade do Algoritmo de Colônia de Formigas nos SAA, indicando ponderações quanto à aplicação, pontuando os bons resultados apresentados devido a boa calibragem feita.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Dimensionamento de Estação Elevatória

Para o dimensionamento das Estações Elevatórias pela rotina computacional desenvolvida, foram considerados os mesmos passos que na prática são utilizados, que são:

- Definir os pontos a serem atendidos pela linha de recalque que está sendo projetada
- Calcular a perda de carga localizada no sistema;
- Calcular a perda de carga contínua nas tubulações;
- Calcular a altura manométrica (desnível geométrico + perda de carga localizada + perda de carga contínua);
- Definição da demanda de projeto (Vazão);

Feito todos esses passos é definida a bomba que melhor se ajustará ao sistema. As bombas escolhidas pelo algoritmo terão eficiência definidas de acordo o apresentado no item 4.1.1. Além disso, a seleção da bomba, como será melhor exemplificado a frente, teve como base os menores custos operacionais, custo com a energia e perda de água, mas focando no atendimento das condições de operação. Desta forma, os princípios em comum da otimização das redes analisada na pesquisa em questão são:

- Garantir o abastecimento da demanda;
- Controlar pressões mínimas pré-definidas para cada rede;
- Minimizar energia consumida na operação;

Além desses, tem-se como objetivo minimizar as perdas de água por vazamentos, que foi utilizado como critério apenas em duas das três redes analisadas.

Importante mencionar, no entanto, não foi foco da pesquisa o impacto que a operação das estações elevatórias teriam na operação das ETA. A forma como a bomba será operada poderia ocasionar na necessidade de instalação de um reservatório de armazenamento na área da ETA.

4.1.1 Características da bomba

O Inmetro classificou as bombas centrífugas de acordo com sua respectiva eficiência em cinco categorias (BRASIL, 2010), conforme apresentado no item 3.2.1. Um total de 1.600 foram classificadas, sendo que 346 (21,6%) estão no melhor grupo. No entanto, as características das bombas (vazão e altura manométrica) de cada grupo permanecem dispersas. A velocidade específica de cada bomba (Eq. 4.1) é calculada na tentativa de encontrar uma correlação com sua eficiência, conforme mostrado na Figura 4.1 (a). O resultado não é satisfatório, em que apresentou o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,61, mostrando que a correlação apresentada não é alta. E uma nova correlação utilizando a vazão foi testada, como apresentado na Figura 4.1 (b). Pode ser observado um melhor ajuste entre as duas variáveis na curva logarítmica ($R^2 = 0,82$), e a curva resultante é representada pela Eq. (4.2). Um comportamento similar foi observado quando a curva obtida na Figura 4.1 (b) é comparada com a Eq. (4.3), apresentada por Stoffel e Lauer (1994), para estimar a eficiência das bombas disponíveis no mercado europeu.

$$N_s = \frac{\sqrt{Q_{BEP}}}{\left(\frac{H_{BEP}}{Z}\right)^{3/4}} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

$$\eta = 12.81 \cdot \ln(Q_{BEP}) + 11.62 \quad \text{Eq. (4.2)}$$

$$\eta = -11.48 \cdot [\ln(N_s)]^2 - 0.85 \cdot [\ln(Q_{BEP})]^2 - 0.38 \cdot \ln(N_s) \cdot \ln(Q_{BEP}) + 88.59 \cdot \ln(N_s) + 13.46 \cdot \ln(Q_{BEP}) \quad \text{Eq. (4.3)}$$

Nas quais N_s é a velocidade específica da bomba, Q_{BEP} é a vazão da bomba no ponto de melhor eficiência, H_{BEP} é a altura manométrica da bomba no ponto de melhor eficiência, η é a eficiência da bomba.

Essas comparações apresentadas apontam que a curva da Figura 4.1 (b) pode ser um bom parâmetro para estimar a eficiência das bombas dos fabricantes brasileiros. Desta forma, as bombas selecionadas na pesquisa, tiveram a eficiência definida pela Eq. (4.2).

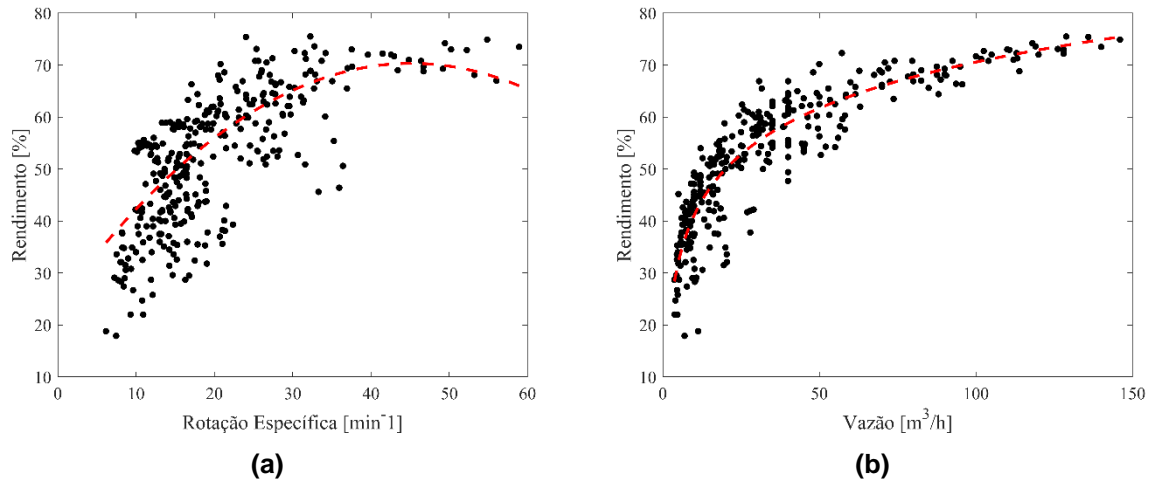


Figura 4.1 - Relação entre a eficiência da bomba e suas características: a) Velocidade de rotação; b) Vazão.

4.1.2 Seleção da Bomba

Como será descrito ao longo deste item o primeiro passo realizado pelo algoritmo de otimização é a seleção da bomba que terá a operação otimizada. Desta forma, o algoritmo define o ponto de operação da bomba (Vazão – Q_{BEP} e Altura Manométrica - H_{BEP}), e feita todas as definições hidráulicas é otimizada a operação das bombas pela rotação de trabalho no período de 24 h. Então tem-se que as variáveis de otimização são:

- Ponto de Operação das bombas selecionadas (Q_{BEP} e H_{BEPman});
- Rotação das bombas selecionadas.

A seleção da bomba tem como foco a minimização dos custos operacionais, representados pela energia consumida e pelo volume de vazamentos da rede, visando obter a operação que proporcione o maior benefício econômico ao sistema. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa foram acrescentadas ou retiradas penalizações de acordo com a necessidade do estudo, mas a função objetivo base para todos os casos está descrita na Eq. (4.4). O primeiro termo da Eq (4.4) possui dois componentes, o primeiro referente aos custos energéticos com a operação das bombas durante as 24 horas e o segundo refere-se a maior potência instalada na rede, sendo o valor demandado.

$$FO = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{24} \left[\frac{\gamma \cdot Q_i \cdot H_i}{1000 \cdot \eta_i} \cdot t_{ei} + P_{m\acute{a}x} \cdot t_{ai} \right] + Pen + \sum_{i=1}^{24} Perda_i \cdot C_{\acute{a}gua} \quad (4.4)$$

FO [R\$] – função objetivo a ser minimizada, descrevendo o custo operacional;

γ [N/m³] – peso específico da água;

Q_i [m³/s] – vazão da bomba no tempo i ;

H_i [m] – altura manométrica da bomba no tempo i ;

η_i [adimensional] – eficiência na bomba no tempo i ;

t_{ei} [R\$/kWh] – tarifa de energia no tempo i ;

t_{ai} [R\$/kW] – tarifa da demanda no tempo i ;

$P_{m\acute{a}x}$ [kW] – potência máxima;

Pen [R\$] – função penalidade;

$Perda$ [m³/s] – perda de água na rede no tempo i ;

$C_{\acute{a}gua}$ [R\$/m³] – despesas com a produção de água.

A penalidade apresentada na Eq. (4.4) é a maneira de impor as restrições do sistema, resultante da soma das funções de penalidade apresentadas nas Eq. (4.5) – (4.7). Nos processos de otimização é extremamente importante a definição do coeficiente de penalidade β , usado nas Eq. (4.5) - (4.7) para garantir a solução viável e uma convergência mais rápida (Manzi et al, 2018). Para cada etapa da pesquisa foi adotado um valor de β , sendo o mesmo para todas as penalização de cada caso. O valor adotado para a rede *Anytown* foi 10^{18} , um valor elevado, escolhido para garantir que a bomba selecionada não violasse nenhuma das restrições. Já para rede NET3 o valor de β foi 10^5 , este valor foi definido através de tentativa de convergência do algoritmo, que apresentou dificuldades, sendo esse o valor que apresentou os melhores resultados. Para a rede D-town o valor adotado de β foi de 10^6 , de forma que permitisse uma flexibilização da penalização, por se tratar de uma rede mais complexa, e ter apresentado maior dificuldade de convergência, por sua vez, este valor foi o que apresentou a melhor convergência entre os valores testados. Assim, com este valor baixo, uma pequena violação nesta restrição tem pouca relevância na melhoria da FO . A rede de água deve operar com pressões superiores à pressão operacional mínima (Equação 4.5). Além disso, também existem restrições quanto

aos níveis de água dos tanques, pois eles não podem exceder o valor máximo, e os níveis inicial e final de água devem ser iguais. (Equações 4.6 e 4.7)

$$Pen_{p.min.} = \sum_{i=0}^{npen} \beta \cdot |p_{min} - p_{j,i}| \quad (4.5)$$

$$Pen_{NA_{max.}} = \sum_{i=0}^{npen} \beta \cdot |NA_i - NA_{max}| \quad (4.6)$$

$$Pen_{NA_{final.initial.}} = \sum_{i=0}^{npen} \beta \cdot |NA_{final} - NA_{initial}| \quad (4.7)$$

As quais:

P_{min} [m] – pressão mínima estabelecida;

$P_{j,i}$ [m] – pressão no nó j e tempo i ;

$NA_{máx}$ [m] – nível máxima de água no tanque;

NA_i [m] – nível de água no tanque no tempo i ;

NA_{final} [m] – nível de água no tanque no tempo final da simulação;

$NA_{inicial}$ [m] – nível de água no tanque no tempo inicial da simulação;

O primeiro passo para a seleção das bombas é definir o número de bombas a serem instaladas (N_p), e na sequência, criar a curva característica da bomba recém-selecionada ($Q \times H$) e calcular a eficiência máxima da cada bomba pela Eq. (4.2). O segundo passo, é a simulação hidráulica, seguido pelo cálculo dos custos de energia. Como descrito anteriormente, há condições hidráulicas que devem ser alcançadas. Assim, a pressão nodal e o nível dos tanques são analisados para adicionar uma penalidade ao custo final. Também, nos casos que tiveram as perdas de água computadas, devem ser acrescidos os custos de produção do volume de água perdido aos custos final. Por fim, a análise de convergência é feita, de acordo com os critérios de parada definidos, salvando o resultado para a solução que convergiu ou executando novamente o processo de otimização se não houve a convergência (FO com alta penalização). A Figura 4.2 apresenta o fluxograma geral do processo da seleção da melhor bomba. O

problema apresentado foi resolvido pela técnica de otimização PSO (EBERHART; KENNEDY, 1995) acoplado ao simulador hidráulico EPANET. (ROSSMAN, 2000), com as variáveis hidráulicas ponto de operação e rotação das bombas, representadas pelas partículas do processo de otimização pelo PSO.

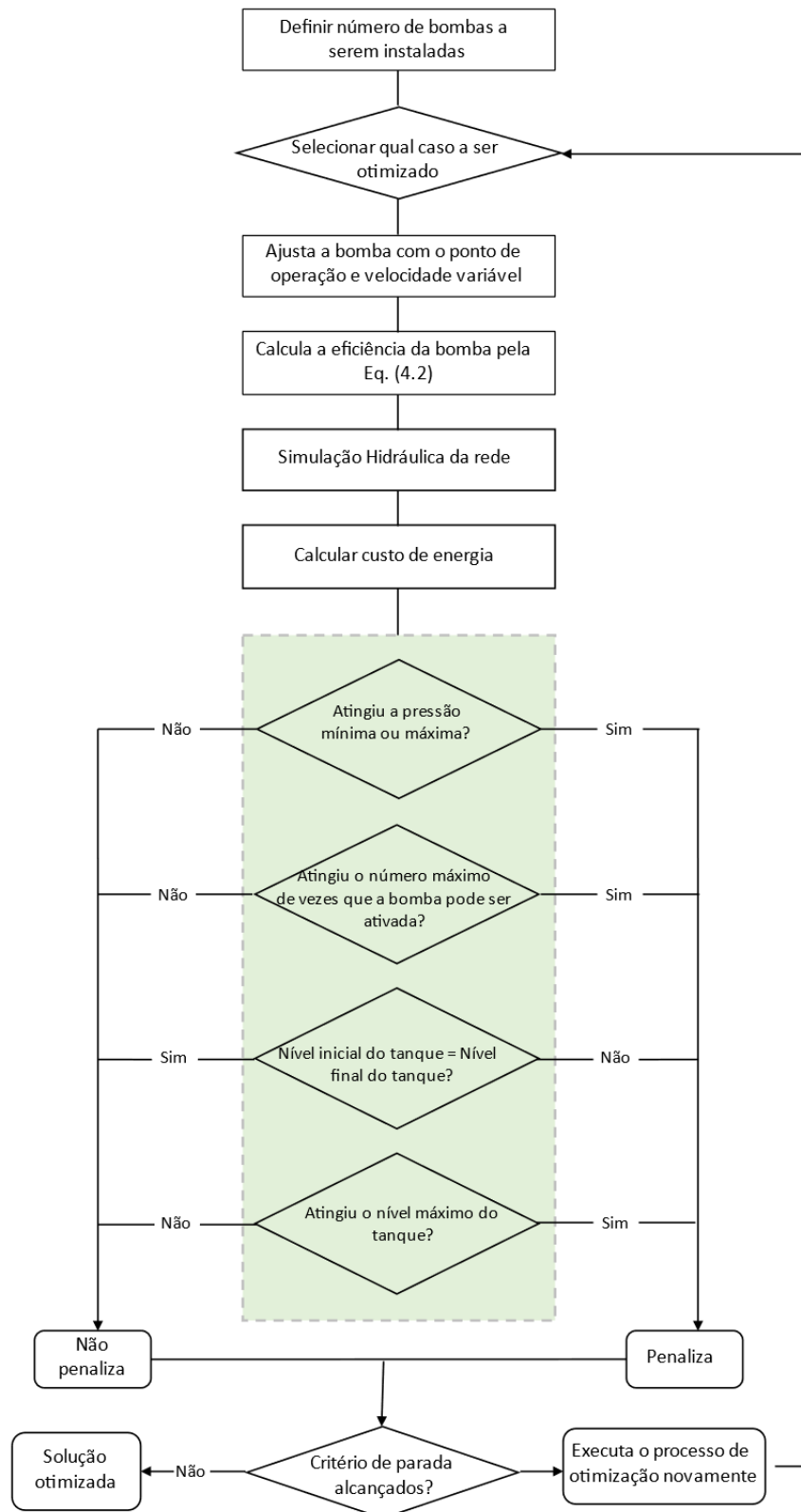


Figura 4.2 - Fluxograma geral do algoritmo para seleção da Estação Elevatória

4.2 Algoritmo de Otimização

4.2.1 Particle Swarm Optimization – PSO

O PSO, como proposto por Eberhart e Kennedy (1995) é um algoritmo meta-heurístico composto por um número de partículas que movimentam-se em um espaço de pesquisa. Essas partículas são influenciadas pelas outras partículas do grupo que apresentam melhor performance, além de seu próprio conhecimento. Em cada iteração, a posição da partícula e a velocidade são atualizadas pelas Eq. 4.8 e 4.9.

$$V_i^{k+1} = \omega \cdot V_i^k + c_1 \cdot \omega \cdot rand_1 \cdot \omega \cdot \frac{(P_i^k - X_i^k)}{\Delta t} + c_2 \cdot \omega \cdot rand_2 \cdot \omega \cdot \frac{(G - X_i^k)}{\Delta t} \quad (4.8)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \cdot \Delta t \quad (4.9)$$

Em que:

V [m/s] – velocidade da partícula

X [m] – posição da partícula

P [m] – melhor posição da partícula

G [m] – melhor posição do grupo

ω [adimensional] – coeficiente de inércia

C_1 [adimensional] – coeficiente cognitivo

C_2 [adimensional] – coeficiente social

Como apresentado por Beielstein *et. al.* (2002) os coeficientes adimensionais têm significados importantes, apresentados a seguir:

- **Coefficiente de inércia** - representa a capacidade da partícula de manter a direção;
- **Coefficiente cognitivo** - representa a memória da partícula, portanto, usa a melhor posição que esta partícula já ocupou para ajustar seu caminho;
- **Coefficiente social** - representa a influência que o grupo de partículas tem, agrupando as partículas próximas às melhores.

4.2.2 Modelo de PSO utilizado

Para a aplicação do método de otimização PSO, o modelo proposto utilizou a linguagem de programação MATLAB. A escolha foi devido a facilidade de codificação e por apresentar uma ampla biblioteca aberta, que permitiu o desenvolvimento do método de forma rápida. Além disso, Eliades et. al (2016) desenvolveram um código que permite ligação ao *software* EPANET, para que seja feita a chamada dos cálculos hidráulicos do sistema que está sendo analisado. As configurações do PSO foram as mesmas para todos os casos, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Configurações do PSO

Coeficiente cognitivo - C_1		1,10
Coeficiente social - C_2		1,10
Coeficiente de inércia - ω		1,49
Máximo de interações		1000
Tolerância		1E-11
Número de partículas		100
Rotação da bomba	Valor mínimo admitido	1,0
	Valor mínimo admitido	0,6
Vazão (Q_{BEP})	Valor mínimo admitido	2.000 m ³ /h
	Valor mínimo admitido	10 m ³ /h
Altura monométrica (H_{BEP})	Valor mínimo admitido	300 m
	Valor mínimo admitido	10 m

4.3 Localização das Estações Elevatórias

A localização das Estações Elevatórias será feita baseada nos resultados encontrados com a determinação da Rede Troncal, obtida através da teoria dos grafos. A topologia das redes de distribuição de água coincidem com topologia dos grafos, então pode-se abstrair a rede de abastecimento de água como grafos e aplicar os conceitos desta teoria (SHEKOFTEH *et. al.*, 2020).

4.3.1 Teoria dos Grafos

Os grafos, como apresentado por Campbell *et al.* (2016) podem ser descritos como estruturas topológicas formadas por nós interconectados por trechos. A teoria dos grafos é um ramo da matemática a estudar essas estruturas. Esta foi introduzida na Literatura pelo matemático suíço Leonhard Euler em 1936, na tentativa de resolver um problema de transporte de cargas e

peças entre ilhas e margens do rio, na cidade de Conisberga (Biggs et al., 1999). O matemático Euler montou um diagrama em que considerou as ilhas e margens como os vértices e cada ponte de ligação foram representadas por arestas. (Figura 4.3).

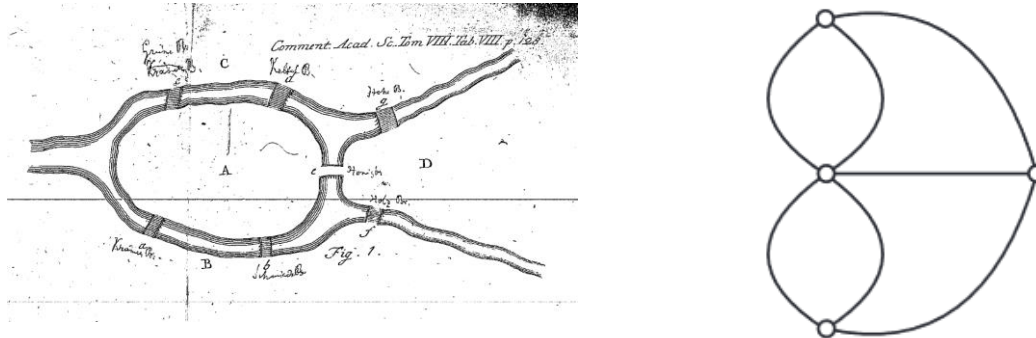


Figura 4.3 - Mapa de Conisberga e Diagrama de Euler.

Fonte: Biggs et al. (1999).

A teoria apresentada abriu um campo para aplicação em vários casos como ferramenta para resolução de problemas. Na pesquisa em questão, consiste no primeiro passo para definição da Rede Troncal. Sendo assim, a partir da matriz de adjacência, um gráfico simples da rede é definido, considerando a seguinte matriz base: $G = (V, E)$, em que V é o conjunto de n vértices (ou nós) e E é o conjunto de m arestas (ou trechos). No caso em questão, e através do Método da Rede Troncal que será descrito na sequência, serão analisadas todas as possibilidades de escoamento da água, que englobam as seguintes variáveis de definição:

- Vazão de escoamento do trecho;
- Número de nós que determinado trecho abastece.

4.3.2 Método da Rede Troncal

O método da Rede Troncal utilizado separa os trechos dos SAA em Rede Troncal (RT) e Rede de Distribuição (RD) de acordo com a porcentagem da vazão distribuída na rede que passa por determinado tubo, e sua capacidade de alcance, obtida pelo número de nós que recebem a água que passa por este tubo. Desta forma, quanto maior for a porcentagem da vazão total que passa por um trecho, e quanto mais nós ele atende, mais importância o tubo tem para a rede. Isso

justifica a instalação das EEA nos trechos da RT pois aumenta a eficiência de bombeamento, visto que a vazão que passar por eles tem maior influência na rede.

Para as redes estudadas neste trabalho, é aplicado o conceito de caminho mais curto, que por definição permite determinar a frequência de todos os caminhos possíveis da rede. Assim, também é necessária a definição da direção de escoamento para criar o chamado dígrafo, que são grafos com direções pré-definidas. Como os SAA são dinâmicos, podem apresentar mudanças de direção do fluxo de escoamento ao longo do tempo, devido as mudanças das rotinas operacionais das válvulas, tanques e bombas. Assim o dígrafo para a pesquisa em questão foi definido através do período de máximo consumo. O passo seguinte foi definir através da técnica *Breadth First Search* (BFS) (MOORE, 1959) o caminho mais curto em termos de nós entre a fonte e cada nó de consumo, considerando que os tanques e reservatórios são as fontes de abastecimento de água. A soma dos valores do BFS de cada linha são chamados de Valores Acumulados do Menor Caminho (*Accumulated Shortest Path Value* - ASPV). O valor ASPV irá definir os nós mais importantes para o SAA, uma vez que esta soma indica o alcance do nó, ou seja, para atender a demanda de alguma área o fluxo deve passar por esses nós mais importantes.

No entanto, os valores precisam ser normalizados para definir a classificação. Como recomendado por Campbell *et al.* (2016), é necessário que sejam adicionados critérios para evitar que tubos pequenos sejam introduzidos na RT. Sendo assim, a vazão que escoar pelos tubos é utilizada como coeficiente de ponderação para o ASPV, e apenas tubos realmente importantes apresentarão um valor elevado. A Eq. (4.10) apresenta o cálculo feito para normalizar os resultados gerados:

$$ASPV_N = \frac{ASPV_{TUBO}}{ASPV_{MÁX}} Q_{TUBO} \quad (4.10)$$

Sendo que:

$ASPV_N$ – Valores Acumulados do Menor Caminho normalizado (m);

$ASPV_{TUBO}$ - Valores Acumulados do Menor Caminho antes da normalização (m);

$ASPV_{MÁX}$ - Valores Acumulados do Menor Caminho máximo encontrado, antes da normalização (m);

Q_{TUBO} - Vazão de escoamento do tubo (L/s);

Para finalizar, o tamanho da RT é definido. Como os trechos da RT serão analisados previamente para a escolha final do local das EEAT, neste trabalho, foi considerado que a rede troncal engloba 40% do total de trechos da rede. Este valor relativamente alto permite uma maior flexibilidade na localização das EEAT, evitando que sejam instaladas em série, sem nenhum benefício para setores adjacentes. A Figura 4.3 apresenta o fluxograma geral dos procedimentos para obter a RT.

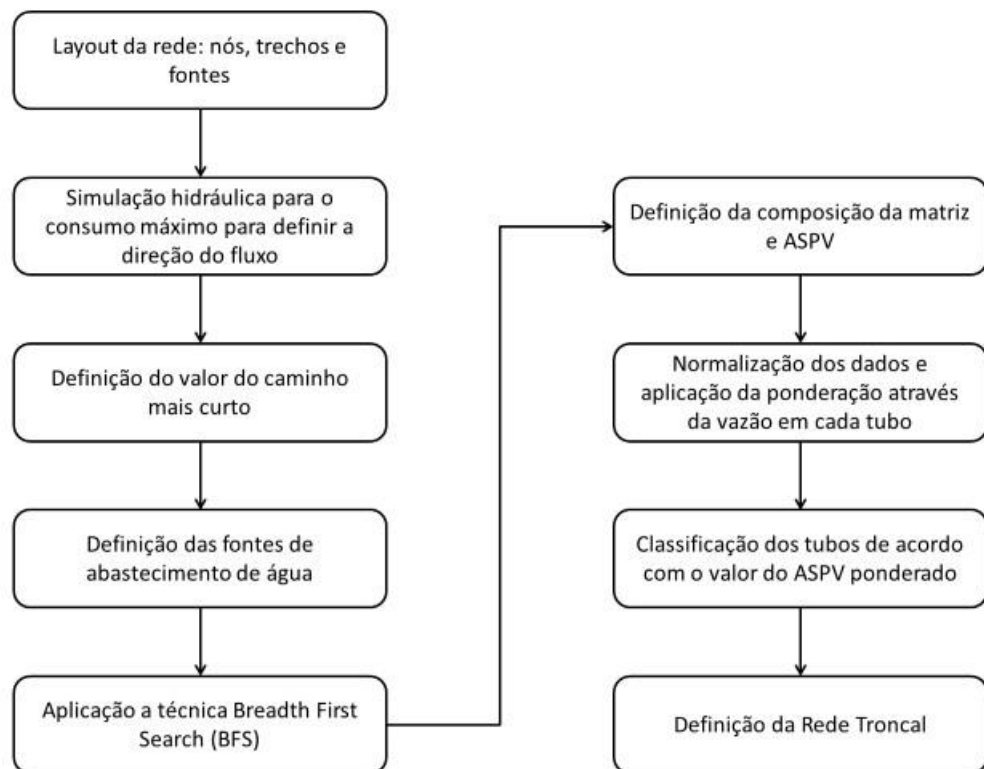


Figura 4.4 – Fluxograma geral para obter a Rede Troncal.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Rede Anytown

5.1.1 Descrição da rede

O primeiro estudo de caso foi feito na *Rede Anytown* (Walki et al, 1987). Se trata de uma rede de pequeno porte, com 40 trechos de tubulação e 19 nós, sendo que 16 deles apresentam uma demanda que varia de 12,6 a 63,1 L/s, como mostra a Figura 5.1.

Os valores de restrições adotados foram baseados nas Normas brasileiras. Os 10 metros de pressão mínima garantem o abastecimento ao consumidor. O nível máximo de água dos tanques foram estabelecidos como sendo de 10m, caso a restrição do fosse violada a rede seria penalizada. Não há restrição quanto ao nível mínimo, ou seja é permitido que os tanques se esvaziem.

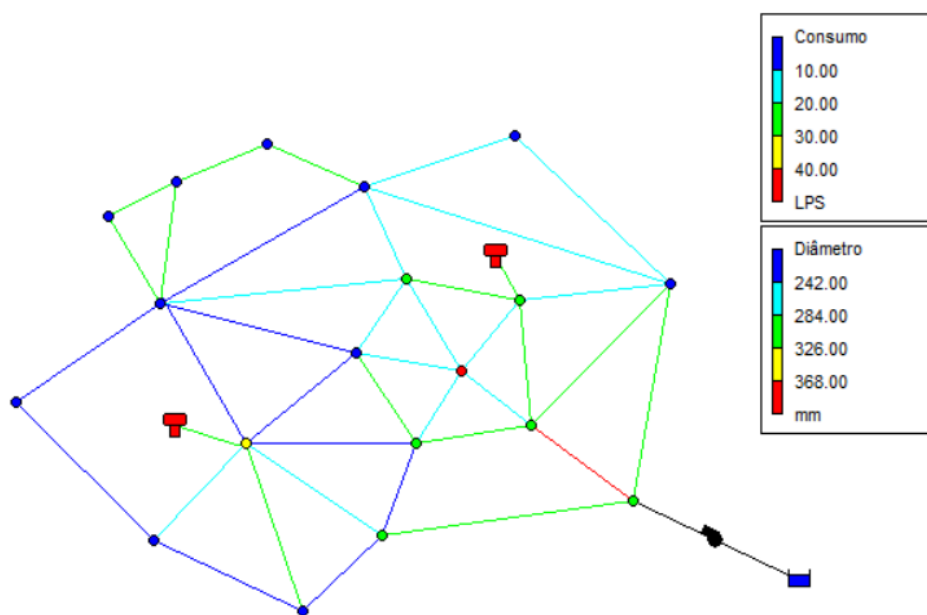


Figura 5.1 – Rede Anytown

Três cenários operacionais diferentes foram considerados para avaliar a eficiência da estação elevatória. O número de bombas operando em paralelo também foi avaliado, variando de uma a três bombas instaladas. Para cada quantidade de bombas instaladas, os três cenários de otimizações a seguir foram realizadas:

1. Otimizar o ponto de operação das bombas (Q_{BEP} e H_{BEP}) considerando a velocidade de rotação fixa;
2. Usar o resultado gerado no cenário 1 e otimizar a velocidade de rotação da bomba selecionada, considerando o uso do conversor de frequência;
3. Otimizar simultaneamente o ponto de operação da bomba e sua velocidade de rotação a cada hora da simulação.

Para os Casos 2 e 3, quando a bomba estivesse ligada, a velocidade de rotação não poderia ser menor que 0,6, para evitar a operação em baixa eficiência e problemas mecânicos e elétricos como problemas na refrigeração podendo provocar aquecimento devido a velocidades muito baixas (LINDSTEDT; KARVINEN, 2016; WLAMIR, 2007). Se isso acontecesse, a bomba era desligada. Outro parâmetro importante a ser considerado são as tarifas. Foram considerados dois valores para tarifa e demanda de energia, um sendo correspondendo ao custo durante o Horário de Pico (HP) e outro referente ao Horário Fora de Pico (FP), como apresentando na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores Padrão de tarifa de energia e demanda

Energia – fora de pico [\$/kWh]	0,35666
Demanda – fora de pico [\$/kW]	13,95
Energia – pico [\$/kWh]	0,53423
Demanda – pico [\$/kW]	43,95

Fonte: Adaptado do SNIS (2018).

Para análise de sensibilidade realizada considerou valores de 25 a 200% do valor nominal das tarifas e demandas apresentadas na Tabela 5.1, totalizando 8 diferentes valores para cada tarifa (demanda e energia). Considera-se que as tarifas de energia e demanda podem sofrer diferentes alterações, criando assim um total de 64 cenários diferentes de tarifas. Para reduzir o esforço computacional, nessa análise de sensibilidade foi feita apenas a otimização do caso 3, utilizando o melhor resultado com as tarifas padrão como *Warm Solution* (NICOLINI; SOVATTO, 2009).

5.1.2 Resultados da Seleção das Bombas

Pela Tabela 5.2 pode ser observada uma redução nos gastos energéticos, sendo Caso 3 < Caso 2 < Caso 1. A redução apresentada ocorre pois as condições do Caso 2 e 3 permitem que a bomba opere mais próxima do seu ponto de máxima eficiência, e por permitir a seleção mais

precisa das bombas de acordo com as condições operacionais. O menor custo obtido foi na operação com duas bombas em paralelo. Entretanto, ao avaliar os resultados detalhadamente, observou-se que apenas uma bomba permaneceu ligada durante as 24h. Esse comportamento se repetiu para os resultados dos casos com três bombas. A Tabela 5.2 apresenta os resultados dos processos de otimização para cada caso, considerando uma, duas ou três bombas operando em paralelo.

Tendo isto em conta, conclui-se que o sistema não ganha com o aumento do número de bombas nesse estudo de caso, visto que mesmo nos casos que apresentaram duas ou três bombas no sistema, o processo de otimização encontrou os melhores resultados mantendo apenas uma bomba ligada durante todo o tempo. Tanto para o cenário com duas e três bombas o algoritmo de otimização manteve as maiores bombas ligadas, mostrando que não haveria benefício econômico se mais uma bomba operasse no sistema. Desta forma, como o objetivo é manter o menor custo energético, o código manteve apenas uma bomba ligada.

Tabela 5.2 – Resultados para diferentes bombas e processos de otimização

			Caso 1	Caso 2	Caso 3
Uma bomba	Bomba 1	Q _{BEP} [m ³ /h]	506,10	506,10	429,86
		H _{BEP} [m]	107,84	107,84	147,29
	Custos [R\$/dia]		12.198,00	8.412,00	7.716,00
Duas bombas em paralelo	Bomba 1	Q _{BEP} [m ³ /h]	305,90	305,90	338,17
		H _{BEP} [m]	79,47	79,47	78,30
	Bomba 2	Q _{BEP} [m ³ /h]	810,36	810,36	543,00
		H _{BEP} [m]	150,57	150,57	179,38
	Custos [R\$/dia]		12.266,00	6.107,00	4.844,00
Três bombas em paralelo	Bomba 1	Q _{BEP} [m ³ /h]	577,17	577,17	486,65
		H _{BEP} [m]	144,16	144,16	175,29
	Bomba 2	Q _{BEP} [m ³ /h]	420,42	420,42	1.734,60
		H _{BEP} [m]	120,25	120,25	33,37
	Bomba 3	Q _{BEP} [m ³ /h]	10,16	10,16	1.848,55
		H _{BEP} [m]	20,94	20,94	40,01
	Custos [R\$/dia]		15.972,75	9.730,69	9.620,46

Como pode ser constatado na Figura 5.2 os valores da demanda apresentam um aumento de 6 às 11 horas, e em seguida uma queda constante até o fim do dia. Este comportamento apresentado justifica alguns dos resultados que serão expostos a seguir.

Ao avaliar os melhores resultados obtidos para cada caso, com apenas uma bomba em operação, observaram valores parecidos da pressão média nas redes para os três casos, como pode ser visto na Tabela 5.3. No entanto, a pequena diferença encontrada entre eles pode estar associada ao consumo e demanda de energia para cada caso. O Caso 1, por exemplo, apresentou a menor demanda de energia dentre eles, associado a maior quantidade de vezes que a bomba foi desligada durante o dia. Para o Caso 2 o consumo de energia foi o mais elevado, no entanto, nota-se que a média de consumo fora de ponta e na ponta variam menos que para o Caso 3, justificando a média de pressão ser maior. O Caso 3 apresentou a maior distinção de consumo, como pode ser analisado na Tabela 5.3. Não houve consumo de energia nos horários de pico, mas nos horários fora de ponta foi o que apresentou o maior consumo, com valores da potência mais elevados que para os outros casos, justificando a maior pressão média.

Já pela Figura 5.3 (b) verifica-se que até as 9 horas, para todos os casos, a pressão apresentou comportamentos similares com constante aumento, sendo associado ao aumento da demanda nesse mesmo período. Das 9 horas em diante, cada caso mostrou um comportamento específico, sendo atribuído tanto aos valores de demanda, quanto à operação das bombas.

Tabela 5.3 - Dados médios da rede

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Pressão Média na Rede (m)	46,00	50,11	50,62
Demanda HP (kW)	186,70	98,58	0,00
Consumo HP (kWh)	373,08	288,67	0,00
Consumo Médio HP (kWh)	124,36	96,22	0,00
Demanda FP (kW)	191,07	186,26	243,46
Consumo FP (kWh)	3.535,86	4.009,22	4.059,83
Consumo Médio FP (kWh)	147,33	167,05	169,16
Consumo Médio (kWh)	3.908,94	4.297,89	4.059,83

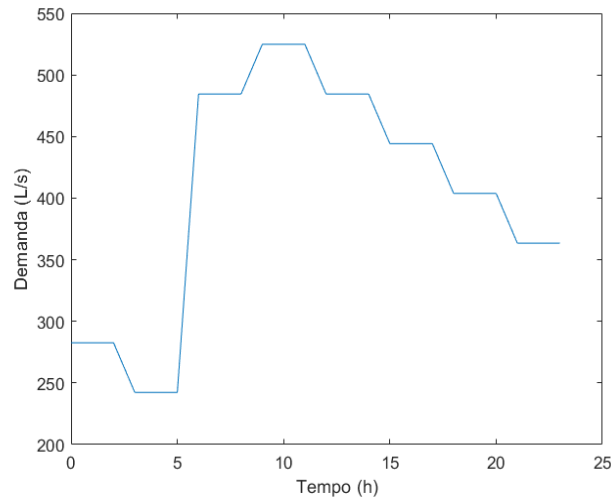


Figura 5.2 – Curva de demanda

Quanto ao Caso 1 ocorreram 5 desligamentos durante as 24 horas, sendo um número plausível, e como retratado na Figura 5.3 (a), a bomba foi desligada em maior parte do tempo durante o horário ponta. Esse valor maior de partidas, comparado aos outros casos, deve-se ao fato de a bomba não ter rotação variável, então a única forma para reduzir os gastos energéticos, com a bomba já selecionada, é a desligando. Pela Figura 5.3 (b), além de observar que os valores da pressão estão relacionados aos valores da demanda da rede, apresentada na Figura 5.2, também pode ser inferido que a operação da bomba também influi na pressão da rede. Nota-se que nos horários de ponta houve dois desligamentos da bomba, e nesses mesmos horários a pressão sofreu uma redução considerável.

O Caso 2 apresenta a possibilidade de variação da rotação da bomba, no entanto, tem o ponto de operação pré-definido pelo Caso 1. Pela Figura 5.3 (a) observou-se que a bomba se manteve ligada durante todo o período, mas com variação dos valores de potência. Esta possibilidade da variação da rotação permitiu que os custos com a energia fossem menores para o Caso 2, se comparado ao Caso 1. Também, pela Figura 5.3 (a), verifica-se uma queda nos valores da potência durante todo o horário de ponta.

Pela Figura 5.3 (a) nota-se que a bomba selecionada no Caso 3 apresentou maiores valores de potência, e mesmo tendo a possibilidade de variação da rotação houve momentos que foi desligada. Assim como nos Casos 1 e 2, o horário de ponta teve influência na operação da bomba, a qual foi desligada durante todo esse período. A Figura 5.3 (b) mostra valores mais

constantes de pressão em um determinado período, de 7 às 15 horas. Esse comportamento, pode ser relacionado, tanto a curva de demanda da rede, quanto ao perfil dos tanques apresentados nas Figuras 5.4 (a) e 5.4 (b). Pela curva de demanda nota-se que nesse período o consumo de água varia pouco, causando pequena variação da pressão média da rede.

Além disso, em todos os casos nota-se uma queda da pressão nos horários de ponta. Para o Caso 1 e 3 como as bombas foram desligadas nesse período, não houve fornecimento de água via recalque, apenas por gravidade através dos tanques, diminuindo a pressão fornecida ao sistema. Já para o Caso 2, esta queda de pressão foi menos brusca, uma vez que houve apenas uma redução da potência da bomba. Também, pela curva de demanda (Figura 5.2), observa-se que no horário de ponta o consumo de água não é elevado, ou seja, as perdas de carga na tubulações são menores, e portanto, a variação de pressão na rede é muito mais influenciada pelo nível dos tanques e ponto de operação das bombas.

É importante mencionar, que o controle da pressão deve ser feito para conter os vazamentos de água das redes, como mencionado por Nicolini e Sovatto (2009), pois as perdas de água nos sistemas são causadas principalmente pelas pressões elevadas, que podem ser ocasionadas pelo gerenciamento inadequado das estações elevatórias. Como neste caso as perdas foram desconsideradas, os altos valores de pressão não influenciam os custos operacionais.

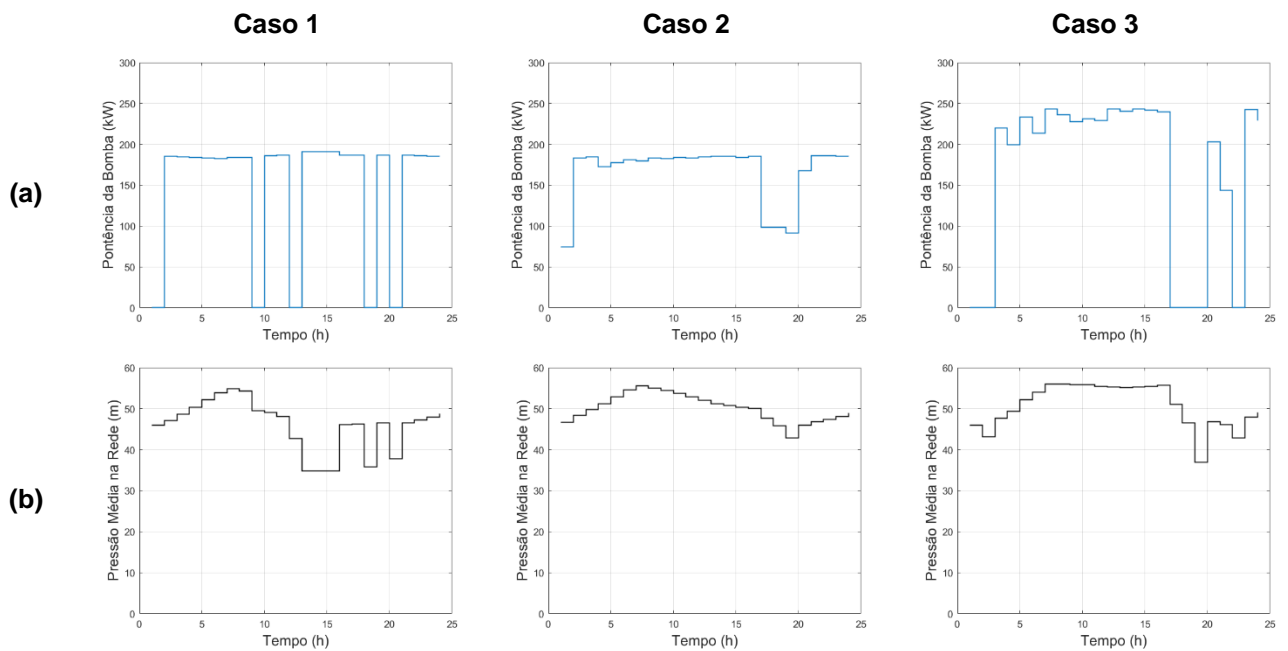


Figura 5.3 – Resultados usando uma bomba: a) Potência da bomba; b) Pressão média na rede.

Fonte: Mólner *et al.* (2020).

Outro ponto a ser discutido é a variação dos níveis dos tanques de acordo com a estratégia operacional adotada em cada caso. Para o Caso 1, os tanques tiveram um aumento do nível de água rápido, logo nas primeiras horas do dia, e não conseguem mantê-lo, esvaziando logo em seguida. Observa-se que o esvaziamento dos tanques se inicia no horário de maior demanda (Figura 5.2), e nota-se também que nesse mesmo horário a bomba foi desligada. Diferente dos outros casos, a bomba precisou ligar durante uma hora do horário de ponta, pois os reservatórios estavam vazios, então se a bomba não fosse ligada ocorreria a insuficiência do abastecimento de água.

O comportamento do Caso 2 mostra o enchimento dos tanques nas primeiras horas do dia e um esvaziamento gradual até chegar a zero no horário de ponta. Neste caso não houve desligamento da bomba, apenas alterações em sua rotação, justificando a redução mais suave do nível dos tanques. A vantagem deste caso é que, durante o horário de ponta, a bomba opera com potência reduzida, diminuindo significativamente os gastos com consumo e demanda de energia no horário de ponta, ao contrário do Caso 1, onde, apesar do desligamento por um curto período, houve a necessidade de sua operação em potência máxima para atender a demanda de água.

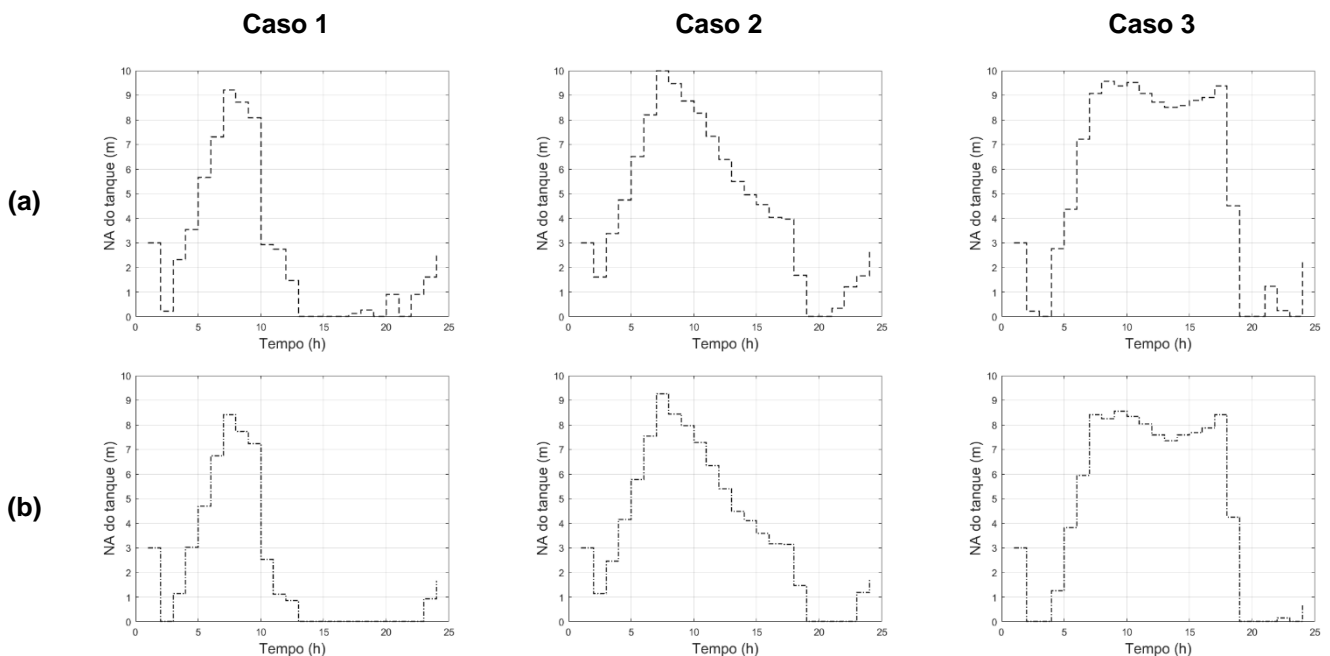


Figura 5.4 – Nível de água no tanque: a) Tanque 1; b) Tanque 2.

Fonte: Móller et. al. (2020).

Por fim, no Caso 3 os tanques também apresentaram um rápido enchimento nas primeiras horas do dia, mas se mantêm cheios durante um longo período, esvaziando apenas durante o horário de ponta. Nota-se neste caso que a potência da bomba apresentou valores mais elevados durante boa parte do dia, de 3 às 16 horas, fornecendo uma maior vazão de água ao sistema, superior à demanda do período, o que permite o enchimento dos tanques. Esse comportamento pode gerar um maior consumo de energia, mas em contrapartida a bomba pode ser desligada durante todo o horário de ponta, onde as tarifas de energia são elevadas.

5.1.3 Análise de Sensibilidade das Tarifas de Energia

Os resultados dos processos de otimização apresentados foram gerados utilizando as tarifas de demanda e energia especificadas no estudo de caso. No entanto, com o objetivo de compreender a influência do valor das tarifas na otimização da operação das bombas, fez-se uma análise de sensibilidade das tarifas para o Caso 3 com uma bomba.

Nesse contexto, para a análise de sensibilidade foram considerados 64 casos com valores diferentes de tarifas. As tarifas foram definidas combinando a variação de tarifas na ponta e fora de ponta entre 25 a 200% do valor nominal.

Os resultados podem ser analisados na Figura 5.5, que apresenta uma relação dos valores das tarifas com a altura manométrica e vazão da bomba. Nota-se na Figura 5.5 (a) que H_{BEP} tende a aumentar com o aumento dos valores das tarifas. A H_{BEP} maior permite que os reservatórios encham mais rápido e que a bomba pare de operar nos horários de pico. Já a redução das tarifas permite que a bomba opere por períodos mais longos sem grandes custos.

A Figura 5.5 (b) mostra o comportamento da Q_{BEP} à medida que as tarifas alteram. Percebe-se que a vazão também tende a aumentar quando os valores das tarifas aumentam. Assim como a H_{BEP} , aumentar a Q_{BEP} resulta em maior quantidade de água fornecida ao sistema, assim sendo capaz de encher os reservatórios mais rapidamente, tentando evitar a operação durante o horário de ponta. Além disso, como observado na Figura 4.1, bombas com maiores vazões apresentam rendimentos maiores, sendo um fator ainda mais relevante neste cenário de altas tarifas de energia.

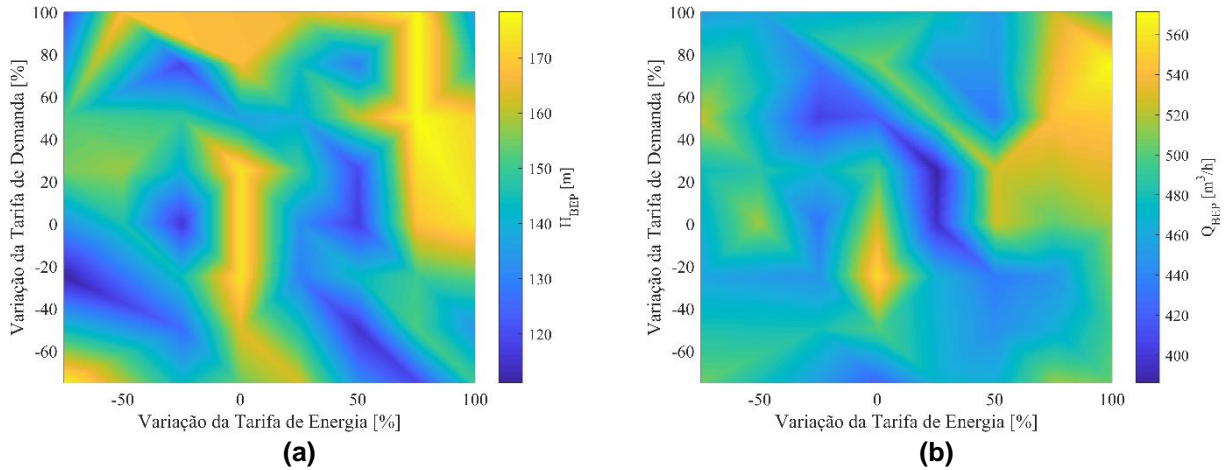
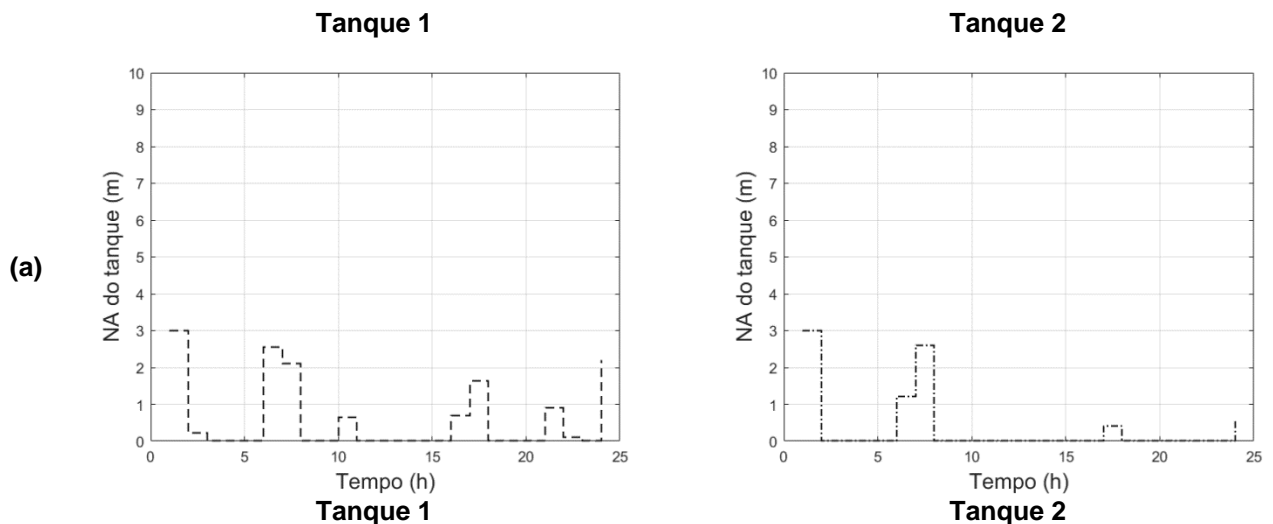


Figura 5.5 - Variação Tarifária da Demanda: a) H_{BEP} ; b) Q_{BEP} .

Fonte: Møller et. al. (2020).

Por fim, para confirmar as análises dos resultados, a Figura 5.6 mostra o nível de água dos tanques ao longo do dia. Para o caso com as menores tarifas, observou-se o nível de água dos dois tanques baixo durante todo o tempo, ocasionado pelos baixos custos das tarifas, que permite que a bomba fique ligada por maiores períodos. Já no caso das tarifas máximas, nota-se que os tanques permaneceram cheios ao longo do dia, mas esvaziam no horário de ponta, pois as bombas foram desligadas, confirmando a necessidade de bombas com maiores potências nestes casos para que seja evitada sua operação durante o horário de ponta.



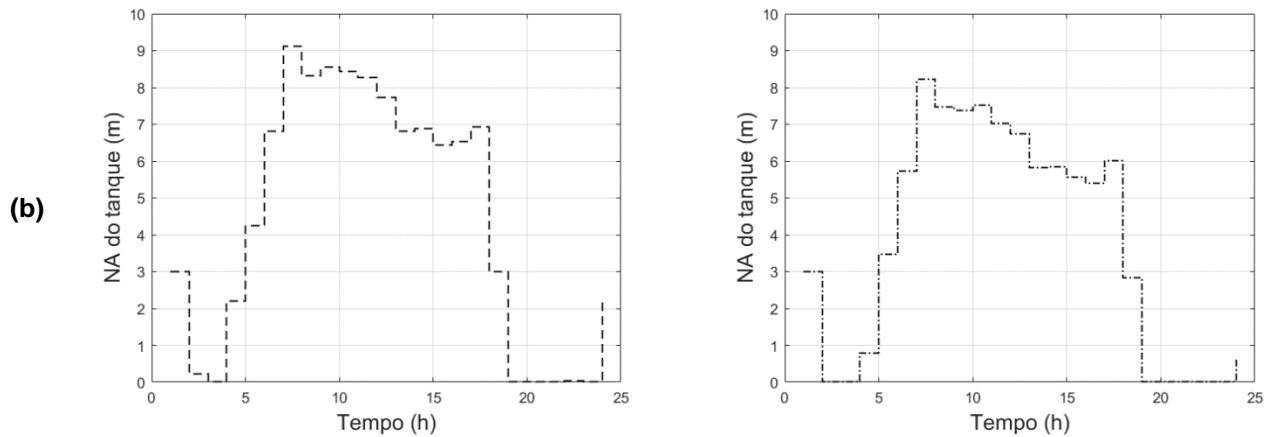


Figura 5.6 – Nível de água no tanque: a) Tarifa mínima; b) Tarifa máxima.

Fonte: Móller et. al. (2020).

5.2 Rede NET3

5.2.1 Descrição da Rede

A rede denominada Net3 foi estudada primeiramente por Rossman (2000). Trata-se de uma rede de médio porte, com 117 trechos e 97 nós. O menor diâmetro apresentado na rede é de 203,2 mm e o maior foi de 762 mm, como apresentado na Figura 5.7. O consumo apresenta variação ao longo do dia para todos os nós, dependendo do padrão de consumo empregado.

As restrições empregadas nessa rede foram as mesmas adotadas por Rossman (2000), sendo 30 metros de pressão mínima, o nível máximo do tanque de 10 metros e não havendo nível mínimo, podendo o tanque esvaziar. Vale ressaltar, que para essa rede, devido à dificuldade de convergência do algoritmo, foi necessário flexibilizar as penalizações. Assim, admitiu-se uma diferença de 1 metro entre o nível do tanque final e inicial, sem que houvesse penalização.

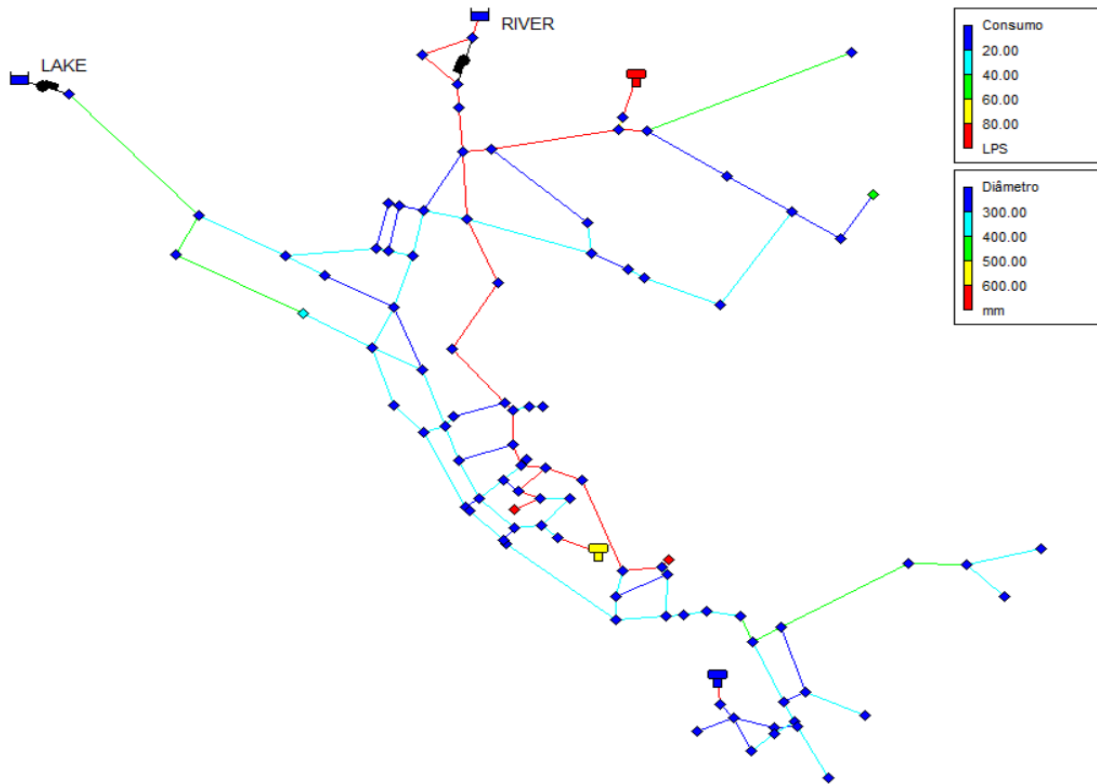


Figura 5.7 – Rede NET3.

Os resultados obtidos com a Rede *Anytown* demonstraram uma clara vantagem econômica ao selecionar as bombas da estação elevatória em conjunto com seu plano de operação (Caso 3). Desta forma, este será o único caso avaliado para esta rede, variando-se apenas o número de bombas em cada uma das duas estações elevatórias existentes. Contudo, na rede anteriormente analisada não foram considerados os vazamentos de água, que podem ter grande influência nos resultados. Como primeira parte da análise da Rede NET3 fez-se a otimização desconsiderando os vazamentos, e nos processos seguintes, foi adicionado um valor de 0,25 para o coeficiente do emissor em cada um dos nós, que permite a simulação de um vazamento conforme a Eq. (5.1), de forma que o índice de vazamentos da rede fosse da ordem de 20 %.

$$Q = C \cdot p^y \quad \text{Eq. (5.1)}$$

Sendo que:

Q – vazão (m³/s)

p – pressão (m)

C – coeficiente de vazão ($\text{m}^3/\text{s})/\text{m}^{1/2}$

y – coeficiente do emissor

Para calcular o benefício econômico da redução de vazamentos, foram considerados três valores diferentes das despesas que os prestadores de serviços tem com a produção de água tratada. Como apresentado pelo SNIS (2018), estas despesas podem variar entre 0,30 R\$/m³ a 7,82 R\$/m³ no Brasil. Desta forma, foram considerados os valores mínimo e máximo, e considerando que o local da realização das pesquisa é Minas Gerais, também foi analisado o valor médio dos custos de produção de água no estado, de 3,08 R\$/m³. A Tabela 5.4 apresenta os casos referentes ao valor da tarifa utilizado.

Tabela 5.4 - Valores das despesas totais com os serviços por m³ faturado adotados.

Caso	Tarifa R\$/m ³	Referência utilizada (SNIS, 2018)
Caso 1	0,30	Despesa total mínima com os serviços por m ³ faturado do Brasil
Caso 2	3,08	Despesa total média com os serviços por m ³ faturado de Minas Gerais
Caso 3	7,82	Despesa total máxima com os serviços por m ³ faturado do Brasil

Além disso, para todos os casos considerando vazamento foram feitos dois cenários, sendo que o primeiro considerou as bombas de cada elevatória do sistema trabalhando sozinhas, e no segundo considerando duas bombas trabalhando em paralelo em cada elevatória. Os valores das tarifas de energia estão novamente apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores Padrão de tarifa de energia e demanda.

Energia – fora de pico [R\$/kWh]	0,35666
Demanda – fora de pico [R\$/kW]	13,95
Energia – pico [R\$/kWh]	0,53423
Demanda – pico [R\$/kW]	43,95

5.2.2 Análise da influência dos vazamentos de água na rede

Com o objetivo de analisar a influência dos vazamentos de água na operação das estações elevatórias, fez-se um comparativo entre a rede estanque e considerando as perdas por vazamentos. Utilizando o valor médio para os custos de produção da água (3,08 R\$/m³), a Tabela 5.6 mostra que o consumo de energia total foi 3,78 vezes maior para o caso em que há o vazamento na rede. Essa razão é ainda maior ao se comparar o consumo de energia nos horários de pico, um aumento de 4,2 vezes. Pela Tabela 5.6 constata-se que a pressão média na

rede sem perdas de água apresentou maior valor, que pode ser justificada por não precisar conter a pressão na rede para reduzir os vazamento de água.

Tabela 5.6 - Valores dos consumos, demanda e pressões médias das redes.

	Sem Vazamento		Com vazamento Tarifa 3,08 R\$/m ³	
	Elevatória "River"	Elevatória "Lake"	Elevatória "River"	Elevatória "Lake"
Demanda HP (kW)	0,0	16,1	0,0	67,4
Consumo HP (kW)	0,0	47,8	0,0	201,6
Consumo Médio HP (kW)	0,0	15,9	0,0	67,2
Demanda FP (kW)	117,4	192,1	190,0	226,7
Consumo FP (kW)	1.110,1	2.681,9	2.459,5	2.854,5
Consumo Médio FP (kW)	52,9	127,7	117,1	135,9
Consumo Médio	111,7	48,2	102,5	127,3
Consumo Total HP (kW)	47,8		201,6	
Consumo Total FP (kW)	3.792,0		5.314,0	
Consumo Médio Total	30,4		114,9	
Pressão Média na Rede (m)	47,7		47,5	

A Tabela 5.7 apresenta as dimensões das estações elevatórias selecionadas, e constata-se que a capacidade de bombeamento para a rede com vazamento é 80% maior que para a rede sem vazamento. Este contraste é reflexo da diferença que os vazamentos nos SAA causam nas estações elevatórias. A diferença da capacidade das bombas, também pode ser observada na Figura 5.8 (a) e (b), nas quais as potências das bombas apresentadas para o caso com vazamento são maiores.

Tabela 5.7 – Resultados para os cenários com e sem vazamento de água.

			Sem Vazamento	Com vazamento
Uma bomba	Elevatória "Lake"	Q _{BEP} [m ³ /h]	535,64	419,17
		H _{BEP} [m]	106,90	151,91
	Elevatória "River"	Q _{BEP} [m ³ /h]	517,85	1.496,89
		H _{BEP} [m]	63,67	40,63
	Custo [R\$/dia]	Energia	6.404,29	10.777,54
		Perda	-	41.129,81
		Penalização	33.208,00	38.308,00
		Total	39.612,29	90.215,35

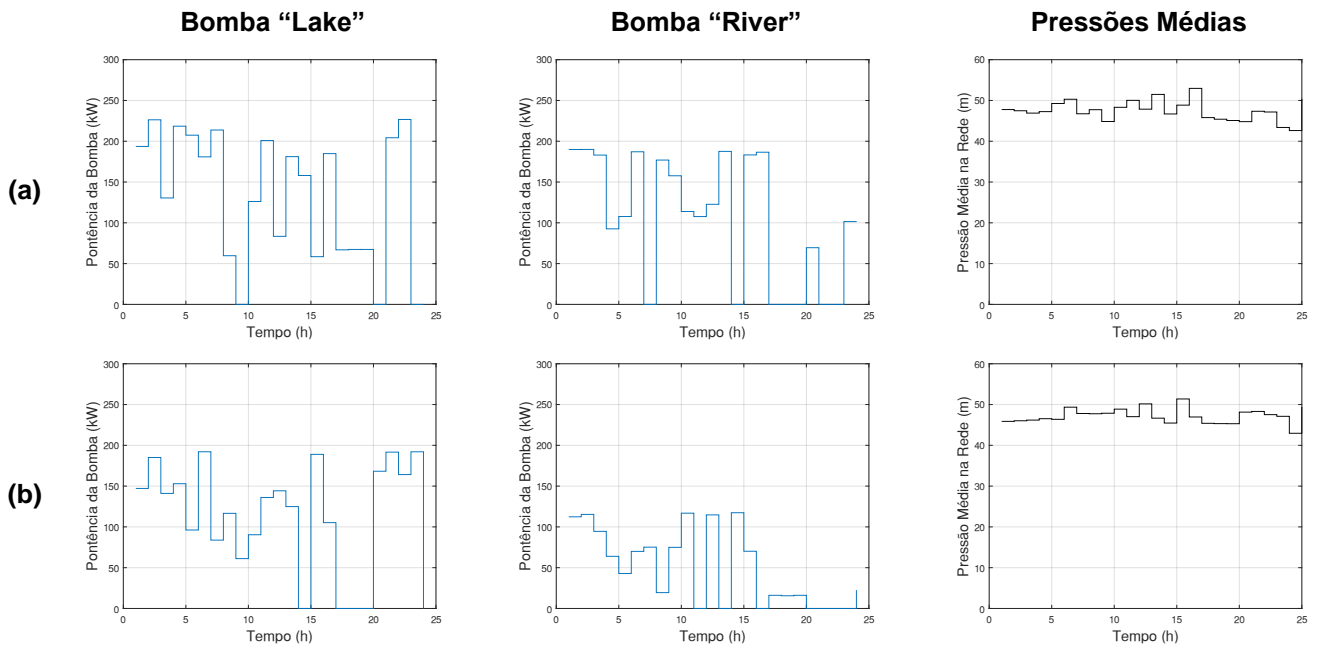


Figura 5.8 - Potência das bombas e pressões média: a) rede com vazamento; b) rede sem vazamento.

Pelas Figuras 5.8 e 5.9 observa-se redução ou desligamento da bomba no horário de pico. Os tanques também apresentam o perfil do nível de água parecidos e as pressões médias ao longo do dia têm valores muito próximos.

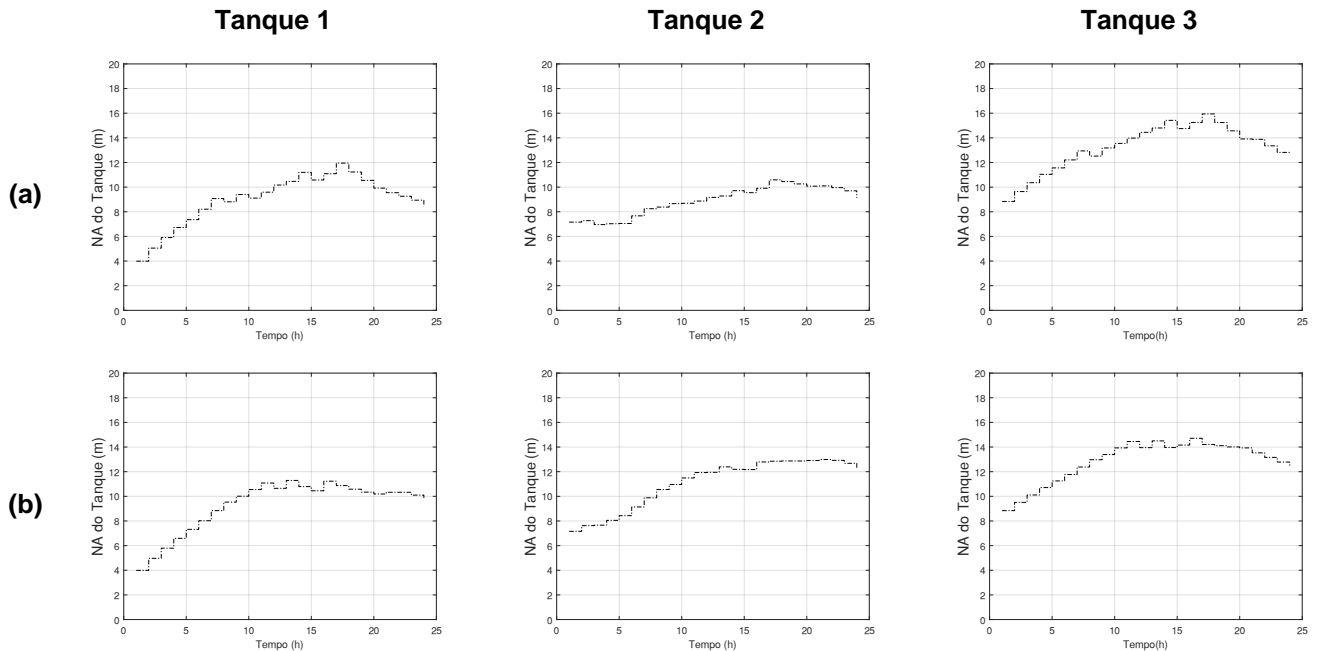


Figura 5.9 – Nível de água nos tanques: a) rede com vazamento; b) rede sem vazamento.

Pode-se concluir pelas análises da influência dos valores do vazamento das redes que, no processo de otimização, pode haver uma preferência em manter pressões mais baixas visando minimizar as perdas, ao invés de minimizar os custos energéticos. Com isso, no capítulo seguinte, além da seleção das bombas, também será feita uma análise para os diferentes valores de gastos de produção da água, de forma que ajude a inferir sobre a importância dos valores das perdas de água na otimização da operação das bombas. Além disso, os resultados apresentados mostram a importância que o controle dos vazamentos de água têm nos SAA, pois alteram significativamente o ponto de operação das bombas.

5.2.3 Seleção da Bomba para Rede NET3

Neste item estão apresentados os resultados da seleção das bombas da Rede NET3, para os Casos 1, 2 e 3, conforme exposto na Tabela 5.4, em dois cenários: duas elevatórias com uma única bomba trabalhando em cada uma, e duas bombas trabalhando em paralelo em cada elevatória. Pela Tabela 5.8 podem ser retiradas algumas informações importantes. É nítido que quanto maior o valor da tarifa, maiores são os custos, tanto para os casos com apenas uma bomba e com duas bombas em paralelo. Verifica-se que os custos com a energia foram muito pequenos se comparados com os das perdas de água para os resultados com as tarifas 3,08 R\$/m³ e 7,82 R\$/m³.

Tabela 5.8 - Resultado da otimização para os Caso 1, 2 e 3, considerando dois cenários.

				Caso 1	Caso 2	Caso 3
Uma bomba	Elevatória "Lake"		Q _{BEP} [m ³ /h]	429,11	419,17	766,95
			H _{BEP} [m]	145,84	151,91	280,32
	Elevatória "River"		Q _{BEP} [m ³ /h]	1.005,34	1.496,89	516,97
			H _{BEP} [m]	48,31	40,63	41,30
	Custo [\$/dia]		Energia	10.270,90	10.777,54	15.978,19
			Perda	4.058,31	41.129,81	105.176,28
			Penalização	38.408,00	38.308,00	37.508,00
Total			52.737,21	90.215,35	158.662,48	
Duas bombas em paralelo	Elevatória "Lake"	Bomba 1	Q _{BEP} [m ³ /h]	505,35	591,44	590,07
			H _{BEP} [m]	112,85	129,24	76,20
	Bomba 2	Q _{BEP} [m ³ /h]	10,19	10,66	13,12	
		H _{BEP} [m]	22,53	39,57	24,28	
	Elevatória "River"	Bomba 1	Q _{BEP} [m ³ /h]	981,24	993,13	816,61
			H _{BEP} [m]	61,89	85,45	89,79

	Bomba 2	Q _{BEP} [m ³ /h]	10,00	15,41	10,00
		H _{BEP} [m]	15,69	10,12	10,18
Custo [R\$/dia]		Energia	11.453,59	13.397,02	13.990,53
		Perda	4.602,41	43.189,81	107.631,88
		Penalização	39.008,00	62.108,00	46.508,00
		Total	55.064,00	118.694,83	168.130,41

Nas Tabelas 5.8 e 5.10 constata-se que para o caso com duas bombas em paralelo o algoritmo, assim como para o resultados da rede *Anytown*, manteve apenas uma bomba ligada. Desta forma, conclui-se que para rede NET3 não compensa energeticamente colocar mais de uma bomba nas estações elevatórias. Considerando o exposto, as análises dos resultados mais aprofundadas foram feitas apenas para o cenários com uma bomba funcionando.

Assim como para o cenário com uma bomba, o cenário para duas bombas em paralelo, o algoritmo mantém melhor resposta para os custos com a energia quando a tarifa de água é menor. Entende-se que devido aos custos maiores com a água, o algoritmo prioriza manter menores pressões na rede, e tira o foco de redução dos custos energéticos. Ou, como apresenta a Tabela 5.9, os resultados do Caso 3 não apresentam boa convergência, sendo que os gastos energéticos no horário fora de pico foram muito elevados, com valores 94% acima dos valores apresentado para o Caso 1. Além disso, apresentou pressão 3,1% maiores quando comparado com os Casos 1 e 2.

Pela Tabela 5.9 e Figura 5.10 (a) e (b) observa-se que os resultados dos Casos 1 e 2 foram muito parecidos, e atribui-se ao valor da tarifa de água a melhor eficiência energética apresentada para o Caso 1. Houve uma redução de 7,6 % do consumo médio de energia do Caso 1 para o 2, e essa diferença pode ser observada também pelos resultados das potências para as Elevatórias “Lake” e “River”, que por mais que tenham apresentado um perfil semelhante ao longo das 24 horas, o Caso 1 apresentou valores relativamente menores da potência. Outro ponto importante para ser notado está relacionado com o volume de água perdido para cada caso. Pela Tabela 5.9 e 5.10 nota-se uma tendência na redução do volume de água perdido do Caso 1 ao Caso 3, ou seja, quando o a rede apresenta tarifas de água maior, a otimização tenta reduzir os valores de perda, negligenciando, assim, os custos energéticos.

Tabela 5.9 - Dados dos gastos energéticos e pressão média da rede NET3 – bomba únicas.

	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Elevatória "River"	Elevatória "Lake"	Elevatória "River"	Elevatória "Lake"	Elevatória "River"	Elevatória "Lake"
Demanda HP (kW)	0,0	67,0	0,0	67,4	18,3	0,0
Consumo HP (kW)	0,0	200,6	0,0	201,6	54,5	0,0
Consumo Médio HP (kW)	33,4		33,6		9,1	
Demanda FP (kW)	170,7	220,8	190,0	226,7	86,9	754,2
Consumo FP (kW)	2.127,0	2.794,2	2.459,5	2.854,5	874,4	8.695,3
Consumo Médio FP (kW)	117,2		126,5		227,9	
Consumo Médio	88,6	124,8	102,5	127,3	38,7	362,3
Consumo Total HP (kW)	200,6		201,6		54,5	
Consumo Total FP (kW)	4.921,2		5.314,0		9.569,8	
Consumo Médio Total	106,7		114,9		200,5	
Pressão Média na Rede (m)	47,5		47,5		49,0	
Volume de água perdido (m³)	13.527,70		13.353,83		13.449,65	

Tabela 5.10 - Dados dos gastos energéticos e pressão média da rede NET3 – bombas em paralelo.

	Caso 1				Caso 2				Caso 3			
	Elevatória "River"		Elevatória "Lake"		Elevatória "River"		Elevatória "Lake"		Elevatória "River"		Elevatória "Lake"	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Demanda HP (kW)	0,0	0,0	99,2	0,0	73,8	0,0	0,0	0,0	54,6	0,0	92,1	0,0
Consumo HP (kW)	0,0	0,0	250,1	0,0	147,7	0,0	0,0	0,0	163,7	0,0	175,3	0,0
Consumo Médio HP (kW)	41,7				24,6				56,5			
Demanda FP (kW)	196,4	0,0	174,9	0,0	317,8	0,0	225,8	0,0	285,8	0,0	142,5	0,0
Consumo FP (kW)	2.343,1	0,0	2.653,0	0,0	3.722,3	0,0	3.260,2	0,0	2.326,3	0,0	1.559,0	0,0
Consumo Médio FP (kW)	119,0				166,2				92,5			
Consumo Médio	97,6	0,0	121,0	0,0	161,2	0,0	135,8	0,0	103,8	0,0	72,3	0,0
Consumo Total HP (kW)	250,1				147,7				339,0			
Consumo Total FP (kW)	4.996,1				6.982,5				3.885,3			
Consumo Médio Total	109,3				148,5				88,0			
Pressão Média na Rede (m)	48,1				49,9				46,1			
Volume de água perdido (m³)	15.341,36				14.022,66				13.763,67			

Para os três casos observou-se que a prioridade foi manter as bombas em rotações menores nos horários de pico, e como consequência houve a redução do valor da pressão média neste mesmo período, de 17 às 19 horas. Pela Figura 5.11 também se observa a influência de funcionamento dos tanques no horário de pico, quando o nível crescente desde o início do dia começa a sofrer uma queda. Tendo isto em conta, conclui-se que parte do abastecimento de água no horário de pico foi feito por gravidade.

A Figura 5.10 (a) e (b) mostra que, inclusive no horário de pico, não houve período com bombas desligadas. Esta constatação mostra que durante as 24 horas houve distribuição de água por recalque, e ao se observar a Figura 5.11, os tanques não apresentam variação considerável de nível de água, dando indícios de serem dispensáveis ao sistema de distribuição de água NET3.

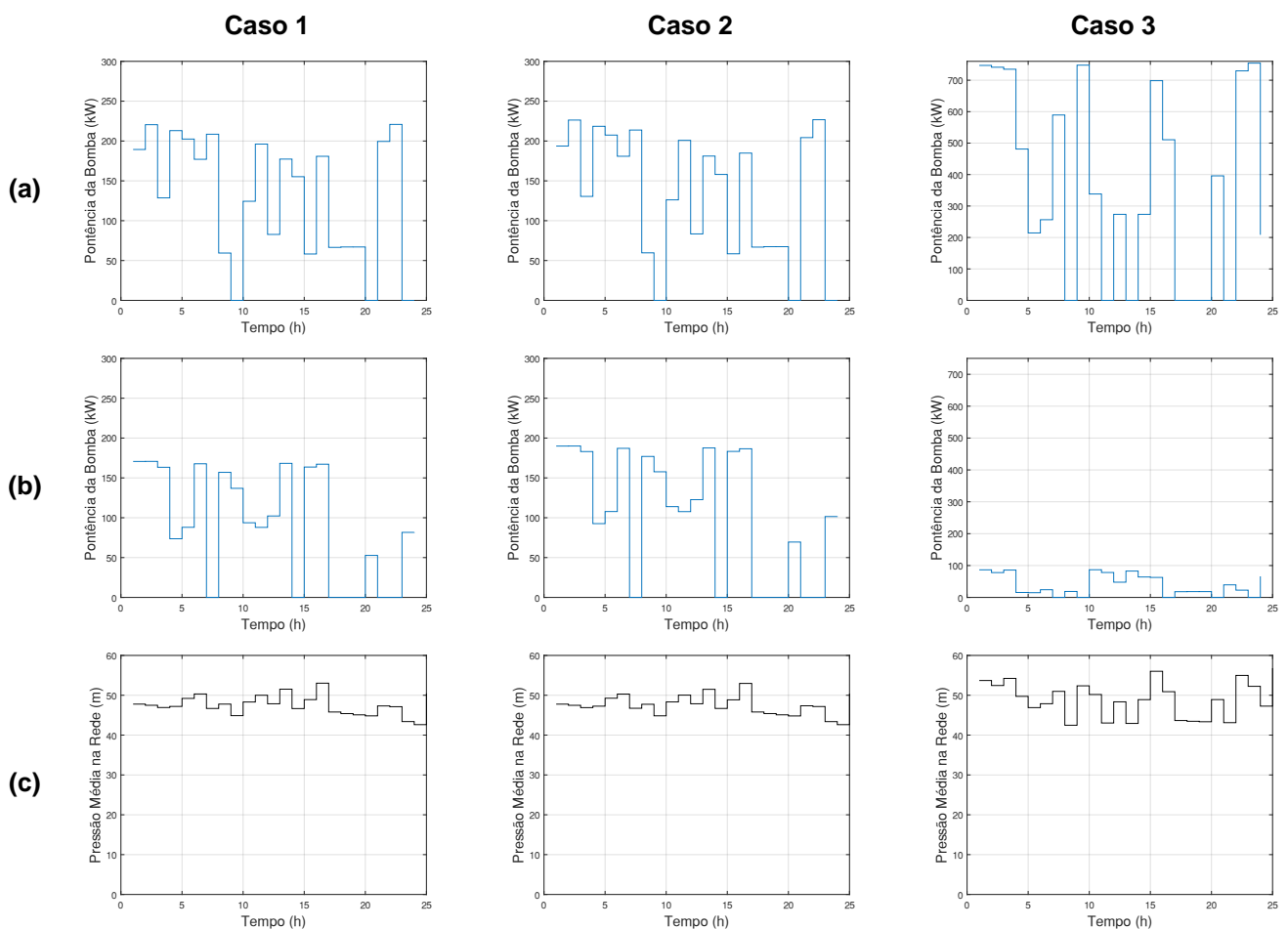


Figura 5.10 - Resultados usando uma bomba: a) Potência da bomba “Lake”; b) Potência da bomba “River”; c) Pressão média na rede.

Para o Caso 3, nota-se pela Figura 5.10 (a) e (b) que a bomba “Lake” apresentou valores de potência muito maiores se comparado ao da bomba “River”, podendo ter sobrecarregado a bomba “Lake”. Este resultado gerado, pode ser justificado pela convergência ruim, mencionada anteriormente. No caso da Bomba “Lake” a maior potência foi de 754,24 kW, enquanto para a bomba “River” foi de 86,86 kW, ou seja, uma diferença de 8,7 vezes. A baixa eficiência energética do resultado apresentado, pode ser associada aos níveis dos tanques, exposto na Figura 5.11 (c), em que os níveis de água dos tanques para o Caso 3, praticamente subiram durante as 24 horas, mostrando que não foi bem utilizada a possibilidade de distribuição por gravidade.

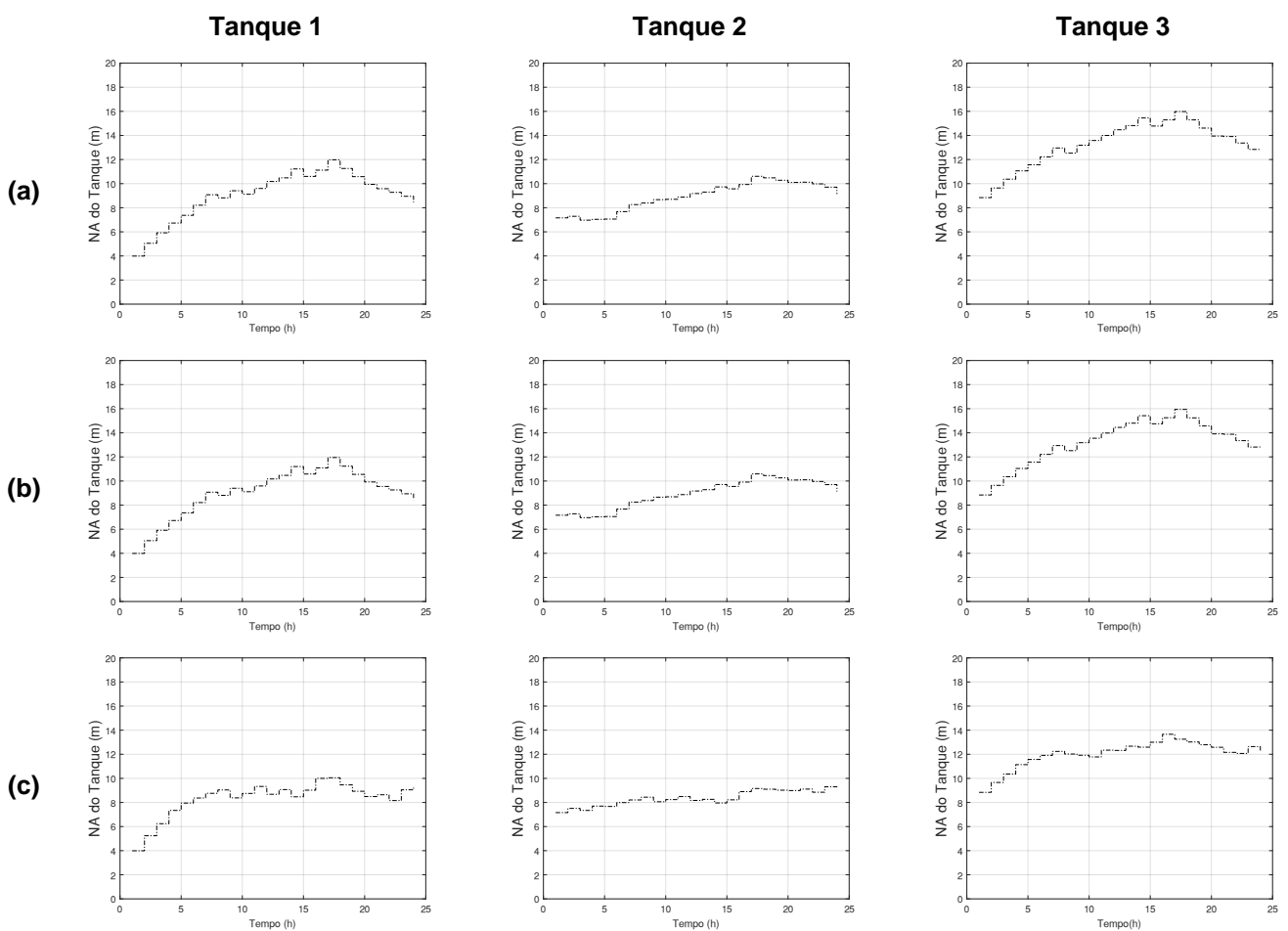


Figura 5.11 - Nível de Água nos tanques: a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3.

No caso da Rede NET3, os resultados dos níveis dos tanques foram muito penalizados, pois passaram do limite imposto, de 10 metros. Além disso, nota-se que todos os tanques

mantiveram níveis de água altos durante as 24 horas. Isto mostra que as elevatórias gastaram energia para fazer o enchimento dos tanques, mas os tanques não fizeram a distribuição de água necessária para aumentar a eficiência energética do sistema. No passo seguinte da análise da Rede NET3, em que fez-se a localização otimizada dos *Boosters* na rede, foi feita uma análise mais a fundo da importância dos tanques implantados na rede NET3.

5.2.4 Localização das Estações Elevatórias

A localização otimizada das Estações Elevatórias, como explicitado anteriormente, foi feita pelo Método da Rede Troncal. Esta etapa da pesquisa foi aplicada apenas para as redes NET3 e D-town, devido ao maior porte destas redes. Nos dois casos foi considerado que a rede troncal engloba 40% dos trechos da rede. A Figura 5.12 apresenta em vermelho a RT para a rede NET3. Estes trechos são os candidatos a instalação dos *boosters*, de forma a permitir que o algoritmo de otimização encontre a melhor opção. Foram feitas duas análises, uma considerando um número elevado de *boosters* instalados (10 *Boosters*), e a segunda considerando 4 *boosters* ao longo da rede. Os locais de instalação dos *Boosters* estão apresentados na Figura 5.13 (a) e (b).

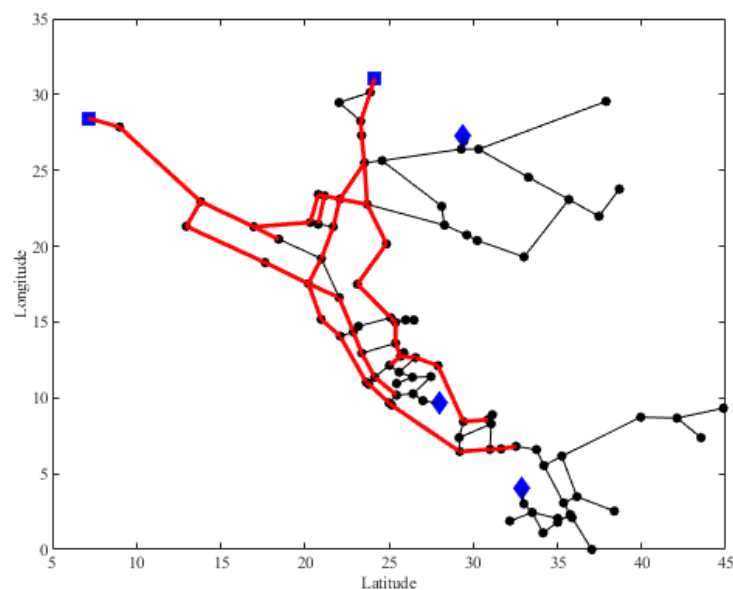


Figura 5.12 - Rede Troncal das redes: a) NET3; b) D-town.

Os resultados apresentados pela rede contendo 10 *Boosters* mostram que a quantidade elevada pode apresentar resultados com pouca eficiência energética ao sistema. No entanto, os

resultados apontados pela rede com 4 Boosters apresentaram maior controle operacional, se comparado aos resultados dos Caso 1, 2 e 3 da rede NET3, expostos no Capítulo 5.2.3.

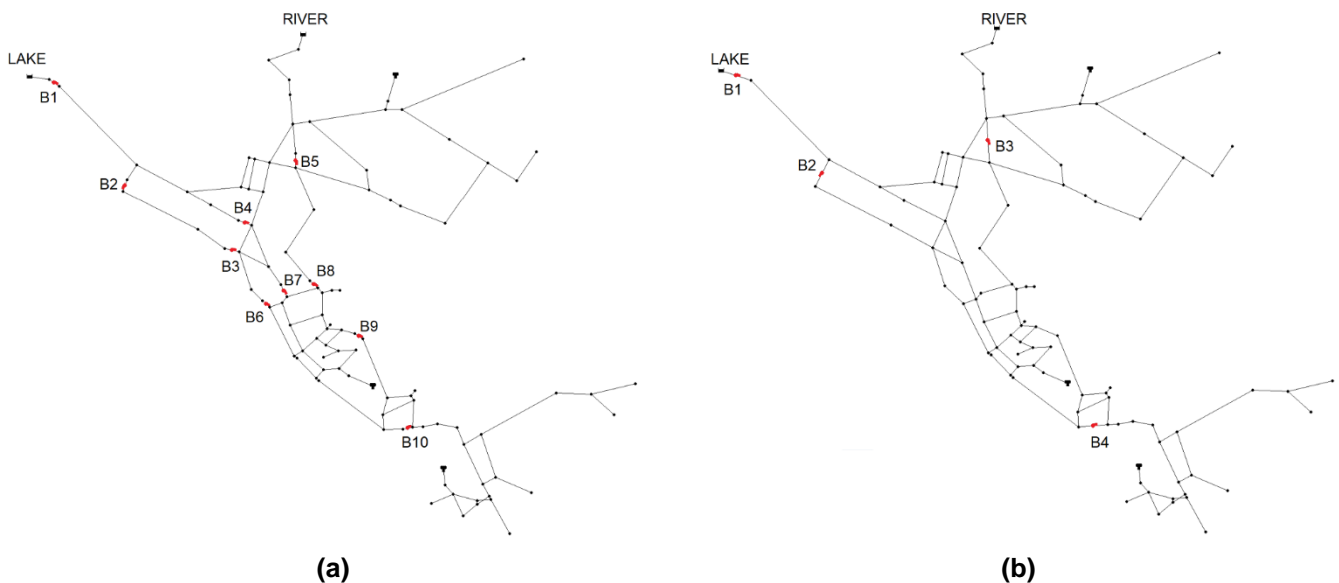


Figura 5.13 – Localização dos Boosters locados na Rede NET: a) 10 boosters; b) 4 boosters.

A rede com os 10 *Boosters* como apresenta a Tabela 5.11 mostram resultados elevados de gastos com energia. No entanto, por mais que os resultados tenham sido desfavoráveis para a eficiência energética, servem de base para definição da melhor locação dos *Boosters* na rede, como apresentando na Figura 5.13 (b), onde foram locados apenas 4 *Boosters* na rede. Desta forma, os resultados apresentados pela rede com 10 *Boosters* direcionam para a melhor escolha de instalação. De posse dos resultados, pode-se averiguar os locais que mantiveram as bombas em operação na rede com os 10 Boosters. Assim, foram identificados com maior precisão o local de instalação dos 4 Boosters, deixando o processo mais otimizado. Como será exposto ao longo do item, este processo permitiu que os locais selecionados fossem mais adequados a operação do sistema, apresentando condições operacionais mais eficientes.

Os resultados para a rede com 4 *Boosters* mostraram maior controle operacional da rede, apresentando menores penalizações, se comparado ao Caso 1 do capítulo 5.2.3, que apresentou penalização igual a 38.408,00. No entanto, a penalização novamente ocorreu devido aos níveis dos tanques na rede, que também ultrapassaram o nível de 10 metros. Observa-se que o consumo de energia, também comparado ao Caso 1 do capítulo 5.2.3, foi maior para a rede com

4 *Boosters*, que pode ser relacionado com a pressão imposta na rede. O Caso 1 apresentou pressão média de 47,5 m, valor menor do que o apresentado para o caso com os 4 *Boosters*. Entende-se que para o Caso 1, foi priorizada a redução de vazamentos, mantendo menores pressões, mas infringindo a restrição de pressão mínima de 30 metros a ser mantida. Este fato, acarreta na possibilidade do não abastecimento de nós em determinados períodos do dia.

Tabela 5.11 – Resultados da otimização da Rede NET3 com 10 *Boosters* e 4 *Boosters*.

		10 Boosters	4 Boosters
Bomba 1	Q_{BEP} [m ³ /h]	1.996,17	204,34
	H_{BEP} [m]	300,00	10,14
Bomba 2	Q_{BEP} [m ³ /h]	327,85	10,11
	H_{BEP} [m]	152,04	61,32
Bomba 3	Q_{BEP} [m ³ /h]	283,02	979,77
	H_{BEP} [m]	10,06	10,92
Bomba 4	Q_{BEP} [m ³ /h]	1.519,99	534,26
	H_{BEP} [m]	10,03	227,15
Bomba 5	Q_{BEP} [m ³ /h]	229,06	-
	H_{BEP} [m]	42,31	-
Bomba 6	Q_{BEP} [m ³ /h]	54,55	-
	H_{BEP} [m]	10,01	-
Bomba 7	Q_{BEP} [m ³ /h]	118,10	-
	H_{BEP} [m]	298,27	-
Bomba 8	Q_{BEP} [m ³ /h]	42,86	-
	H_{BEP} [m]	10,01	-
Bomba 9	Q_{BEP} [m ³ /h]	402,56	-
	H_{BEP} [m]	21,55	-
Bomba 10	Q_{BEP} [m ³ /h]	13,10	-
	H_{BEP} [m]	232,10	-
Custo [R\$/dia]	<i>Energia</i>	87.529,74	13.199,91
	<i>Perda</i>	5.207,21	4.479,55
	<i>Penalização</i>	10.228,00	10.108,00
	Total	102.964,95	27.787,47

A Tabela 5.12 apresenta os dados de gastos de energia ao longo do dia na rede com 4 *Boosters*. Como pode ser observado, o *Booster* 4 manteve-se desligado durante todo o tempo, mostrando que não há necessidade de implantação neste local. Também pode ser observado que os consumos de energia médios no horários de pico, de modo geral, foram menores que do horário fora do pico. O *Booster* 2, no entanto, apresentou maior consumo neste período, mas por ter

dimensões muito menores que os *Boosters* 1 e 3, não teve peso no valor médio total. Pela Figura 5.14, pode ser visto o perfil operacional que foi empregado aos *Boosters*.

Tabela 5.12 - Dados dos gastos energéticos e pressão média da rede NET3 – 3 *Boosters*.

	Bombas			
	1	2	3	4
Demanda HP (kW)	94,94	3,64	10,54	0,00
Consumo HP (kW)	284,36	10,82	31,59	0,00
Consumo Médio HP (kW)	94,79	3,61	10,53	0,00
Demanda FP (kW)	396,08	2,95	42,10	0,00
Consumo FP (kW)	5.333,66	14,27	472,21	0,00
Consumo Médio FP (kW)	253,98	0,68	22,49	0,00
Consumo Médio por Bomba	234,08	1,05	20,99	0,00
Consumo Total HP (kW)	326,76			
Consumo Total FP (kW)	5.820,14			
Consumo Médio Total	64,03			
Pressão Média na Rede (m)	49,60			
Volume de água perdido (m ³)	14.931,85			

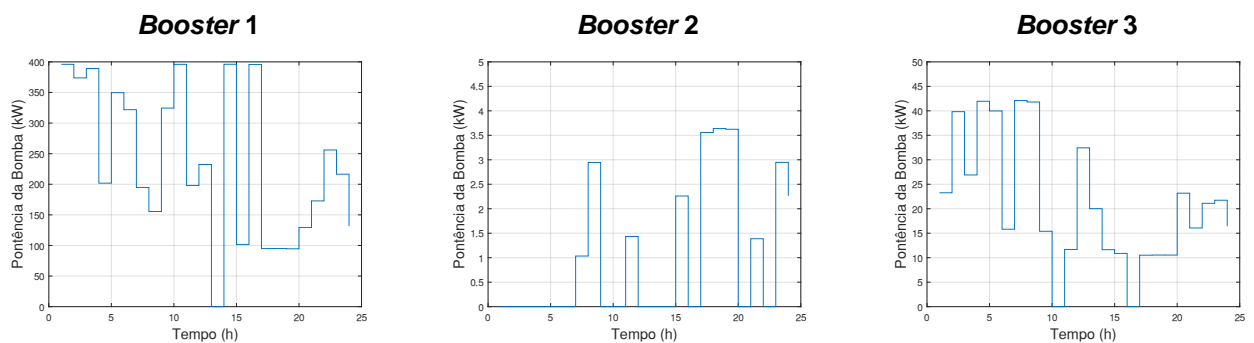


Figura 5.14 – Potência das bombas da rede com 4 *Boosters*.

Os tanques, assim como exposto para os casos apresentando no capítulo 5.2.3, mostraram pouca influência do abastecimento de água na rede, isto porque os tanques quase não apresentam variação de nível ao longo das 24 horas. O Tanque 1 foi o que apresentou uma variação maior, distribuindo água no horário de pico. Já os Tanque 2 e 3 tiveram os níveis de água crescentes durante todo o período, se mostrando desnecessários a rede.

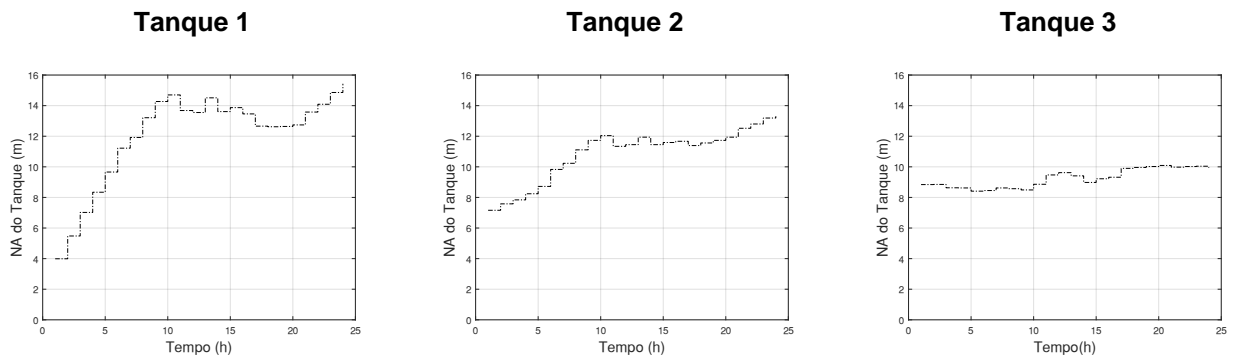


Figura 5.15 - Nível de água nos tanques da rede NET3 com 4 *Boosters*.

5.2.5 Análise da influência dos tanques na rede NET3

Devido ao comportamento dos tanques na rede apresentados nos capítulos antecedentes, fez-se necessário analisar os resultados com as redes funcionando apenas com o Tanque 1. Desta forma, pode ser visto na Tabela 5.13, os resultados gerados para o Caso 1 do capítulo 5.2.3 com uma bomba e duas bombas em paralelo e os casos com 4 e 10 *Boosters* do capítulo 5.3.4.

Tabela 5.13 – Resultado dos casos analisados trabalhando sem os Tanques 2 e 3.

	Uma bomba	Duas bombas em paralelo	4 Boosters	10 Boosters
Resultado sem os tanques 2 e 3				
<i>Energia</i> [R\$/dia]	19.548,93	6.637,33	3.991,45	81.818,95
<i>Perda</i> [R\$/dia]	4.203,11	3.951,09	4.339,95	5.230,52
<i>Penalização</i> [R\$/dia]	36.008,00	40.608,00	0,00	0,00
<i>Total</i> [R\$/dia]	59.760,03	51.196,41	8.331,40	87.049,46
Resultado com todos os tanques				
<i>Energia</i> [R\$/dia]	10.270,90	11.453,59	13.199,91	87.529,74
<i>Perda</i> [R\$/dia]	4.058,31	4.602,41	4.479,55	5.207,21
<i>Penalização</i> [R\$/dia]	38.408,00	39.008,00	10.108,00	10.228,00
<i>Total</i> [R\$/dia]	52.737,21	55.064,00	27.787,47	102.964,95

Pode ser observado que para o Caso 1 funcionando com uma bomba em paralelo, a retirada dos tanques não gerou ganhos econômicos. Já para a rede operando com duas bombas em paralelo, o custo com as perda de água e custos energéticos foram menores, mas observa-se que a penalização aumentou. Já os caso com 4 *Boosters* e 10 *Boosters*, houve uma melhora nos resultados, principalmente por não ter apresentado penalizações na rede. Para a rede com os 4 *Boosters*, houve um redução de 3,3 vezes do valor dos gastos energéticos com todos os tanques

na rede, e uma melhora de 6,9% dos gastos energéticos para o caso com 10 *Boosters*. Os perfis dos tanques dos quatro casos estão apresentados na Figura 5.16.

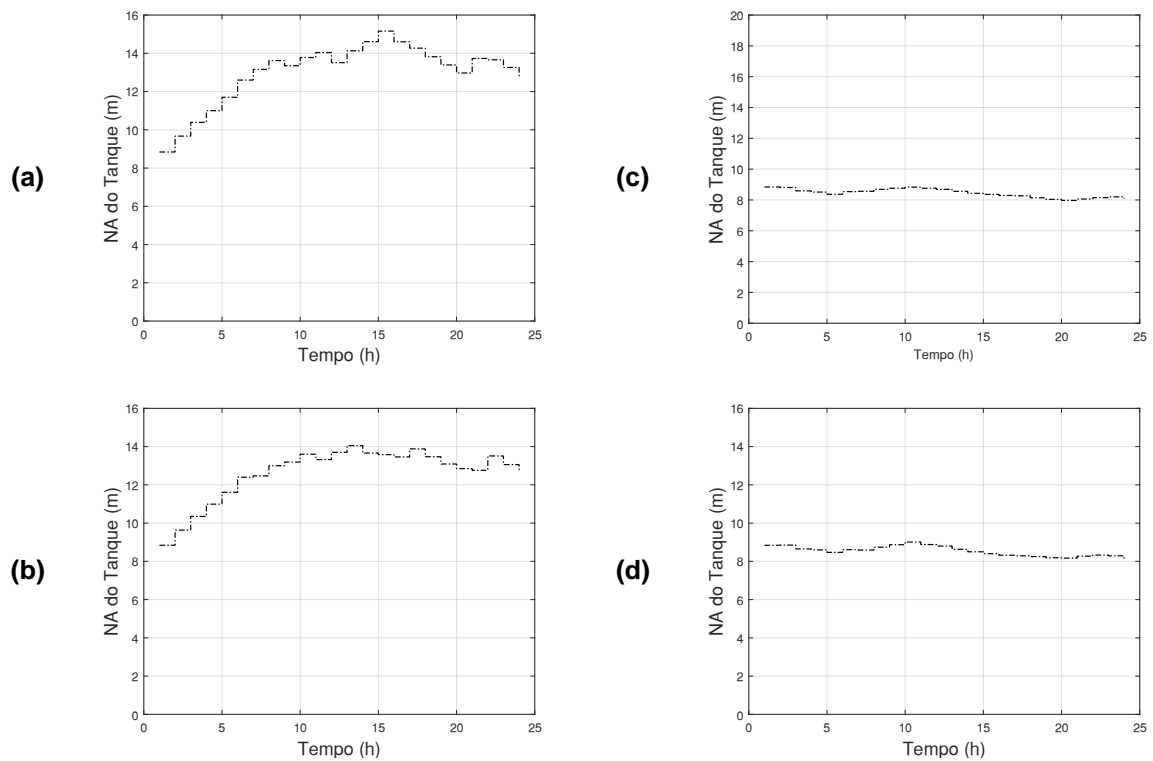


Figura 5.16 – Níveis de água dos tanques: a) Caso 1 com uma bomba; b) Caso 1 com duas bombas em paralelo; c) 4 *Boosters*; d) 10 *Boosters*.

As bombas da rede com 4 *Boosters* obtiveram os resultados apresentados na Figura 5.17, sendo que o *Booster* 4 não teve o perfil apresentado por ser mantido desligado durante todo o período. Comparando os resultados com os perfis de potência das bombas apresentados na Figura 5.14, observa-se que a retirada dos tanques permitiu um comportamento mais contínuo e não houve necessidade de atingir potências muito elevadas.

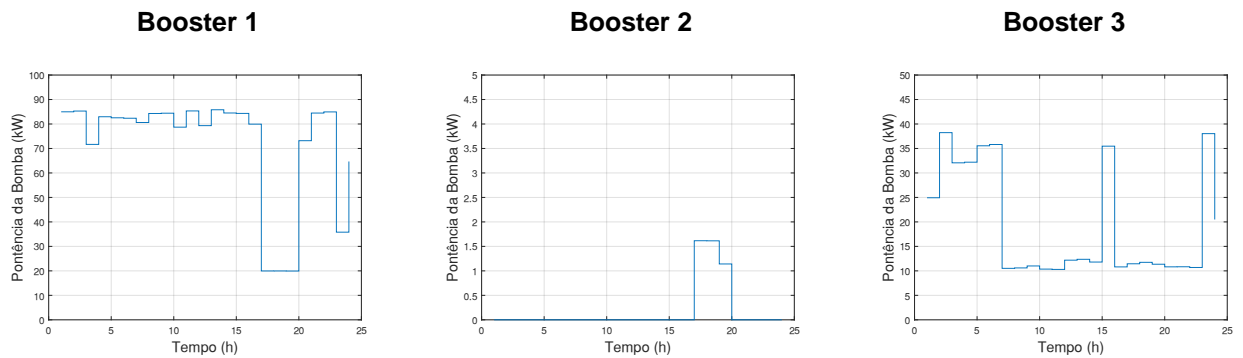


Figura 5.17 – Potência das bombas para o caso com 4 *Boosters* na rede.

Os comportamentos apresentados, principalmente para a rede com 4 *Boosters*, mostram a importância que os tanques bem distribuídos na rede tem para a operação dos SAA. Para todos os casos, observou que os Tanques 2 e 3 não forneceram água por gravidade a rede, apenas receberam água. Este comportamento sobrecarrega as bombas, pois operam com vazões mais elevadas para poder abastecer os tanques. Além disso, manter a água tratada por longos períodos nos tanques pode afetar a qualidade da água, não sendo um comportamento recomendado. Assim, destaca-se a importância da localização adequada dos tanques, e considera-se também a necessidade de uma localização otimizada destes dispositivos.

5.3 Rede D-Town

5.3.1 Descrição da Rede

A Rede *D-Town*, apresentada por Marchi et. al. (2013) e Stoken et. al. (2012), foi escolhida como estudo de caso devido à complexidade operacional que apresenta. A rede é composta por 388 nós, 429 tubos, 5 estações elevatórias, 4 válvulas redutoras de pressão (VRP), 1 reservatório de nível fixo e 7 reservatórios de nível variável. A rede apresenta cinco categorias de consumo diferentes, com os valores do fator de demanda, variando entre 0,3 e 0,9, que devem ser atendidos através das bombas locadas na rede. Como sugerido por Stoken et. al. (2012), no estudo de caso foram aplicadas bombas com rotação variável. A diferença aplicada foi com relação as curvas de demanda, que como apresentado por Stoken et. al. (2012) é de 168 h, todavia apenas as primeiras 24 horas de operação foram estudadas. A Figura 5.18 apresenta o layout da rede *D-town*.

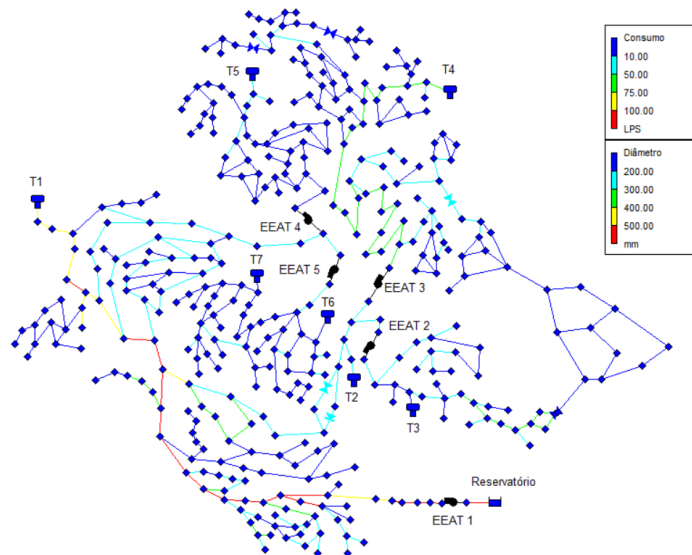


Figura 5.18 – Rede D-Town.

As restrições empregadas nessa rede foram as mesmas adotadas por Stoken et. al. (2012), sendo 25 metros de pressão mínima, o nível máximo do tanque de 10 metros e não havendo nível mínimo, podendo o tanque esvaziar. Vale ressaltar, que para essa rede, devido à dificuldade de convergência do código, foi necessário flexibilizar as penalizações. Assim, admitiu-se uma diferença de 1 metro entre o nível do tanque final e inicial, sem que houvesse penalização.

As mesmas tarifas de energia aplicadas por Stoken et. al. (2012) foram utilizadas neste trabalho, como mostra a Tabela 5.14. Para a rede D-Town também foi considerada a existência de vazamentos de água na rede, sendo adotado o valor da despesa total mínima com os serviços por m³ faturado do Brasil, ou seja R\$ 0,30 como forma de mensurar seu valor econômico.

Tabela 5.14 - Tarifas de Energia aplicadas na rede D-town

Hora (h)	Tarifa de Energia (R\$/kWh)	Hora (h)	Tarifa de Energia (R\$/kWh)
1	6,72	13	27,68
2	6,72	14	27,68
3	6,72	15	27,68
4	6,72	16	27,68
5	6,72	17	27,68
6	6,72	18	10,94
7	6,72	19	10,94
8	10,94	20	10,94
9	10,94	21	10,94
10	10,94	22	6,72
11	27,68	23	6,72
12	27,68	24	6,72

Fonte: Stoken *et. al.* (2012).

Para a Rede D-town, antes de fazer a localização otimizada das Estações Elevatórias, dois casos foram analisados:

- **Caso 1** – Operação do sistema com bombas únicas operando por Estação Elevatória de Água Tratada (EEAT).
- **Caso 2** – Operação do sistema com as EEAT operando com duas ou três bombas em paralelo.

Esses dois casos permitiram tirar conclusões importantes sobre a influência que as dimensões das elevatórias tem sobre a eficiência energética. Como será apresentado, os resultados confirmam as conclusões apresentadas para as redes Anytown e NET3.

5.3.2 Seleção das Bombas

Os resultados apresentados pela rede D-town, mostram que a instalação de uma bomba de maior porte em cada estação elevatória pode ser mais vantajoso energeticamente, por apresentar menores custos. O perfil de operação das bombas para o Caso 2 pode trazer discussões mais aprofundadas no que tange a aplicação dos métodos de otimização, isto porque, como apresentado na Tabela 5.15, na maioria do tempo as bombas das elevatórias intercalam a operação, ou seja, não operam em paralelo.

Tabela 5.15 – Resultados da potência de operação das bombas do Caso 2

Hora	Potência (kW)										
	EEAT 1			EEAT 2		EEAT 3		EEAT 4		EEAT 5	
	Boosters										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,00	1.223,15	0,00	0,00	181,44	0,00	114,00	48,75	0,00	0,00	23,40
2	0,00	1.197,16	0,00	3,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59,78	0,00
3	0,00	726,44	0,00	0,00	84,08	0,00	113,47	46,21	0,00	0,00	0,00
4	0,00	414,08	0,00	0,00	0,00	0,00	94,93	0,00	24,17	0,00	37,33
5	0,00	675,60	0,00	0,00	0,00	0,00	52,92	0,00	31,36	16,35	0,00
6	0,00	0,00	297,05	0,00	82,83	0,00	110,16	0,00	54,10	0,00	48,77
7	104,88	0,00	167,83	0,00	112,84	0,00	86,61	0,00	26,40	0,00	23,70
8	0,00	0,00	589,05	0,00	0,00	0,00	111,59	29,30	0,00	0,00	53,32
9	0,00	580,67	0,00	0,00	79,42	0,00	0,00	0,00	32,20	0,00	29,64
10	0,00	1.154,44	0,00	0,00	181,22	0,00	68,19	0,00	28,99	0,00	47,26
11	0,00	908,53	0,00	0,00	0,00	0,00	48,00	0,00	14,57	20,15	0,00
12	0,00	1.078,71	0,00	0,00	54,66	0,00	0,00	57,00	0,00	13,30	0,00
13	0,00	1.169,73	0,00	0,00	130,25	0,00	0,00	70,43	48,36	0,00	37,14
14	0,00	0,00	564,74	0,00	60,39	0,00	0,00	0,00	26,78	0,00	37,23
15	0,00	1.131,00	0,00	0,00	136,70	0,00	114,16	64,30	0,00	0,00	53,69
16	0,00	977,63	0,00	0,00	0,00	0,00	75,65	55,11	0,00	0,00	52,21
17	0,00	1.055,52	0,00	0,00	137,94	0,00	88,18	52,03	0,00	0,00	23,55
18	0,00	1.213,05	0,00	1,18	0,00	0,00	0,00	0,00	32,24	0,00	55,46
19	0,00	679,58	0,00	0,00	184,18	0,00	58,48	59,46	0,00	31,09	0,00
20	55,75	0,00	305,13	0,00	85,15	0,00	75,33	54,29	0,00	0,00	31,43
21	0,00	626,39	0,00	0,00	182,62	0,00	71,20	0,00	26,47	47,18	0,00
22	0,00	586,78	0,00	0,00	0,00	0,00	71,80	52,19	0,00	0,00	36,17
23	0,00	889,50	0,00	0,00	54,82	0,00	0,00	30,69	45,70	0,00	54,46
24	0,00	1.101,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,06	0,00	0,00	23,22

Além deste fator, os custos apresentados para o Caso 1 foram menores para as perdas de água e energia, mostrando que a rotina operacional adotada foi mais eficiente. No entanto, a penalização pela pressão mínima foi maior para o Caso 1. Isto mostra que em determinados períodos, alguns dos nós da rede não apresentaram a pressão mínima necessária para o abastecimento. Esta penalização também ocorreu para o Caso 2, no entanto, o valor foi 3% menor se comparado ao Caso 1. Para os dois casos o nível de água nos tanques foram penalizados, resultado que será detalhado posteriormente.

A economia de energia do Caso 1 para Caso 2 foi de aproximadamente 22%, e além disso, houve uma redução de 7,8% no custo com a perda de água na rede (Tabela 5.17). Esta redução

do consumo de energia pode ser constatada também pela diferença dos valores de potência apresentados para cada EEAT dos Casos 1 e 2, que para o Caso 1 as bombas atingiram valores de potência menores que para o Caso 2. Como exemplo, a EEAT 1 do Caso 1 a bomba apresentou valor máximo de potência igual a 708,76 kW (Tabela 5.16), enquanto que para o Caso 2 o valor máximo encontrado foi de 1223,15 kW, 72,6 % maior.

Tabela 5.16 - Resultados da potência de operação das bombas do Caso 1

Hora	EEAT 1	EEAT 2	EEAT 3	EEAT 4	EEAT 5
	Potencia (kW)				
1	501,10	19,08	173,94	9,36	205,61
2	682,01	0,00	0,00	14,39	265,44
3	231,26	0,00	0,00	0,00	139,77
4	708,76	8,30	0,00	15,23	322,67
5	422,40	15,19	107,79	13,31	0,00
6	381,47	9,04	106,35	0,00	329,77
7	702,97	0,00	107,03	15,85	553,57
8	488,96	21,72	157,68	11,99	357,16
9	703,11	0,00	0,00	19,38	100,79
10	688,41	15,60	0,00	11,04	0,00
11	494,12	8,79	173,57	19,56	504,36
12	703,12	24,01	223,82	15,73	196,65
13	275,22	18,59	179,42	0,00	0,00
14	467,61	8,34	179,37	8,54	216,01
15	595,95	20,68	99,44	0,00	160,30
16	558,56	16,78	166,49	17,57	0,00
17	636,73	14,54	145,74	9,07	406,46
18	262,33	10,93	0,00	9,18	256,52
19	575,51	13,31	97,39	14,74	466,45
20	0,00	24,45	111,93	21,15	93,70
21	479,00	21,25	151,79	23,34	486,24
22	639,55	17,74	288,60	23,88	402,80
23	672,58	16,65	168,72	9,48	0,00
24	280,77	13,77	0,00	10,61	0,00

As diferenças nos valores de potência apresentadas podem ser justificadas também pela dimensão das bombas selecionadas para cada caso. A Tabela 5.17 mostra que na maioria das EEAT as bombas selecionadas para o Caso 2 apresentam maiores dimensões, com maior capacidade de bombeamento e altura manométrica. Além disso, as Figuras 5.19 e 5.20 apresentam os comportamentos dos sete tanques presentes na rede D-town, que apresentaram

comportamentos parecidos para as duas redes, em que tiveram altas penalizações por passar do nível máximo definido, de 10 metros. Além da penalização do nível de água dos tanques, também houve penalização pelos valores das pressões mínimas apresentadas para os dois casos, em que a rede apresentou valores de pressão mínima menores que o imposto, de 25 metros. Este fator é importante para ser atentado pois pode acarretar em falhas na distribuição de água por não haver pressão suficiente em determinados períodos de tempo.

Tabela 5.17 – Resultados da otimização para o Caso 1 e 2 para a rede D-town

		Caso 1	Caso 2
EEAT 1	Q _{BEP} [m ³ /h]	888,18	325,64
	H _{BEP} [m]	239,50	119,19
	Q _{BEP} [m ³ /h]	-	1.463,03
	H _{BEP} [m]	-	274,75
	Q _{BEP} [m ³ /h]	-	1.775,38
	H _{BEP} [m]	-	140,98
EEAT 2	Q _{BEP} [m ³ /h]	101,16	1.234,61
	H _{BEP} [m]	76,07	10,09
	Q _{BEP} [m ³ /h]	-	184,64
	H _{BEP} [m]	-	299,38
EEAT 3	Q _{BEP} [m ³ /h]	696,42	1.701,12
	H _{BEP} [m]	105,96	21,22
	Q _{BEP} [m ³ /h]	-	318,86
	H _{BEP} [m]	-	118,90
EEAT 4	Q _{BEP} [m ³ /h]	98,48	353,31
	H _{BEP} [m]	82,92	77,86
	Q _{BEP} [m ³ /h]	-	213,12
	H _{BEP} [m]	-	58,87
EEAT 5	Q _{BEP} [m ³ /h]	1.934,15	1.882,32
	H _{BEP} [m]	88,08	24,25
	Q _{BEP} [m ³ /h]	-	238,85
	H _{BEP} [m]	-	84,75
Custo [R\$/dia]	Energia	301.864,67	368.743,74
	Perda	1.269,33	1.368,85
	Penalização da Pressão Mínima	7.280.000,00	7.040.000,00
	Penalização NA do Tanques	1.060.000,00	1.060.000,00
	Total	8.643.133,99	8.470.112,59

Cada tanque apresentou um perfil de funcionamento, sendo que os Tanques 1, 2, 4 e 6 tiveram aumento constante do nível de água ao longo das 24 horas. Este comportamento indica que não estão fornecendo água aos nós em nenhum momento do dia, apenas recebem vazão das bombas. O Tanque 3, por exemplo, apresenta variação do nível de água ao longo do dia, indicando que

há o fornecimento de água por gravidade em algumas horas. O comportamento é diferente para o Caso 1 e 2. Para o Caso 1, o tanque esvazia o nível de água a partir das 11 horas e volta a encher as 18 horas. Esse período coincide com o período que o maior valor da tarifa fica ativo. Para o Caso 2, o nível de água apresenta uma queda neste mesmo período, mas mais suave que para o Caso 1.

O Tanque 5 também apresenta comportamentos diferentes para os casos. No Caso 1, o tanque apresenta queda no nível de água de 14 às 20 horas, que coincide com o período das maiores tarifas, mostrando que foi utilizada uma tática operacional para reduzir os gastos com a energia. No entanto, para o Caso 2 o Tanque 5 apresentou perfil de água com constante aumento.

Já o Tanque 7 apresentou variações de nível para os dois casos, mas com perfis diferentes. Para o Caso 1 o tanque apresenta três momentos em que faz a distribuição por gravidade. O primeiro momento ocorre de 2 às 5, o segundo momento entre 10 e 11 horas e o terceiro ocorre de 19 às 23 horas. Esse comportamento permitiu distribuição de água por gravidade por vários períodos do dia, independentemente do valor da tarifa de água. Já no Caso 2 há um constante aumento do nível de água até as 10 horas, e em seguida queda constante de 10 às 15 horas, período com maior tarifa de energia.

Pelas Figuras 5.19 e 5.20 também pode ser observado que de modo geral os tanques de água do Caso 2 apresentam níveis de água mais elevados, e que apenas dois tanques dos sete instalados na rede têm papel efetivo na rede. O Caso 1 também apresentou a grande maioria dos tanques com nível de água crescente durante todo o período otimizado. Estes resultados podem indicar que existe a necessidade da melhor avaliação da locação dos tanques na rede, de forma que sejam instalados em pontos que tenham papel fundamental no abastecimentos de água.

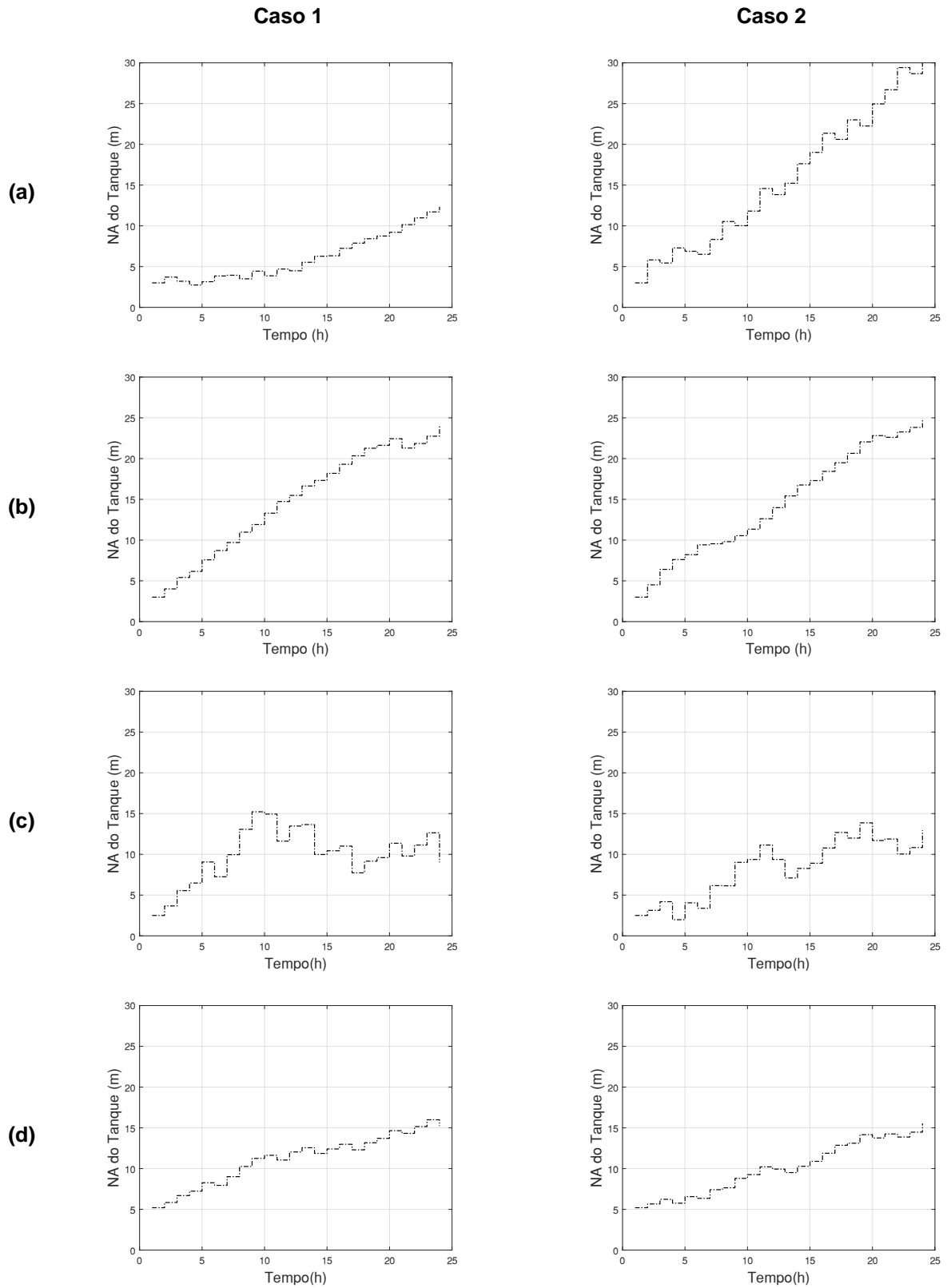


Figura 5.19 - Nível de Água nos tanques: a) Tanque 1; b) Tanque 2; c) Tanque 3; d) Tanque 4.

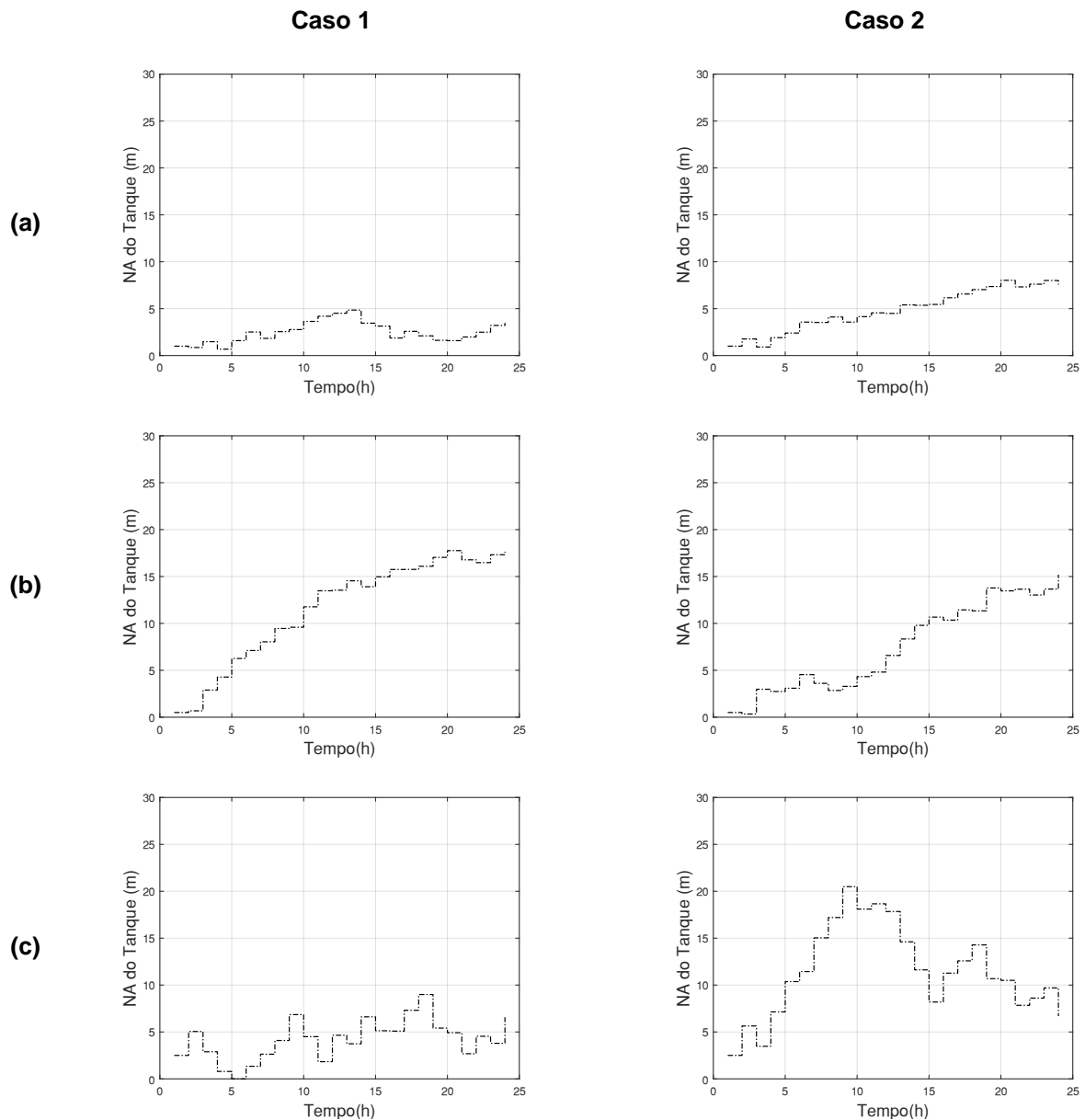


Figura 5.20 - Nível de Água nos tanques: a) Tanque 5; b) Tanque 6; c) Tanque 7.

5.3.3 Localização das Estações Elevatórias

A localização otimizada das Estações Elevatórias, como explicitado anteriormente, foi feita pelo Método da Rede Trocal. Esta etapa da pesquisa foi aplicada apenas para as redes NET3 e D-town, devido ao maior porte destas redes. Nos dois casos foi considerado que a rede troncal engloba 40% dos trechos da rede. A Figura 5.21 apresenta em vermelho a RT para a rede D-town, trechos estes candidatos a instalação dos *boosters*. De forma a permitir que o algoritmo de otimização encontre a melhor opção, um número elevado de *boosters* foi instalado –13 para

a rede D-town -, associados a um *by-pass* em trechos que tivessem passagem única, para permitir o desligamento do *booster*, caso este fosse desnecessário ao sistema. Os 13 *Boosters* foram locados considerando inicialmente as características da rede troncal, sendo considerando pontos que haviam bifurcações e trechos que tivessem passagem única. Os resultados encontrados foram comparados aos resultados da seleção das bombas para o Caso 1, por ter apresentado melhor eficiência energética que o Caso 2.

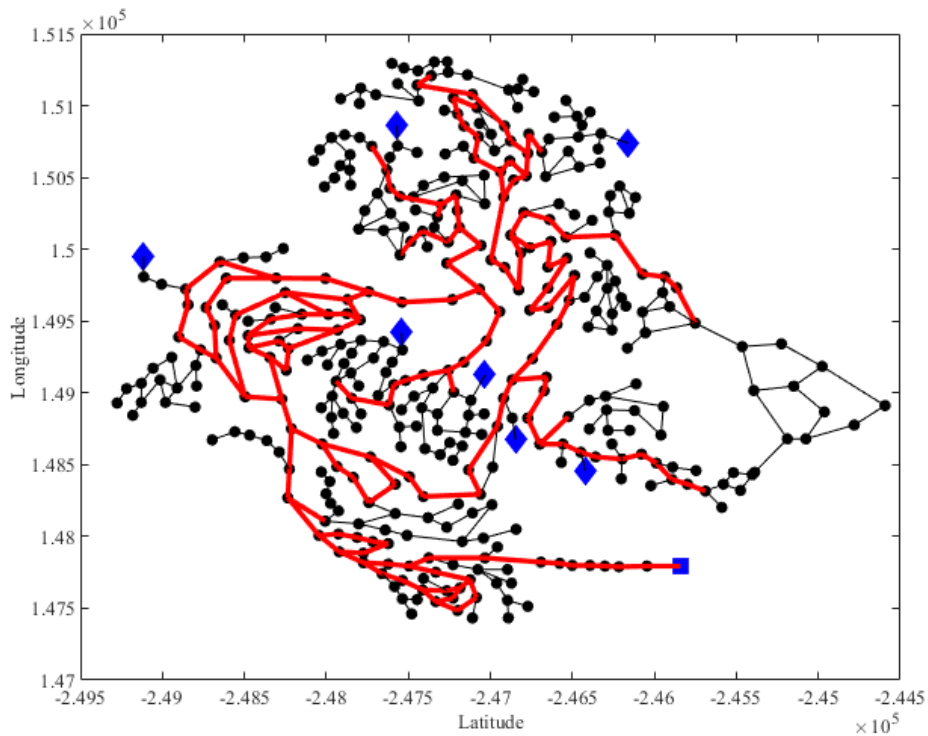


Figura 5.21 - Rede Troncal das redes: a) NET3; b) D-town.

Os 13 *Boosters* localizados na rede D-town estão apresentados na Figura 5.22. Como para os Casos 1 e 2, o caso da rede com 13 *Boosters*, otimizou simultaneamente o ponto de operação da bomba e sua velocidade de rotação a cada hora da simulação.

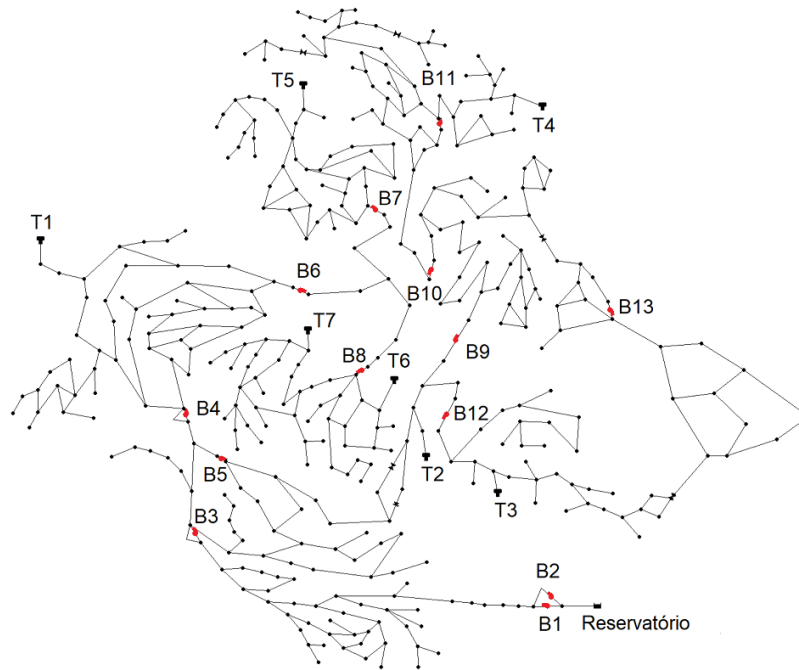


Figura 5.22 – Localização dos 13 *Boosters* na rede D-town.

A Tabela 5.18 mostra resultados importantes do caso com 13 *Boosters* na rede D-town. O aspecto mais importante é com relação ao fato da rede não ter sido penalizada pela pressão mínima, mostrando que todos os nós apresentaram pressão mínima de abastecimentos durante todo o período. Situação que não pode ser observada para os Casos 1 e 2 do capítulo da 5.3.2, que tiveram penalização por apresentarem nós com pressão abaixo da mínima imposta. Desta forma, por mais que o valor dos custos de energia do Caso 1 e 2 tenham apresentados valores menores, 29,1% e 5,7% respectivamente, a localização das bombas não garante abastecimento de água 100% do tempo.

No caso da penalização do nível de água dos tanques, apresentou o mesmo valor dos Caso 1 e 2. Assim como nos Casos 1 e 2, o nível dos tanques passaram muito do valor máximo definido, de 10 metros. Este comportamento, fez atentar para a importância da localização otimizada dos tanques.

Por fim, os gastos com a perda de água foram semelhantes aos Casos 1 e 2, sendo 5% maior que para o Caso 1 e 2,6% menor que para o Caso 2. Como apresentado no capítulo 5.3.2, o Caso 2 apresentou um comportamento operacional pouco eficiente, por manter as bombas em paralelo funcionando de forma intercalada, além de outros fatores apresentados, que

questionam a boa convergência e vantagens energéticas da implantação das bombas em paralelo. O Caso 1 adotou uma estratégia operacional eficiente, tentando diminuir os valores de pressão ao máximo, assim apresentando os menores custos com a perda de água. No entanto, apresenta penalização por apresentar pontos com pressões menores que a mínima. A Figura 5.23 apresenta o gráfico com a pressão média para o três casos.

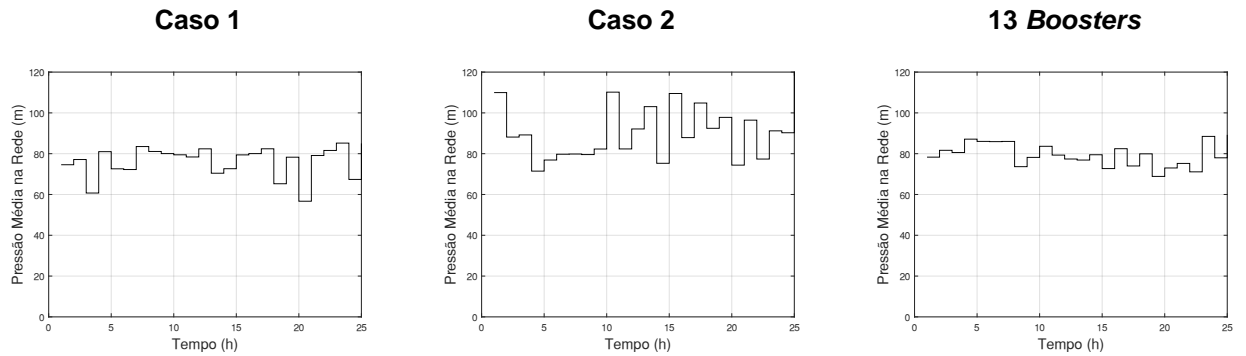


Figura 5.23 – Pressão médias da rede nos Caso 1, 2 e com 13 *Boosters*.

Tabela 5.18 – Resultados do caso com 13 Boosters

<i>Booster 1</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	654,91
	H_{BEP} [m]	280,77
<i>Booster 2</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	1.102,30
	H_{BEP} [m]	148,51
<i>Booster 3</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	142,31
	H_{BEP} [m]	51,88
<i>Booster 4</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	65,72
	H_{BEP} [m]	269,52
<i>Booster 5</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	122,29
	H_{BEP} [m]	111,61
<i>Booster 6</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	923,62
	H_{BEP} [m]	46,56
<i>Booster 7</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	1.375,79
	H_{BEP} [m]	10,15
<i>Booster 8</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	1.674,13
	H_{BEP} [m]	11,17
<i>Booster 9</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	1.735,92
	H_{BEP} [m]	83,94
<i>Booster 10</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	1.645,81
	H_{BEP} [m]	21,47
<i>Booster 11</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	10,78
	H_{BEP} [m]	103,56
<i>Booster 12</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	46,59
	H_{BEP} [m]	88,84
<i>Booster 13</i>	Q_{BEP} [m^3/h]	18,89
	H_{BEP} [m]	296,10
Custos [R\$/dia]	<i>Energia</i>	389.855,18
	<i>Perda</i>	1.333,25
	<i>Penalização - Pressão mínima</i>	0,00
	<i>Penalização NA</i>	1.060.000,00
	<i>Total</i>	1.451.188,43

O método de implantar vários *boosters* ao longo da rede permitiu que o próprio processo de otimização selecionasse alguns deles para operação. Desta forma, como pode ser visto na Tabela 5.19, três dos treze *Boosters* mantiveram-se desligados durante todo período. Este resultado mostra que não é energeticamente eficiente a implantação destes dispositivos no local da rede selecionado.

A Figura 5.24 apresenta a variação da potência dos *Boosters* durante as 24 horas. Como foi observado no Caso 2, em que todas EEAT foram implantadas com bombas trabalhando em

paralelo, os *Boosters* 1 e 2 apresentaram o mesmo padrão. A EEAT foram implantadas no início da rede em paralelo, e alternaram a operação durante as 24 horas.

Também pode ser observado na Tabela 5.18 e Figura 5.24 que o processo de otimização manteve o consumo de energia mais baixo nos períodos onde incidem as Tarifas 2 e 3, 10,4 R\$/kWh e 27,68 R\$/kWh respectivamente, se comparado com a Tarifa 1, de 6,72 R\$/kWh. Ou seja, priorizou manter a operação no horário que apresenta menor tarifa. Esse comportamento foi observado nos resultados da rede *Anytown* e NET3.

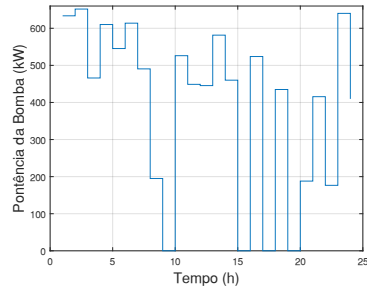
Pelas Figura 5.25 e 5.26 fez-se um comparativo do comportamento dos tanques para o Caso 1 do capítulo 5.3.2, e para o caso com 13 *Boosters*. O caso com os 13 *Boosters* apresentou os níveis com maior estabilidade que para o Caso 1, no entanto, os comportamentos foram parecidos. Os tanques 2, 4 e 6 apresentaram para os dois casos nível crescente. Já o Tanque 1 apresentou uma variação tênue do nível de água para o caso com os 13 *Boosters*, sendo que para o Caso 1 apresentou nível crescente.

Os Tanques 3, 5 e 7 tiveram variação de nível ao longo do dia, observando um papel de fornecimento de água a rede. Em todos eles, há uma redução do nível de água nos horários de maiores custos, das Tarifas 2 e 3. Esse papel dos tanques tem grande importância, pois permite que as bombas diminuam a rotação ou desliguem, economizando energia.

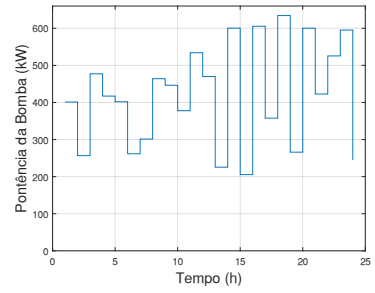
Tabela 5.19 - Dados dos gastos energéticos e pressão média da rede D-town – Caso com 13 Boosters.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Demanda (kW)	Tarifa 1	651,82	0,00	0,00	0,00	14,95	253,24	37,01	54,65	595,09	97,59	0,00	16,27	34,62
	Tarifa 2	526,09	425,19	0,00	0,00	46,69	181,87	36,81	50,89	634,25	95,98	0,00	50,48	25,55
	Tarifa 3	581,50	480,04	0,00	0,00	80,51	266,35	32,87	605,44	8,21	80,25	0,00	49,07	29,85
Consumo (kW)	Tarifa 1	4.827,92	0,00	0,00	0,00	32,46	1.304,99	179,30	405,86	3.637,39	546,13	0,00	75,16	61,29
	Tarifa 2	1.759,49	881,11	0,00	0,00	113,47	761,85	202,20	230,33	3.211,37	515,93	0,00	96,35	40,72
	Tarifa 3	2.459,67	956,29	0,00	0,00	171,33	737,81	98,82	2.998,45	39,87	400,41	0,00	194,01	84,68
Consumo Médio (kW)	Tarifa 1	523,75	0,00	0,00	0,00	3,25	130,50	17,98	40,59	388,27	56,43	0,00	9,07	6,22
	Tarifa 2	251,36	125,87	0,00	0,00	16,21	108,84	28,89	32,90	458,77	73,70	0,00	13,76	5,82
	Tarifa 3	351,38	136,61	0,00	0,00	24,48	105,40	14,12	428,35	5,70	57,20	0,00	27,72	12,10
Consumo Médio por Bomba		394,03	76,56	0,00	0,00	13,22	116,86	20,03	34,59	420,52	61,69	0,00	9,46	7,82
Consumo Médio (kW)	Tarifa 1	117,61												
	Tarifa 2	111,61												
	Tarifa 3	116,30												
Consumo Total (kW)		27.714,70												
Pressão Média na Rede (m)		79,48												
Volume de água perdido (m³)		4.444,17												

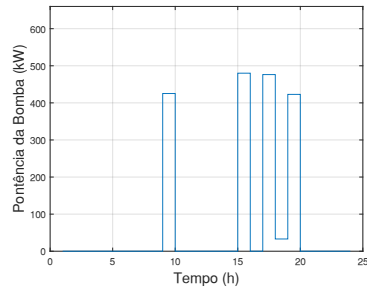
Boosters 1



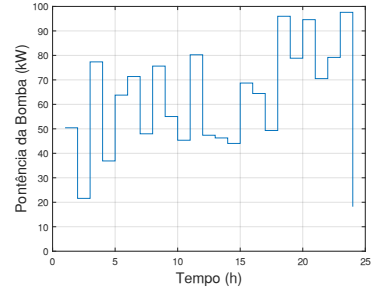
Boosters 8



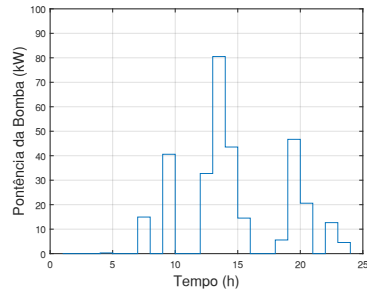
Boosters 2



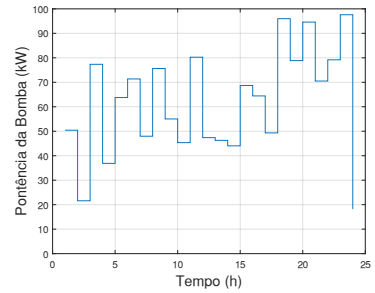
Boosters 9



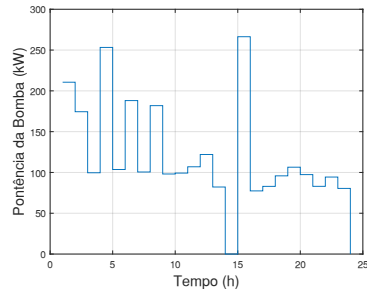
Boosters 5



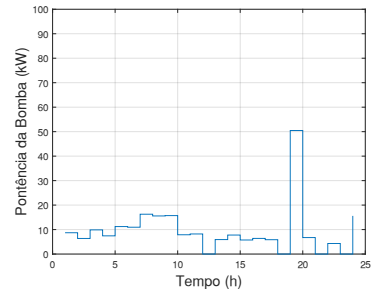
Boosters 10



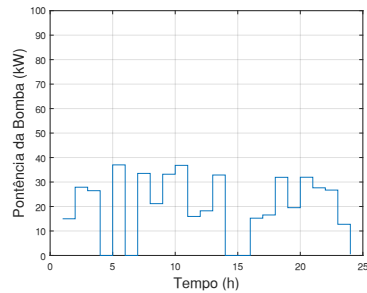
Boosters 6



Boosters 12



Boosters 7



Boosters 13

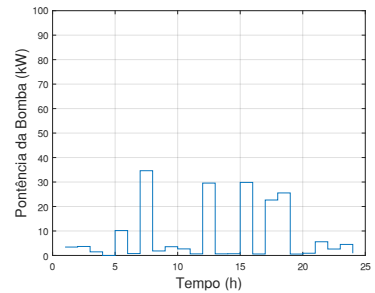


Figura 5.24 – Potência de cada *Booster* locados na rede D-town.

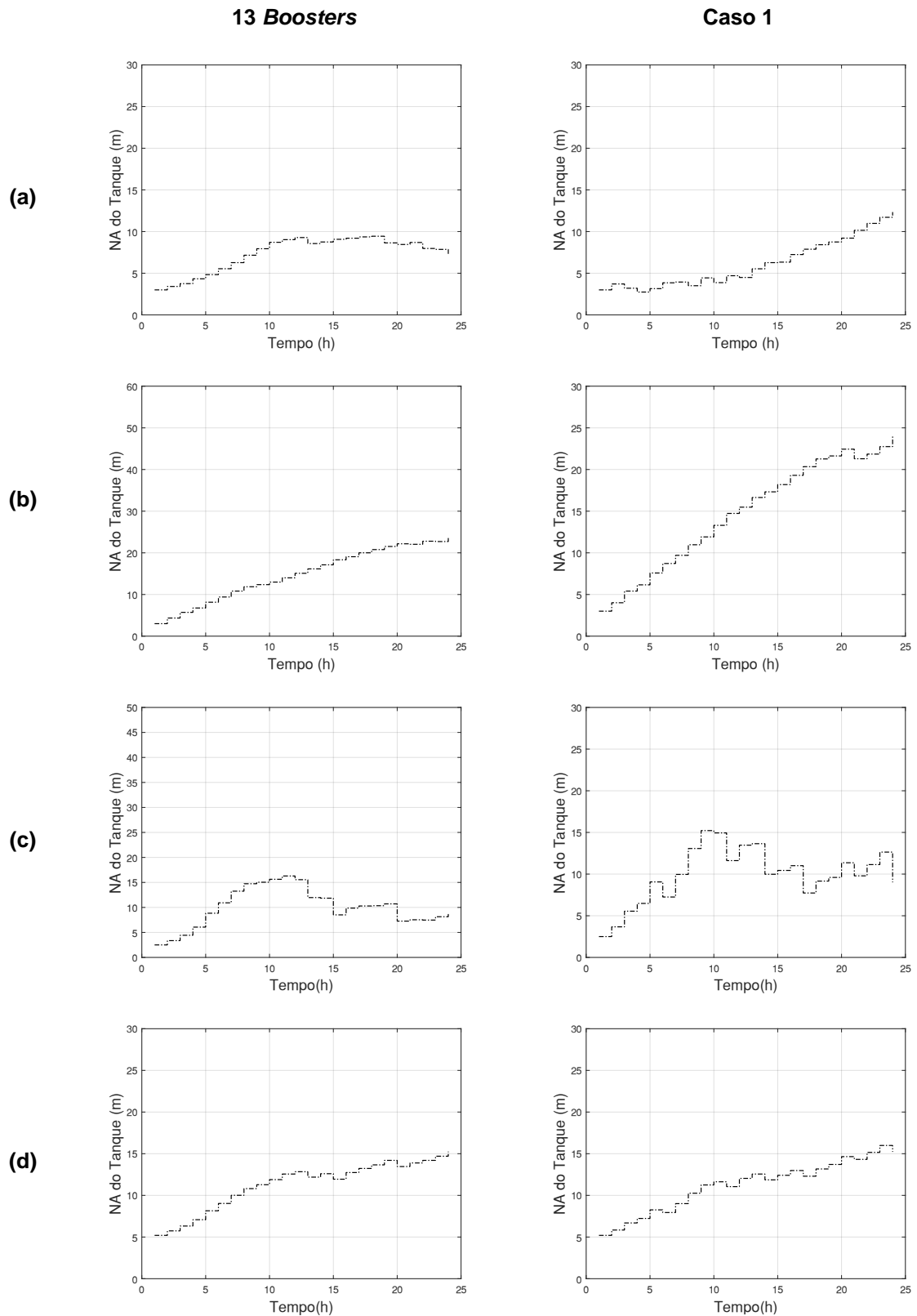


Figura 5.25 - Nível de Água nos tanques: a) Tanque 1; b) Tanque 2; c) Tanque 3; d) Tanque 4.

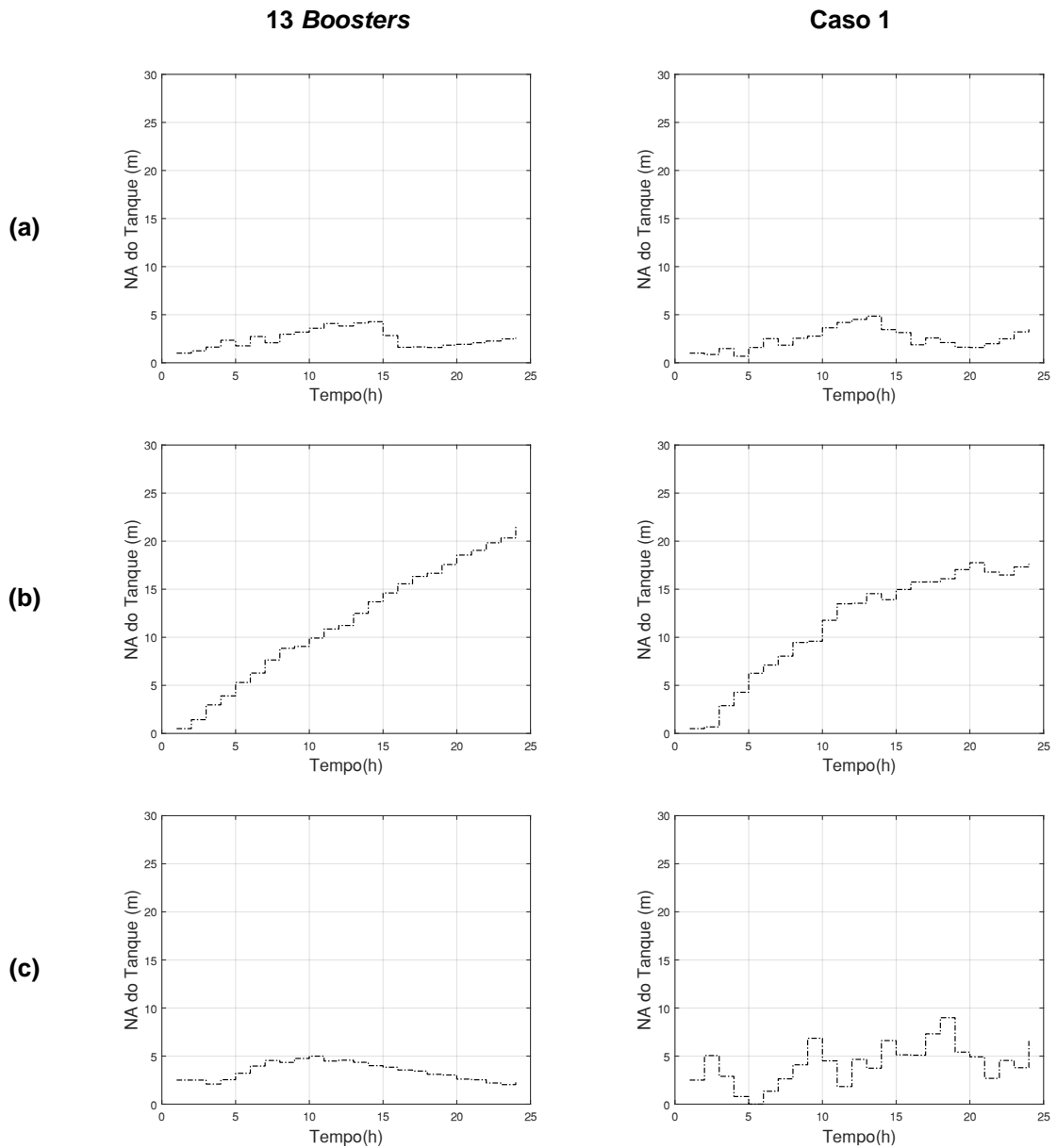


Figura 5.26 - Nível de Água nos tanques: a) Tanque 5; b) Tanque 6; c) Tanque 7.

5.4 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

De posse dos resultados para as três redes que foram analisadas ao longo da pesquisa, observou-se características diferentes para alguns parâmetros, mas também comportamentos que se repetiram entre eles. A Tabela 5.20 apresenta um resumo de todos os resultados gerados, facilitando o entendimento para futuras aplicações da rotina desenvolvida.

Redes	Resultados
<i>Anytown</i>	<ul style="list-style-type: none"> • A rede permitiu o primeiro contato com a rotina operacional desenvolvida, permitindo a aplicação do algoritmo em redes mais complexas; • O caso que apresentou operação mais flexível manteve uma operação mais eficiente; • Priorizar a operação das bombas no FP e fazer a distribuição no HP através dos tanques; • Valores de tarifas de energia mais elevados ocasionam na necessidade de operação dos tanques e bombas atrelados, enquanto, tarifas mais baixas não apresentam dependência dos tanques para o abastecimento.
NET3	<ul style="list-style-type: none"> • Pela rede NET3 foi observada a influência que as perdas de água tem no sistema, fator que foi desconsiderado para rede Anytown; • Valores empregados as tarifas de água também mostraram forte influência na geração dos resultados da rotina computacional; • A operação em paralelo das bombas não mostrou-se eficiente, podendo ser devido a convergência do algoritmo. Como melhoria ao algoritmo desenvolvido propõe a opção de seleção de bombas em paralelo idênticas. • Tanques instalados na rede devem ser dimensionados em conjunto as bombas, pois podem não ter importância efetiva para a distribuição de água. • A relação com o valor da tarifa de energia foi novamente evidenciada, mostrando a tendência em priorizar a operação das bombas no FP; • Pelos resultados gerados constatou-se que a localização otimizada dos <i>Boosters</i> pode ocasionar em operações mais estáveis em questão de pressão na rede e nível de água dos reservatórios.
<i>D-town</i>	<ul style="list-style-type: none"> • A rede D-town permitiu o entendimento da aplicação da rotina computacional em um sistema mais complexo. Desta forma, foi possível averiguar a possibilidade de aplicação em redes reais, com o mesmo nível de complexidade; • Os valores das tarifas adotados, em consonância com os resultados apresentado para rede Anytown e NET, mostram uma tendência em manter períodos menores de operação em tarifas de energia maiores; • A operação das bombas em paralelo mostrou uma necessidade de aprimoramento do algoritmo, de forma de permita a seleção de bombas em paralelo idênticas e que a operação das bombas não intercale durante o período de análise. • Os tanques novamente tiveram pouca relevância na operação, mostrando a importância de atrelar seu dimensionamento à operação das bombas • A localização otimizada dos <i>Boosters</i> permite sistemas operando com maior estabilidade e maior controle das penalizações impostas.

7 CONCLUSÕES

A motivação para realização da pesquisa apresentada são os altos custos de energia que as unidades de bombeamento tem para as concessionárias de saneamento, . Desta forma, através da rotina computacional desenvolvida para otimizar o dimensionamento e operação das bombas dos SAA, foi possível analisar a influência de algumas variáveis do sistema tem na seleção das bombas, elas são: tarifas de energia e água e a perda de água no sistema. Além disso, permitiu que fosse feita um comparativo entre as diferentes alternativas de bombeamento em termos de consumo de energia e controle de pressão, possibilitando inferir a influência que o porte da rede tem no comportamento da operação do sistema.

A pesquisa aplicou o método de otimização em três redes de distribuição de água fictícias e vários fatores foram analisados, dentre eles estão: tipo de operação das bombas, influência do valor das tarifas de água e energia, importância das perdas de água nas operações de redes de distribuição de água e importância operacional da localização otimizada dos *Boosters*. De modo geral, permitir a operação mais flexível das bombas, faz com que os sistemas operem com maior eficiência energética.

Constatou-se que a operação das bombas deve ser cuidadosamente analisada para evitar custos excessivos de energia ou que questões operacionais importantes, como a manutenção de pressões operacionais, não sejam comprometidas. O trabalho teve como objetivo avaliar os benefícios que uma seleção otimizada de bombas pode trazer. Nas três redes analisadas a utilização de bombas funcionando em paralelo não apresentou benefícios econômicos, uma vez que os processos de otimização efetuados mantiveram apenas uma bomba funcionando ou apresentaram maiores gastos energéticos nos cenários com bombas operando em paralelo. Apesar disso, do ponto de vista operacional, a utilização de apenas uma bomba pode gerar desgaste excessivo da máquina e pode deixar a rede sem abastecimento em caso de falha mecânica. No entanto, uma única bomba operando corretamente pode gerar ganhos de energia significativos.

Os estudos de caso apresentados mostraram que a forma como a bomba é operada pode trazer grandes benefícios. Para os resultados apresentados para a rede *Anytown*, o Caso 1 em relação

ao Caso 3, apresentou 60% a mais de gasto energético. Comparando o Caso 2 com o Caso 3, a redução das despesas foi de 42%. Também pode ser observado melhores resultados com relação a custos energéticos para a rede NET3, em que para o Caso 1, foram otimizados cenários com uma e duas bombas em paralelo, e obteve-se um economia de 11,51% para o caso com uma única bomba operando. O padrão de economia energética se repetiu para a rede *D-town*, em que o caso que as EEATs operam com uma única bomba obteve economia de 7,84% se comparado ao caso com as EEATs operando com duas bombas em paralelo.

Dessa forma, manter uma rotina operacional mais flexível, e selecionar com precisão a bomba de acordo com as condições da rede, pode trazer maior eficiência energética. Mas para bons resultados, destaca-se a função que os tanques apresentam no SAA. Os níveis dos tanques são importantes para definir a programação operacional das bombas, pois permitem que parem nos horários de pico, quando a tarifa de energia é mais elevada. Observa-se também por meio da análise de sensibilidade que os tanques são especialmente importantes nos horários de pico, uma vez que o comportamento do nível d'água pode variar muito dependendo da tarifa de energia da região. Isso porque tarifas altas favorecem o enchimento de tanques e tarifas baixas podem tornar a instalação de tanques menos relevante.

Outro aspecto importante analisado neste trabalho foi a influência da perda de água nos SAA. Como apresentado no estudo comparativo entre a rede NET3 operando com e sem vazamentos, obteve-se uma economia energética de 68,29% para o caso que desconsiderou o vazamento. Este resultado mostra que é de extrema importância considerar e mensurar os vazamentos nas redes de distribuição de água, pois isto afeta diretamente o ponto de operação das bombas, visto que a demanda de bombeamento é alterada. Outro aspecto analisado foi com relação a influência que o custo de produção de água apresenta nos resultados de otimização. Para valores elevados o processo de otimização priorizou manter valores baixos de perda de água (pressão baixa), negligenciando os gastos energéticos. Quando o custo de produção de água é muito baixo, economicamente é mais interessante priorizar a redução do consumo de energia. No entanto, esta alternativa pode gerar um forte impacto ambiental devido à retirada de água desnecessária de mananciais.

Por fim, fez-se a análise da localização otimizada dos *Boosters* no SAA. Pela rede NET3 foi observado que a locação de um número elevado de *Boosters* pode apresentar problemas de convergência do algoritmo. No entanto, pode trazer informações importantes sobre a localização ótima dos *Boosters* na rede. O resultado com 4 *Boosters* para a rede NET3 mostrou que alterar o posicionamento das EEAT pode trazer vantagens econômicas e operacionais, por manter maior controle da rede. Esta constatação também foi observada para o resultado dos 13 *Boosters* locados na rede *D-town*, que não apresentou penalização da pressão mínima, garantindo o abastecimento de água, e permitiu maior controle dos níveis dos tanques.

8 RECOMENDAÇÕES

Nesta pesquisa, adotou-se um modelo de seleção e operação da bomba mais flexível, que se adeque melhor às características do sistema. Entretanto, ressalta-se a importância de ser feita uma análise econômica do uso dos conversores de frequência. Em muitos casos, as economias devido operação otimizada podem compensar os valores de aquisição e manutenção destes equipamentos. Além das análises econômicas, recomenda-se a aplicação do algoritmo de otimização utilizando sistemas reais, com bombas disponíveis no mercado, possibilitando entender a otimização proposta aplicada a situações reais.

O papel dos tanques nos sistemas de abastecimento de água foi foco de questionamento durante o desenvolvimento do trabalho. São unidades que trabalham em conjunto com as bombas, de forma que em uma situação ideal, a operação das bombas e tanques permita o desligamento das EEAT no horário de ponta. Desta forma, salienta-se a importância de pesquisas com foco na operação dos tanques, e que também façam sua localização otimizada. Recomendam-se novos estudos, com a possibilidade de utilização de mais tanques, e com diferentes capacidade de armazenamento, analisando não só o funcionamento das bombas, mas também os custos médios de implantação e operação de novos tanques.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, M.; KAPELAN, Z. Fast Pump Scheduling Method for Optimum Energy Cost and Water Quality in Water Distribution Networks with Fixed and Variable Speed Pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 145, n. 12, 2019.
- ALEGRE, H.; CABRERA, E. Jr.; DUARTE, P.; MERKEL, W.; BAPTISTA, J. M.; CUBILLO, F.; HIRNER, W.; PARENA, R. *Indicadores de desempenho para servicios de abastecimento de agua*, Valencia, IWA Publishing, 2018.
- ANDRADE, M. A.; CHOI, C. Y.; LANSEY, K. Enhanced Artificial Neural Networks Estimating Water Quality Constraints for the Optimal Water Distribution Systems Design. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, n. 9, 2016.
- BARNETT, M. LEE, T.; JENTGEN, J. CONRAD, S. KIDDER, H.; WOOLSCHLAGER, J.; LOZANO, E. C.; KELLY, S.; EATON, M.; HOLLIFIELD, D.; GROFF, C. Real-time Automation of Water Supply and Distribution for the City of Jacksonville , Florida , USA. *Water Supply*, n. May 2020, p. 15–29, 2004.
- BEIELSTEIN, T.; PARSOPOULOS, K. E.; VRAHATIS, M. N. Tuning PSO parameters through sensitivity analysis. n. 3, 2002. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2003/5420>>.
- BENE, J. G.; HOS, C. J. Finding least-cost pump schedules for reservoir filling with a variable speed pump. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 138, n. 6, p. 682–686, 2012.
- BIGGS, N. L.; LLOYD, E. K.; WILSON, R. *Graph Theory 1736-1936*. Paperback, ISBN: 9780198539162, 1999.
- BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. Portaria nº 455, de 01 de dezembro 2010. Requisitos de Avaliação da Conformidade para Bombas e motobombas centrífugas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 28 de setembro 2009.
- BRENTAN, B.; MEIRELLES, G.; LUVIZOTTO, E.; IZQUIERDO, J. Joint operation of pressure-reducing valves and pumps for improving the efficiency of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 144, n. 9, p. 1–12, 2018.
- BRENTAN, B. M.; LUVIZOTTO, E. J. Refining PSO Applied to Electric Energy Cost Reduction in Water Pumping. *Water Research and Management*, v. 4, n. 2, p. 19–30, 2014. Disponível em: <https://www.wrmjournal.com/images/stories/casopis/No_14/03.pdf>.
- BOULOS, P. F., WU, Z., ORR, C. H., MOORE, M., HSIUNG, P., & THOMAS, D. (2001). Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms. *In Distribution system symposium*.
- CAMPBELL, E.; IZQUIERDO, J.; MONTALVO, I.; AYZA-ILAYA, A.; PÉREZ-GARCÍA, R.; TEVERA, M. A flexible methodology to sectorize water supply networks based on social network theory concepts and multi-objective optimization. *Journal of Hydroinformatics*, v. 18, n. 1, p. 62–76, 2016.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. Efficiency achievement in water supply systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 30, p. 59–84, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.010>>.

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

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. G. Improving water supply systems efficiency - A methodology for optimal control of variable-speed pumps. *Proceedings of the 35th IAHR World Congress held in Chengdu, China, 8-13 September 2013*, n. February, 2013. Disponível em: <https://iahr.org/Shared_Content/Store/StoreLayouts/Item_Detail.aspx?iProductCode=CONGRES2013&Category=CONGR>.

COUTINHO, R. S.; SOARES, A. K. Simulação de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 22, n. 4, p. 797–808, 2017.

CREACO, E.; CAMPISANO, A.; FONTANA, N.; MARINI, G.; PAGE, P. R.; WALSKI, T. Real time control of water distribution networks: A state-of-the-art review. *Water Research*, v. 161, p. 517–530, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.025>>.

CUTORE, P. CAMPISANO, A.; KAPELAN, Z.; MODICA, C.; SAVIC, D. Probabilistic prediction of urban water consumption using the SCEM-UA algorithm. *Urban Water Journal*, v. 5, n. 2, p. 125–132, 2008.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, v. 26, n. 1, p. 1–13, 1996.

DÖTSCH, F.; DENZINGER, J; KASINGER, H.; BAUER, B. Decentralized real-time control of water distribution networks using self-organizing multi-agent systems. *Proceedings - 2010 4th IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, SASO 2010*, p. 223–232, 2010.

EBERHART, R. C.; SHI, Y. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC*, v. 1, p. 94–100, 2001.

EBERHART, R.; KENNEDY, J. New optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science*, p. 39–43, 1995.

ELIADES, D.G., KYRIAKOU, M., VRACHIMIS, S., POLYCARPOU M. M. "EPANET-MATLAB Toolkit: An Open-Source Software for Interfacing EPANET with MATLAB", in *Proc. 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI)*, The Netherlands, Nov 2016, p.8. (doi:10.5281/zenodo.831493)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energéticos Nacional 2019: Ano base 2018. Rio de Janeiro, 2019.

FERNÁNDEZ GARCÍA, I.; MC NABOLA, A. Maximizing Hydropower Generation in Gravity Water Distribution Networks: Determining the Optimal Location and Number of

- Pumps as Turbines. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 146, n. 1, p. 1–12, 2020.
- FILHO, E. G. B.; SALVINO, L. R.; BEZERRA, S. T. M.; SALVINO, M. M.; GOMES, H. P. Intelligent system for control of water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 18 (4), p. 1270-1281, 2018.
- GIACOMELLO, C.; KAPELAN, Z.; NICOLINI, M. Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 139, n. 2, p. 175–183, 2013.
- GIUSTOLISI, O.; LAUCELLI, D.; BERARDI, L. Operational Optimization: Water Losses versus Energy Costs. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 139, n. 4, p. 410–423, 2013.
- GÜLICH, J. F. Effect of Reynolds number and surface roughness on the efficiency of centrifugal pumps. *Journal of Fluids Engineering*, Transactions of the ASME, v. 125, n. 4, p. 670–679, 2003.
- HASHEMI, S. S.; TABESH, M.; ATAEEKIA, B. Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks. *Urban Water Journal*. [S.l.]: Taylor & Francis. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2013.795233>>. , 2014
- JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G. Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 118, n. 4, p. 406–422, 1992.
- KANG, D.; LANSEY, K. Revisiting Optimal Water-Distribution System Design: Issues and a Heuristic Hierarchical Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 138, n. 3, p. 208–217, 2012.
- KARABOGA, D.; BASTURK, B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, v. 39, n. 3, p. 459–471, 2007.
- KOOR, M.; VASSILJEV, A.; KOPPEL, T. Optimal pump count prediction algorithm for identical pumps working in parallel mode. *Procedia Engineering*, v. 70, n. 1996, p. 951–958, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.106>>.
- KUREK, W.; OSTFELD, A. Multiobjective Water Distribution Systems Control of Pumping Cost, Water Quality, and Storage-Reliability Constraints. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, n. 2, p. 184–193, 2014.
- LANSEY, K. E.; AWUMAH, K. OPTIMAL PUMP OPERATIONS CONSIDERING PUMP SWITCHES. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 1, p. 17–35, 1994.
- LIMA, G. M.; MARCHIORI, I. N.; BRENTAN, B. M.; JUNIOR, E. L. Effectiveness of methods for selecting pumps as turbines to operate in water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 19, n. 2, p. 417–423, 2019.
- LIMA, G. M.; LUVIZOTTO, E.; BRENTAN, B. M. Selection and location of Pumps as Turbines substituting pressure reducing valves. *Renewable Energy*, v. 109, p. 392–405, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.056>>.

- LINDSTEDT, M.; KARVINEN, R. Optimal control of pump rotational speed in filling and emptying a reservoir: minimum energy consumption with fixed time. *Energy Efficiency*, v. 9, n. 6, p. 1461–1474, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12053-016-9434-y>>.
- LINGIREDDY, S.; WOOD, D. J. Improved Operation of Water Distribution Systems Using Variable-Speed Pumps. *Journal of Energy Engineering*, v. 124, n. 3, p. 90–103, 1998.
- MAIER, H. R.; KAPELAN, Z.; KARPRZYK, J. KOLLAT, J.; MATOTT, L. S.; CUNHA, M. C.; DANDY, G. C.; GIBBS, M. S.; KEEDWLL, E.; MARCHI, A.; OSTFELD, A.; SAVIC, D.; SOLOMATINE, D. P.; VRUGT, J. A.; ZECCHIN, A. C.; MINSKER, B. S.; BARBOUR, E. J.; KUCZERA, G.; PASHA, F.; CASTELLETTI, A.; GIULIANI, M.; REED, P. M. Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: Current status, research challenges and future directions. *Environmental Modelling and Software*, v. 62, p. 271–299, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.013>>.
- MALA-JETMAROVA, H.; SAVIC, D.; SULTANOVA, N. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system design. *Water (Switzerland)*, v. 10, n. 3, 2018.
- MANZI, D., GOULART, T. D. C., BRENTAN, B. M., MEIRELLES, G., & JUNIOR, E. L. Dimensionamento ótimo de redes de distribuição de água com uso de métodos de otimização inspirados na natureza. *Revista DAE*, v. 66, n. 212, p. 16-31, 2018.
- MARCHIORI, I. N.; LIMA, G. M.; BRENTAN, B. M.; JUNIOR, E. L.; IZQUIERDO, J. Avaliação de funções de penalização para o dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água. 2017, Valencia: [s.n.], 2017.
- MÓLLER, D. S.; LIMA, G. M.; BRENTAN, B. M.; BARRO, D. B. Optimal pump selection for variable speed operation in water distribution network. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, 2020.
- MONACHESI, M. G.; (PROCEL e Eletrobrás). Eficiência energética em sistemas de abastecimento de água. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005, 272 pag.
- MONACHESI, M. G.; MONTEIRO, M. A. G.; ROCHA, C. R. Eficiência energética em sistema de bombeamento: manual prático. Brasília, 103 pag., 2001.
- MONTANA, D. J.; DAVIS, L. Training Feedforward Neural Networks Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial intelligence - Volume 1*, v. 89, p. 762–767, 1989. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1623755.1623876>>.
- MOORE, E.F. The Shortest Path through a Maze; Part II: The Annals of the Computation Laboratory of Harvard University Volume XXX; Harvard University Press: Cambridge, MA, USA, 1959; pp. 285–292.
- MORTON, W. R. Economics of AC adjustable speed drives on pumps. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 3, n. IA-11, p. 282-286, 1975.
- NICOLINI, M.; ZOVATTO, L. Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 135, n. 3; p 178-187, 2009.

- ODAN, F. K.; REIS, L. F. R.; KAPELAN, Z. Real-time multiobjective optimization of operation of water supply systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 141 (9), 04015011, 2015.
- OLSZEWSKI, P. Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps. *Applied Energy*, v. 178, p. 527–539, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.084>>.
- ORMSBEE, L. E.; LANSEY, K. E. Optimal Control of Water Supply Pumping Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 2, p. 237–252, 1994.
- OSTFELD, A.; TUBALTZEV, A. Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 134, n. 2, p. 107–118, 2008.
- PRASAD, T. D. Design of Pumped Water Distribution Networks with Storage. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 136, n. 1, p. 129–132, 2010.
- RAO, Z.; SALOMONS, E. Development of a real-time, near-optimal control process for water-distribution networks. *Journal of Hydroinformatics*, v. 9, n. 1, p. 25–37, 2010.
- REIS, L. F. R.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. December, p. 317–326, 1997.
- RIBEIRO, L. C. L. J. Modelo híbrido multiobjetivo para obtenção de roteiros operacionais de bombas de rotação variável em instalações hidráulicas". 2007. 87 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em:< <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258178>>.
- RIBEIRO, L. C. L. J., Modelo Híbrido para o estabelecimento de rotações ótimas de bombas de rotação variável. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2002
- RODRIGUES, W. Critérios para o uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água. 2007. 234p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: < <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258179?mode=full>>.
- ROSSMAN, L. A The EPANET programmer's toolkit for analysis of water distribution systems. In WRPMD'99: Preparing for the 21st Century (pp. 1-10), 1999.
- ROSSMAN, L.A. EPANET 2.0 User's Manual. Drinking Water Research Division, Risk Reduction Engineering Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, 2000.
- SANTO, L. P. S.; COUTINHO, R. S.; SOARES, A. K. Otimização multiobjetivo da operação de sistemas de distribuição de água com bombas de rotação variável. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25 (5), Rio de Janeiro, 701-724., 2020.
- SÁRBU, I.; BORZA, I. Energetic optimization of water pumping in distribution systems. *Mechanical Engineering*, v. 42, n. 2, p. 141-152, 1998.
- SHEKOFTEH, M.; JALILI GHAZIZADEH, M.; YAZDI, J. A methodology for leak detection in water distribution networks using graph theory and artificial neural network. *Urban Water*

Journal, v. 00, n. 00, p. 1–9, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1797832>>.

SIMPSON, A. R.; MARCHI, A. Evaluating the Approximation of the Affinity Laws and Improving the Efficiency Estimate for Variable Speed Pumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 139, n. 12, p. 1314–1317, 2013.

SIMPSON, A. R., MURPHY, L. J., DANDY, G. C. "Pipe network optimization using Genetic Algorithms". In: *Specialty Conference of Water Resources Planning and Management Division, American Society of Civil Engineers*, Seattle, Washington, USA, p. 392–395. 1993.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2018, Brasília, DF, 2020.

STOFFEL, B.; LAUER, J. Theoretically attainable efficiency of centrifugal pumps. VDMA project-Final report, Technical University of Darmstadt, 1994.

STOKES C., WU W., DANDY G., ET AL., Battle of the water networks II: Combining engineering judgement with genetic algorithm optimisation. In *WDSA 2012: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, 24-27 September 2012 in Adelaide, South Australia*, 2012, p. 77

STORN, R.; PRICE, K. Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997.

TANG, Y.; ZHENG, G.; ZHANG, S. Optimal control approaches of pumping stations to achieve energy efficiency and load shifting. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 55, p. 572–580, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.10.023>>.

TARQUIN, B. A. J.; DOWDY, J. Optimal Pump Operation in Water Distribution. v. 115, n. 2, p. 158–168, 1989.

VENKATESH, G.; BRATTEBØ, H. Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: Case study of Oslo (Norway). *Energy*, v. 36, n. 2, p. 792–800, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.040>>.

WAKEEL, M.; CHEN, B.; HAYAT, T.; ALSAEDI, A.; AHMAD, B. Energy consumption for water use cycles in different countries: A review. *Applied Energy*, v. 178, n. 19, p. 868–885, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.114>>.

WALSKI, T. M., BRILL, E. D., GESSLER, J., GOULTER, I. C., JEPSON, R. M., LANSEY, K., HAN-LIN LEE, LIEBMAN, J. C., MAYS, L., MORGAN, D. R., AND ORMSBEE, L (1987). Battle of the network models: *Epilogue*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), 191-203.

WEGLEY, C.; EUSUFF, M.; LANSEY, K. E. Determining Pump Operations Using Particle Swarm Optimization. 2000, [S.l: s.n.], 2000. p. 1–6.

WRC – Water Research Centre. *Leakage Policy and Practice*. Report 26. Inglaterra, 1985.

WU, Z. Y.; SIMPSON, A. R. A self-adaptive boundary search genetic algorithm and its application to water distribution systems. *Journal of Hydraulic Research*, v. 40, n. 2, p. 191–203, 2002.

YENIAY, Ö. Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms. *Mathematical and Computational Applications*, v. 10, n. 1, p. 45–56, 2005.

ZHANG, H.; XIA, X.; ZHANG, J. Optimal sizing and operation of pumping systems to achieve energy efficiency and load shifting. *Electric Power Systems Research*, v. 86, p. 41–50, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.12.002>>.

ZHENG, F.; ZECCHIN, A. C.; NEWMAN, J. P.; MAIER, H. R.; DANDY, G. C. An adaptive convergence-trajectory controlled ant colony optimization algorithm with application to water distribution system design problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 21, n. 5, p. 773–791, 2017.