

Letícia Maria Miquelin

Otimização dos custos em sistemas de abastecimento através de um modelo de programação inteira associado ao *software* EPANET e heurística para correção de pressões irregulares e de volumes finais

Bauru - SP

Março de 2025

Leticia Maria Miquelin

**Otimização dos custos em sistemas de abastecimento
através de um modelo de programação inteira
associado ao *software* EPANET e heurística para
correção de pressões irregulares e de volumes finais**

Tese de Doutorado

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Faculdade de Engenharia de Bauru

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof^a. Dr^a. Edilaine Martins Soler

Bauru - SP

Março de 2025

M669o Miquelin, Leticia Maria
Otimização dos custos em sistemas de abastecimento através de um modelo de programação inteira associado ao software EPANET e heurística para correção de pressões irregulares e de volumes finais / Leticia Maria Miquelin. -- Bauru, 2025
112 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientadora: Edilaine Martins Soler

1. Pesquisa operacional. 2. Sistemas de abastecimento de água. 3. Bombas hidráulicas. 4. Energia elétrica. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE LETÍCIA MARIA MIQUELIN, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 11 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 14h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de LETÍCIA MARIA MIQUELIN, intitulada **OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO ATRAVÉS DA PROGRAMAÇÃO LINEAR ASSOCIADA AO SOFTWARE EPANET E HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE PRESSÕES IRREGULARES E DE VOLUMES FINAIS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. EDILAINE MARTINS SOLER (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru UNESP, Prof^ª. Dr^ª. MARISTELA OLIVEIRA DOS SANTOS (Participação Virtual) do(a) Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação / Universidade de São Paulo / USP, Prof. Dr. MARCOS MANSANO FURLAN (Participação Virtual) do(a) Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas / Universidade Federal da Grande Dourados, Profa. Dra. MARIA MERCEDES GAMBOA MEDINA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Hidráulica e Saneamento / Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Profa. Dra. LARISSA TEBALDI DE OLIVEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / Câmpus de Bauru. Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA _ _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. EDILAINE MARTINS SOLER

gov.br Documento assinado digitalmente
EDILAINE MARTINS SOLER
Data: 12/02/2025 09:48:57-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>



PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO: LETÍCIA MARIA MIQUELIN DE: "OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO ATRAVÉS DA PROGRAMAÇÃO LINEAR ASSOCIADA AO SOFTWARE EPANET E HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE PRESSÕES IRREGULARES E DE VOLUMES FINAIS"

PARA:

OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO ATRAVÉS DE UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO INTEIRA ASSOCIADO AO SOFTWARE EPANET E HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE PRESSÕES IRREGULARES E DE VOLUMES FINAIS

Bauru, 11 de fevereiro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br EDILAINÉ MARTINS SOLER
Data: 12/02/2025 09:48:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Edilaine M. Soler

Prof. Dr. <Edilaine Martins Soler >
Orientadora

IMPACTO POTENCIAL DESSA PESQUISA

Esta pesquisa possui como foco principal a utilização da programação linear para planejar a operação das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água de modo a reduzir os custos com energia elétrica, já que tal operação é responsável por grande parte dos custos com energia elétrica dessas empresas. Assim, são propostos um modelo matemático para minimização dos custos com energia elétrica, uma heurística para a correção de pressões negativas e uma heurística para a correção dos volumes finais; obtendo-se uma abordagem cujas soluções são validadas através do simulador hidráulico EPANET e passível de uso em sistemas de abastecimento reais.

Além da redução do uso de energia elétrica, a programação das bombas acarreta outros impactos positivos, como a redução dos vazamentos, pois o sistema opera sob condições ideais de pressão, reduzindo o desperdício de água potável e contribuindo para a preservação dos mananciais. Tem-se também que, ao se fazer um melhor uso das bombas, estas tendem a apresentar um menor desgaste, necessitando de menos investimentos em manutenções e substituições dos equipamentos, reduzindo o descarte de materiais. Além disso, ao reduzir seus custos com energia, espera-se que as empresas de abastecimento repassem tais reduções nas tarifas cobradas dos consumidores e melhorem seus serviços prestados.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research focuses primarily on the use of linear programming to plan the operation of hydraulic pumps in water supply systems in order to reduce electricity costs, as this operation accounts for a significant portion of the electricity expenses for these companies. A mathematical model for minimizing electricity costs, a heuristic for correcting negative pressures, and a heuristic for correcting final volumes are proposed, resulting in an approach whose solutions are validated through the EPANET hydraulic simulator and can be applied to real supply systems.

In addition to reducing electricity usage, programming the pumps has other positive impacts, such as reducing leaks, since the system operates under optimal pressure conditions, minimizing the waste of drinking water and contributing to the preservation of water sources. It is also important to note that by making better use of the pumps, they tend to experience less wear, requiring less investment in maintenance and equipment replacement, thus reducing material waste. Furthermore, by lowering their energy costs, it is expected that supply companies will pass on these savings in the rates charged to consumers and improve the services they provide.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Eliamar e José, por todo apoio e pelo amor incondicional. Obrigada por sempre priorizarem o estudo e estarem ao meu lado em todas as decisões que me trouxeram a este momento. Esta conquista também é de vocês.

Ao meu namorado Esaú, por todos os anos de companheirismo e paciência, principalmente nos momentos difíceis. Obrigada por sempre acreditar em mim.

À minha orientadora, professora Edilaine, por todos esses anos compartilhando seu conhecimento. Obrigada pela oportunidade que me proporcionou anos atrás e por me guiar até aqui.

Aos amigos que conheci na Unesp, em especial ao João Vitor. Agradeço por ter encontrado você para caminharmos juntos da graduação ao doutorado.

Ao meu amigo e treinador Bruno, por ajudar a me tornar uma pessoa forte física e, conseqüentemente, mentalmente, para alcançar este objetivo de forma saudável.

Aos demais amigos, que me incentivaram e me escutaram tanto falar sobre a pós-graduação. Obrigada pelo apoio e paciência.

À todos os professores, da graduação à pós, que fizeram parte da construção do meu conhecimento e que ajudaram a me tornar a profissional que sou hoje.

À Faculdade de Engenharia de Bauru, com seus professores, técnicos e demais funcionários, que me permitiram concluir essa importante etapa.

À Unesp de Bauru, por proporcionar um ensino público de qualidade.

RESUMO

Para as empresas de abastecimento de água do Brasil e de muitos países, o valor da energia elétrica é cobrado de acordo com a hora do dia, chamado de horário de ponta aquele que compreende os períodos onde a energia é mais cara. A maior parcela dos custos com energia dessas empresas origina-se da operação das bombas, que pode ser otimizada através de modelos matemáticos, acarretando na redução dos custos e do desgaste das bombas. Assim, este trabalho propõe um modelo matemático de programação inteira para minimizar os custos com energia elétrica advindos da operação das bombas hidráulicas nos sistemas de abastecimento de água. Tal modelo tem como característica o uso de grafo, viabilizando sua aplicação em redes malhadas, sendo de fácil resolução por *solvers* comerciais, onde sua solução é obtida de forma rápida e eficiente. O *software* EPANET é utilizado para simular e validar as soluções obtidas através do modelo matemático proposto. Também são propostas duas heurísticas que utilizam o EPANET em seu escopo: uma para corrigir pressões negativas que podem ser acusadas durante a simulação hidráulica; e uma para a correção dos volumes finais dos reservatórios, de modo a facilitar a operação de um novo horizonte de planejamento. Testes numéricos foram realizados através da implementação do modelo em Python e resolvido pelo pacote de otimização Gurobi, além do uso do EPANET. Foram testadas quatro redes da literatura: Mini rede de VanZyl, Rede de Florianópolis, e Redes Richmond e Richmond Esqueleto. A abordagem proposta indica sua viabilidade em todos os testes, onde foram obtidas soluções de boa qualidade e em baixo tempo computacional. Além disso, este trabalho contribui com a disponibilidade dos arquivos de dados utilizados, em que os testes demonstraram que pequenas alterações nos parâmetros iniciais da rede geram soluções distintas.

Palavras-chave: Otimização, Programação das Bombas, Energia Elétrica.

ABSTRACT

For water supply companies in Brazil and many other countries, electricity pricing varies based on the time of day, with peak hours being the most expensive. A significant portion of these companies' energy costs comes from pump operation, which can be optimized using mathematical models to reduce both costs and pump wear. This paper proposes an integer programming mathematical model to minimize electricity costs associated with the operation of hydraulic pumps in water supply systems. The model utilizes a graph-based approach, allowing its application in meshed networks, and can be efficiently solved by commercial solvers, yielding solutions quickly and effectively. The EPANET software is employed to simulate and validate the solutions obtained through the proposed mathematical model. Additionally, two heuristics incorporating EPANET are introduced: one to correct negative pressures that may arise during hydraulic simulations and another to adjust the final reservoir volumes, facilitating the transition to a new planning horizon. Numerical tests were conducted by implementing the model in Python and solving it using the Gurobi optimization package, in conjunction with EPANET. Four benchmark networks from the literature were tested: the Van Zyl Mini Network, the Florianópolis Network, and the Richmond and Richmond Skeleton Networks. The results demonstrate the viability of the proposed approach in all tests, yielding high-quality solutions with low computational time. Furthermore, this work contributes to the availability of the data files used, with tests showing that small variations in the network's initial parameters lead to different solutions.

Keywords: Optimization, Pump scheduling, Electricity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação de uma rede ramificada (Fonte: Gomes (2004)).	18
Figura 2.2 – Representação de uma rede malhada (Fonte: Gomes (2004)).	19
Figura 2.3 – Representação de uma rede mista (Fonte: Gomes (2004)).	19
Figura 2.4 – Número de documentos que citam o <i>software</i> EPANET ao longo dos anos até 05/07/2024.	24
Figura 3.1 – Representação de um grafo (Fonte: Freitas (2014)).	37
Figura 3.2 – Representação de um grafo direcionado (Fonte: Freitas (2014)).	37
Figura 3.3 – Representação de uma rede com fluxo (Fonte: baseado em Arenales et al. (2006)).	37
Figura 4.1 – Mini rede de VanZyl (Fonte: baseado em Zyl, Savic e Walters (2004)).	56
Figura 4.2 – Padrão de consumo - Mini rede de VanZyl.	57
Figura 4.3 – Programação das bombas - Mini rede de VanZyl.	58
Figura 4.4 – Altura da água nos reservatórios - Mini rede de VanZyl.	59
Figura 4.5 – Balanço de vazão - Mini rede de VanZyl.	59
Figura 4.6 – Vazão das bombas - Mini rede de VanZyl.	59
Figura 4.7 – Programação das bombas (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.	60
Figura 4.8 – Altura da água nos reservatórios (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.	60
Figura 4.9 – Balanço de vazão (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.	61
Figura 4.10–Vazão das bombas (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.	61
Figura 4.11–Programação das bombas de Zyl, Savic e Walters (2004) - Mini rede de VanZyl.	64
Figura 4.12–Programação das bombas e altura da água nos reservatórios de Marini et al. (2023) - Mini rede de VanZyl.	64
Figura 4.13–Programação das bombas (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.	64
Figura 4.14–Vazão das bombas (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.	64
Figura 4.15–Altura da água nos reservatórios de Zyl, Savic e Walters (2004) - Mini rede de VanZyl.	66
Figura 4.16–Altura da água nos reservatórios e programação das bombas de Marini et al. (2023) - Mini rede de VanZyl.	66
Figura 4.17–Altura da água nos reservatórios para MM+HCVF - Mini rede de VanZyl.	66
Figura 4.18–Rede de Florianópolis (Fonte: Vieira et al. (2020)).	68
Figura 4.19–Padrão de consumo - Rede de Florianópolis.	70
Figura 4.20–Programação das bombas - Rede de Florianópolis.	71
Figura 4.21–Altura da água nos reservatórios - Rede de Florianópolis.	71
Figura 4.22–Localização do reservatório 74 - Rede de Florianópolis.	72
Figura 4.23–Balanço de vazão - Rede de Florianópolis.	73

Figura 4.24–Vazão das bombas - Rede de Florianópolis.	73
Figura 4.25–Programação das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede de Florianópolis. . .	74
Figura 4.26–Altura da água nos reservatórios (MM+HCPN+HCVF) - Rede de Florianópolis.	75
Figura 4.27–Balanço de vazão (MM+HCPN+HCVF) - Rede de Florianópolis.	75
Figura 4.28–Vazão das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede de Florianópolis.	75
Figura 4.29–Rede Richmond (Fonte: Zyl, Savic e Walters (2004)).	77
Figura 4.30–Rede Richmond Esqueleto (Fonte: baseado em Abdelsalam e Gabbar (2021)).	77
Figura 4.31–Padrão de consumo - Rede Richmond Esqueleto.	79
Figura 4.32–Programação das bombas - Rede Richmond Esqueleto.	80
Figura 4.33–Altura da água nos reservatórios - Rede Richmond Esqueleto.	80
Figura 4.34–Balanço de vazão - Rede Richmond Esqueleto.	81
Figura 4.35–Vazão das bombas - Rede Richmond Esqueleto.	82
Figura 4.36–Programação das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto.	83
Figura 4.37–Altura da água nos reservatórios (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto.	83
Figura 4.38–Balanço de vazão (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto. . . .	84
Figura 4.39–Vazão das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto. . . .	84
Figura 4.40–Programação das bombas - Rede Richmond Esqueleto 2.	87
Figura 4.41–Altura da água nos reservatórios - Rede Richmond Esqueleto 2.	87
Figura 4.42–Balanço de vazão - Rede Richmond Esqueleto 2.	88
Figura 4.43–Vazão das bombas - Rede Richmond Esqueleto 2.	88
Figura 4.44–Programação das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto 2.	89
Figura 4.45–Altura da água nos reservatórios (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto 2.	90
Figura 4.46–Balanço de vazão (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto 2. . . .	90
Figura 4.47–Vazão das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto 2. . . .	91
Figura 4.48–Padrões de consumo - Rede Richmond.	93
Figura 4.49–Programação das bombas - Rede Richmond.	94
Figura 4.50–Altura da água nos reservatórios - Rede Richmond.	95
Figura 4.51–Balanço de vazão - Rede Richmond.	95
Figura 4.52–Vazão das bombas - Rede Richmond.	96
Figura 4.53–Programação das bombas - Rede Richmond 2.	98
Figura 4.54–Altura da água nos reservatórios - Rede Richmond 2.	99
Figura 4.55–Balanço de vazão - Rede Richmond 2.	99
Figura 4.56–Vazão das bombas - Rede Richmond 2.	100
Figura 4.57–Programação das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond 2.	101
Figura 4.58–Altura da água nos reservatórios (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond 2.	101
Figura 4.59–Balanço de vazão (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond 2.	102
Figura 4.60–Vazão das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond 2.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação de trabalhos da literatura	34
Tabela 4.1 – Tarifas de energia a cada hora para cada bomba - Mini rede de VanZyl.	57
Tabela 4.2 – Vazão máxima de cada bomba por período - Mini rede de VanZyl.	57
Tabela 4.3 – Volumes inicial, mínimo e máximo dos reservatórios - Mini rede de VanZyl.	57
Tabela 4.4 – Comparação entre os custos diários de energia para a Mini rede de VanZyl.	62
Tabela 4.5 – Tarifas de energia a cada hora para cada bomba - Rede de Florianópolis.	69
Tabela 4.6 – Vazão máxima de cada bomba - Rede de Florianópolis.	69
Tabela 4.7 – Volumes inicial, mínimo e máximo dos reservatórios - Rede de Florianópolis.	69
Tabela 4.8 – Tarifas de energia a cada hora para cada bomba - Rede Richmond Esqueleto.	78
Tabela 4.9 – Vazão máxima de cada bomba - Rede Richmond Esqueleto.	78
Tabela 4.10–Volumes inicial, mínimo e máximo dos reservatórios - Rede Richmond Esqueleto.	78
Tabela 4.11–Volumes inicial dos reservatórios - Rede Richmond Esqueleto 2.	86
Tabela 4.12–Tarifas de energia a cada hora para cada bomba - Rede Richmond.	92
Tabela 4.13–Vazão máxima de cada bomba - Rede Richmond.	92
Tabela 4.14–Volumes inicial, mínimo e máximo dos reservatórios - Rede Richmond.	92
Tabela 4.15–Volumes inicial dos reservatórios - Rede Richmond 2.	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEFA	<i>Artificial Electric Field Algorithm</i>
AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CMH	Metros cúbicos/hora
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA
GEE	Gases do efeito estufa
HCPN	Heurística de Correção de Pressões Negativas
HCVF	Heurística de Correção de Volumes Finais
LPS	Litros/segundo
MM	Modelo matemático proposto
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II</i>
OM	Otimização Multiobjetivo
PEE	Programa de Eficiência Energética
PGCP	Programa de Gestão e Controle de Perdas de Água
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PNCDA	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
PNL	Programação Não Linear
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
ProEESA	Projeto de Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
WNTR	<i>Water Network Tool for Resilience</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	CONTEXTUALIZAÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Os sistemas de abastecimento de água	18
2.1.1	Os sistemas de abastecimento de água e a energia elétrica	19
2.1.1.1	Tarifas de energia	20
2.1.1.2	Perdas de água e o custo energético	22
2.2	Revisão da literatura	23
2.3	Síntese da literatura	33
3	MODELO MATEMÁTICO E ABORDAGEM DE SOLUÇÃO PROPOSTOS	36
3.1	Definições iniciais	36
3.2	Modelagem matemática	38
3.2.1	Modelo matemático completo	41
3.3	Abordagem de solução	43
3.3.1	Heurística de Correção de Pressões Negativas (HCPN)	45
3.3.2	Heurística de Correção de Volumes Finais (HCVF)	48
4	TESTES NUMÉRICOS	53
4.1	Mini rede de VanZyl	56
4.1.1	Análise dos resultados - Mini rede de VanZyl	62
4.2	Rede de Florianópolis	67
4.2.1	Análise dos resultados - Rede de Florianópolis	76
4.3	Redes Richmond Esqueleto e Richmond	76
4.3.1	Rede Richmond Esqueleto	77
4.3.1.1	Análise dos resultados - Rede Richmond Esqueleto	85
4.3.1.1.1	Rede Richmond Esqueleto 2	85
4.3.2	Rede Richmond	92
4.3.2.1	Análise dos resultados - Rede Richmond	97
4.3.2.1.1	Rede Richmond 2	97
5	CONCLUSÕES	104
5.1	Trabalhos Publicados	105
	REFERÊNCIAS	107

1 INTRODUÇÃO

Para fornecer um serviço de qualidade, os sistemas de abastecimento de água enfrentam grandes desafios, como pressões inadequadas, baixa confiabilidade da rede, alto percentual de vazamentos e consumo excessivo de energia (DINI; HEMMATI; HASHEMI, 2022), onde este último vem se firmando como uma questão significativa. Segundo Dai et al. (2018), cerca de 3% a 4% do consumo global de energia é atribuído aos sistemas abastecimento de água. Para estas empresas, a operação das bombas hidráulicas pode representar de 90% a 95% dos custos com energia elétrica (ABDELSALAM; GABBAR, 2021).

A operação ótima das bombas acarreta em benefícios econômicos e ambientais (SALOMONS; HOUSH, 2020), além de ser um investimento de baixo custo (CHEN et al., 2021), já que não necessita de alterações estruturais na rede. Além disso, de acordo com Egito, Azevedo e Bezerra (2023), trabalhos que utilizam a abordagem de otimização através do planejamento operacional das bombas, geralmente, apresentam melhores resultados quando comparados a outras abordagens para minimização dos custos.

Segundo James, Campbell e Godlove (2002), o consumo de energia na maioria dos sistemas de abastecimento de água poderia ser reduzido em, pelo menos, 25%, através de ações de eficiência econômica. Além disso, um plano eficiente nas operações desses sistemas pode, não apenas evitar o uso desnecessário de recursos, como energia elétrica e água; mas também minimizar o impacto ecológico da poluição, como reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) (GHADDAR et al., 2015) e levar a uma melhor resposta nos períodos de escassez hídrica (LUNA et al., 2019); além de estar relacionado a qualidade da água disponível, já que diminuir o tempo que a água permanece nos tanques ocasiona um aumento na concentração do cloro (DARWEESH, 2020).

Para alcançar a otimização energética nos sistemas de abastecimento deve-se levar em consideração a adequação do funcionamento das bombas hidráulicas de acordo com a variação do valor da energia durante as horas do dia, a utilização de equipamentos mais eficientes, a priorização de fontes próximas de água e o seu armazenamento adequado (JONES; SOWBY, 2014). Segundo o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), uma situação comum nos sistemas de abastecimento de água brasileiros é o bombeamento contínuo sem considerar as variações de demanda, ocasionando aumentos nos custos com energia elétrica e perdas de água (BRASIL, 2011). Além disso, tal operação é frequentemente realizada por profissionais de campo com ampla experiência, que usam heurísticas na forma de regras operacionais, como operar o liga/desliga das bombas de acordo com o nível de água do reservatório (ZHAO; BEACH; REZGUI, 2018).

Encontrar o cronograma ideal para as bombas é uma tarefa difícil para pesquisadores,

gerentes, projetistas e engenheiros operacionais (DADAR et al., 2021). Se a pressão for baixa, a água não alcança os pontos mais altos de demanda; e se a pressão for alta, ocorrem vazamentos, além da utilização de mais energia do que o necessário, ocasionando aumento nos custos (VIEIRA et al., 2020). Além disso, os modelos matemáticos para a otimização da operação das bombas são, geralmente, complexos e envolvem variáveis e restrições que tornam o problema não linear e de difícil resolução; como utilizar a eficiência das bombas em função de variáveis como a pressão e a vazão (VIEIRA et al., 2020; AYYAGARI et al., 2021; ABDELSALAM; GABBAR, 2021); ou a interação não linear entre os níveis dos reservatórios e a operação das bombas (EGITO; AZEVEDO; BEZERRA, 2023).

Assim, este trabalho propõem uma nova abordagem para a resolução do problema de otimização dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água em que propõem um modelo matemático de programação linear para minimizar os custos advindos da operação das bombas hidráulicas, e uma abordagem de solução que integra o modelo matemático com um *software* de simulação hidráulica e duas heurísticas propostas. Ao final, a abordagem proposta resulta em soluções viáveis para o liga/desliga das bombas, que atendem as restrições hidráulicas, e retornam os custos otimizados da operação para a rede de abastecimento de água.

Tal trabalho contribui com a expansão de trabalhos anteriores, no qual o modelo proposto tem como característica o uso de grafo para definir os nós e os arcos do sistema, sendo adequado para redes malhadas, aproximando-o da realidade dos sistemas de abastecimento de água. Trata-se de um modelo de programação linear inteira mista de fácil resolução por *solvers* comerciais, encontrando uma solução de forma rápida e eficiente. Além disso, a metodologia proposta não indica alterações estruturais na rede, viabilizando sua aplicação em sistemas de abastecimento reais sem investimentos financeiros associados a infraestrutura.

De acordo com Luna et al. (2019), o principal objetivo da simulação hidráulica é reproduzir a melhor aproximação possível do comportamento real do sistema. Para tal foi utilizado o *software* EPANET (ROSSMAN et al., 2009), que possui domínio público e vem sendo utilizado pela comunidade científica nos últimos anos juntamente com modelos de otimização na obtenção da programação das bombas em sistemas de abastecimento de água (LUNA et al., 2019; VIEIRA et al., 2020; ABDELSALAM; GABBAR, 2021; DINI; HEMMATI; HASHEMI, 2022). Assim, este trabalho faz uso do EPANET para simular as soluções obtidas através do modelo matemático proposto, sanando a lacuna do não uso das restrições hidráulicas.

A simulação no EPANET pode acusar a ocorrência de pressões negativas em nós com demanda positiva. Para isto, foi desenvolvida a Heurística de Correção de Pressões Negativas (HCPN), baseada em Vieira et al. (2020) e na teoria da mecânica dos fluidos, através de White (2018), com o objetivo de obter soluções com pressões regulares. Também é proposta neste trabalho a Heurística de Correção de Volumes Finais (HCVF), que tem como objetivo fazer com que os volumes finais dos reservatórios fiquem próximos aos seus volumes iniciais, de modo a facilitar a operação de um próximo horizonte de planejamento.

Testes numéricos foram realizados com quatro redes da literatura: a Mini Rede de VanZyl (ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004), a Rede de Florianópolis (VIEIRA et al., 2020), e as Redes Richmond Esqueleto e Richmond (ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004). As soluções encontradas através da abordagem proposta neste trabalho indicam sua eficiência para as redes em questão, encontrando soluções competitivas com as disponíveis na literatura e em baixo tempo computacional.

Em resumo, as contribuições deste trabalho são:

- Um novo modelo matemático de programação inteira mista para minimizar os custos com energia advindos da operação das bombas em sistemas de abastecimento de água aplicável em redes malhadas e, conseqüentemente, em sistemas de abastecimento reais, e de fácil resolução computacional;
- Uma abordagem de solução que integra o modelo matemático com o *software* de simulação hidráulica EPANET, obtendo soluções viáveis em sistemas de abastecimento reais;
- Uma heurística de correção de pressões negativas (HCPN), que resulta em soluções com pressões regulares validadas pelo EPANET;
- Uma heurística de correção de volumes finais dos reservatórios (HCVF), obtendo soluções que facilitam o planejamento de um novo horizonte;
- Um banco de dados de arquivos de redes de abastecimento do EPANET, com extensão .inp, disponibilizados de forma online.

Portanto, buscando atingir os objetivos descritos, este trabalho é apresentado em cinco capítulos. O primeiro capítulo é o introdutório. No Capítulo 2 é apresentada uma contextualização do problema da operação ótima das bombas em sistemas de abastecimento de água, assim como uma explicação sobre as tarifas energéticas cobradas de tais empresas no Brasil e em alguns outros países; e uma revisão da literatura de trabalhos recentes que abordam o problema. No Capítulo 3 são descritos o modelo matemático para a otimização energética em sistemas de abastecimento de água e a abordagem de solução propostos neste trabalho, incluindo as heurísticas propostas. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos. E, por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e as publicações oriundas desse trabalho.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma visão geral dos sistemas de abastecimento de água, abordando seus componentes, funcionamento e as estruturas tarifárias relacionadas ao consumo de energia. Além disso, é realizada uma revisão da literatura com enfoque em estudos publicados a partir de 2019, acompanhada de uma análise crítica.

2.1 Os sistemas de abastecimento de água

Um sistema de abastecimento de água é composto, comumente, pela fonte de água (rio, manancial, poço, represa), que fica localizada em um nível abaixo da estação de tratamento de água (ETA), e dos reservatórios encarregados da distribuição da água. A captação de água da fonte a ETA, sua distribuição para os reservatórios e destes aos consumidores, é realizada através da utilização de bombas hidráulicas e, em alguns pontos, pela ação da pressão na rede, sem o auxílio de bombas, quando possível.

Esses sistemas possuem seu *design* definido de acordo com o posicionamento de suas componentes. De acordo com [Tsutiya \(2006\)](#), uma rede é dita ramificada quando a água parte de um ponto inicial ligado a um reservatório e, em seguida, flui por tubulações secundárias, atendendo diretamente os consumidores (Figura 2.1). Estas redes são utilizadas, geralmente, em pequenos sistemas de abastecimento.



Figura 2.1 – Representação de uma rede ramificada (Fonte: [Gomes \(2004\)](#)).

Já em uma rede do tipo malhada (ou em anéis), as tubulações formam anéis ou blocos, permitindo que a água flua por diversos caminhos, possibilitando uma maior flexibilidade no atendimento dos consumidores, diminuindo o número de interrupções do sistema, mesmo em casos de manutenções em trechos específicos ([PARRAS, 2020](#)) (Figura 2.2). Tais redes tem como uma de suas vantagens a redução de interrupções no fornecimento de água devido a manutenções ou problemas estruturais, pois o escoamento se mantém por outros caminhos; e, por isso, são as mais comuns.



Figura 2.2 – Representação de uma rede malhada (Fonte: Gomes (2004)).

Por fim, têm-se, também, a rede mista, que combina os *designs* das redes ramificada e malhada (Figura 2.3).

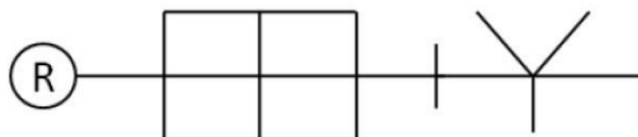


Figura 2.3 – Representação de uma rede mista (Fonte: Gomes (2004)).

2.1.1 Os sistemas de abastecimento de água e a energia elétrica

O poder público vem cada vez mais se preocupando com o uso racional de energia elétrica. A criação do Programa de Eficiência Energética (PEE), pela Lei nº9.991/2000 no ano de 2000, estabeleceu a obrigatoriedade das concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica a aplicarem o montante anual mínimo de 0,5% de sua receita operacional líquida em ações de combate ao desperdício de energia elétrica (GONÇALVES; FERREIRA, 2019). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ficou responsável por regulamentar a aplicação de tal lei, que tem como objetivo maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada, e estimular o desenvolvimento de novas tecnologias, hábitos e práticas racionais de energia elétrica. Segundo Brasil (2011), vem sendo observado ao longo dos ciclos do PEE um crescimento de ações de otimização energética em indústrias, estabelecimentos comerciais e prestadoras de serviços.

O PNEf, publicado em 2011 em complemento à criação de programas e leis, teve um papel importante para apoiar o planejamento e execução de medidas de conservação de energia no país (SCHMIDT, 2020). Este traz diretrizes para se atingir metas de economia de energia, estabelecendo um conjunto de ações para diversas áreas, onde, dentre elas, se encontra o saneamento (BRASIL, 2011), setor no qual a conta de energia elétrica pode atingir cerca de 30% do total de seus custos (CHAE; KANG, 2013). Para estas empresas, de acordo com Lam, Kenway e Lant (2017), uma das principais oportunidades de melhoria da eficiência energética se encontra na otimização da operação das bombas hidráulicas.

O Projeto de Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água (ProEESA), tem como um de seus objetivos melhorar o uso e a qualidade de instrumentos para o desenvolvimento da eficiência energética nos sistemas de abastecimento de água (GONÇALVES; FERREIRA, 2019; FERREIRA et al., 2021). Dentre suas ações, o ProEESA promove capa-

citações, seminários e redes de aprendizagem com o objetivo de desenvolver e qualificar as discussões sobre o tema, onde o público alvo são prestadores e reguladores de serviços de saneamento, entidades governamentais vinculadas ao tema e profissionais que atuam em eficiência energética e combate às perdas de água.

A fonte de energia utilizada pelas empresas de abastecimentos de água também tem sua parcela de responsabilidade, sendo a dependência de combustíveis fósseis fator de impacto em alguns países; onde a melhor forma de tornar estes sistemas energeticamente sustentáveis é através da introdução de fontes de energia renováveis (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014), como no Brasil, em que 84,25% da energia produzida vem de fontes renováveis (ENERGIA, 2024). Desse modo, quando o sistema de abastecimento se torna mais eficiente em termos energéticos ao decorrer do tempo, uma maior economia de energia será alcançada a longo prazo (LAM; KENWAY; LANT, 2017).

2.1.1.1 Tarifas de energia

As tarifas de energia elétrica no Brasil são definidas pela ANEEL, que classifica uma unidade consumidora através de sua atividade exercida e, para o faturamento, os consumidores são classificados em dois grupos: Grupo A (média e alta tensão) e Grupo B (baixa tensão). As empresas de saneamento básico são classificadas como consumidores do Grupo A, que recebe energia em tensão superior a 2300 volts (ANEEL, 2010).

Segundo ANEEL (2010) os consumidores do grupo A tem sua estrutura tarifária definida de acordo com segmentos horo-sazonais e modalidades tarifárias. Os segmentos horários são divididos em horário de ponta e fora de ponta, em que o horário de ponta é o período do dia composto por 3 horas consecutivas, definida pela concessionária entre às 17h e às 22h, onde a tarifa pode ser até 5 vezes mais cara do que a do horário fora de ponta, composto pelas demais horas do dia. No estado de São Paulo, Brasil, em geral, o horário de ponta está compreendido entre às 18h e às 21h. Os segmentos sazonais dizem respeito aos períodos seco e úmido do ano. O período seco compreende 7 meses consecutivos onde as tarifas de energia elétrica são mais caras, de maio a novembro; e o período úmido compreende 5 meses consecutivos, de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.

Para as modalidades tarifárias aplicadas ao grupo A têm-se as tarifas convencional, verde e azul. A tarifa convencional é utilizada para consumidores com demanda de até $500kW$, em que se contrata um único valor de demanda (kW) com uma tarifa de demanda ($R\$/kW$) que vale para todos os segmentos horo-sazonais; e uma outra tarifa ($R\$/kWh$) para o consumo (kWh), também válida para todo os segmentos horo-sazonais. A conta de energia elétrica para essa modalidade tarifária é dada pela equação (2.1). Segundo Coura (2007), tal modalidade é interessante para consumidores até $300kW$ que não podem desligar os equipamentos no horário

de ponta.

$$CE = D \cdot TD + C \cdot TC + IE \quad (2.1)$$

Onde:

CE : conta de energia;

D : demanda (em kW);

TD : tarifa de demanda (em $R\$/kW$);

C : consumo (em kWh);

TC : tarifa de consumo (em $R\$/kW$);

IE : impostos e encargos.

A tarifa verde trata-se de um único valor de demanda (kW) com uma tarifa única ($R\$/kW$) para todos os segmentos horo-sazonais, porém, para o consumo (kWh), são aplicadas tarifas diferenciadas ($R\$/kWh$) para o horário de ponta e fora de ponta, assim como para os períodos seco e úmido. A conta de energia elétrica para essa modalidade tarifária é dada pela equação (2.2). Além disso, tal conta pode ter o acréscimo de multa por demanda de ultrapassagem, de modo que, ao verificar o valor da demanda contratada e a demanda máxima registrada, cobra-se a maior. Se a demanda máxima registrada for superior a 10% da demanda contratada, é cobrada a tarifa normal pela demanda contratada mais a tarifa de ultrapassagem para a demanda excedente (COURA, 2007).

$$CE = D \cdot TD + C_{fp} \cdot TC_{fp} + C_p \cdot TC_p + IE \quad (2.2)$$

Onde:

C_{fp} : consumo fora de ponta (em kWh);

TC_{fp} : tarifa de consumo fora de ponta (em $R\$/kW$);

C_p : consumo de ponta (em kWh);

TC_p : tarifa de consumo de ponta (em $R\$/kW$).

Segundo Coura (2007), a modalidade tarifária verde é interessante para consumidores que podem desligar parte de seus equipamentos no horário de ponta ou que os utilizam por pouco tempo neste.

Para a modalidade tarifária azul contratam-se 2 valores de demanda (kW), correspondentes ao horários de ponta e fora de ponta, com tarifas diferenciadas ($R\$/kW$), em que a demanda contratada para o horário de ponta não pode ser superior a do horário fora de ponta. Desse modo, a conta de energia elétrica para essa modalidade é dada pela equação (2.3). Nesta também pode ser adicionada a multa por ultrapassagem de demanda à conta de energia, porém com tarifas

diferenciadas para os horários de ponta e fora de ponta.

$$CE = D_{fp} \cdot TD_{fp} + D_p \cdot TD_p + C_{fp} \cdot TC_{fp} + C_p \cdot TC_p + IE \quad (2.3)$$

Onde:

D_{fp} : demanda fora de ponta (em kW);

TD_{fp} : tarifa de demanda fora de ponta (em $R\$/kW$);

D_p : demanda de ponta (em kW);

TD_p : tarifa de demanda de ponta (em $R\$/kW$).

Segundo a ANEEL (2010), as unidades consumidoras do grupo A classificadas na subclasse água, esgoto e saneamento, tem direito ao benefício tarifário de redução de 15% nas modalidades tarifárias azul e verde.

Coura (2007) cita algumas recomendações práticas para controlar os gastos com energia elétrica em sistemas de saneamento. Dentre estas recomenda-se desenvolver projetos de eficiência energética, nos quais destacam-se as operações desnecessárias no horário de ponta; a pouca automatização do sistema, resultando em procedimentos operacionais realizados manualmente; e a falta de otimização e automatização das interdependências operacionais entre instalações. De acordo com Lam, Kenway e Lant (2017), além da eficiência operacional, outros fatores também influenciam os gastos com energia pelos sistemas de abastecimento de água, como o clima, relacionado à quantidade de precipitação média anual em uma região que impacta no consumo de água desta; a topografia, onde grandes diferenças de elevação levam a um maior consumo energético pelos sistemas; e o padrão de uso da água.

A diferenciação no valor da energia elétrica ao longo das horas dos dias também ocorre em outros países. Nos Estados Unidos, as tarifas de energia podem variar dependendo do estado e da concessionária local, supervisionadas pela Federal Energy Regulatory Commission (FERC), e o horário de ponta ocorre entre às 16h e às 20h. Na Alemanha, os períodos de ponta se encontram onde há maior demanda de energia, durante o inverno e entre 17h e 19h, quando a iluminação artificial e o aquecimento são mais usados; os quais as tarifas são reguladas pela Bundesnetzagentur. A França adota uma estrutura tarifária parecida com a de outros países europeus, com variação de preços dependendo da hora do dia, com os períodos de ponta entre às 18h e às 20h. Já na África do Sul, as tarifas variam dependendo da demanda e do uso, em que os períodos de ponta ocorrem entre às 7h e às 9h, e entre às 17h e às 19h.

2.1.1.2 Perdas de água e o custo energético

As perdas de água nos sistemas de abastecimento de água podem ser calculadas através da diferença entre o volume de água que entra no sistema e o volume de água faturado pela empresa prestadora do serviço. O Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA), que tem como objetivo geral promover o uso racional da água de abastecimento

público nas cidades brasileiras (BRASIL, 2015), classifica as perdas de água nos sistemas em reais (físicas) e aparentes (não-físicas) (COURA, 2007). As perdas reais dizem respeito a parcela de água não consumida, como vazamentos na rede, além de procedimentos operacionais como lavagem de filtros e descargas. Já as perdas aparentes dizem respeito a água consumida e não registrada, como ligações clandestinas ou não cadastradas, e hidrômetros com problemas ou fraudados.

Lam, Kenway e Lant (2017) através de dados de 30 cidades distribuídas pelo mundo, destacam que, em várias delas, a energia associada a água não faturada representa cerca de 25% dos custos energéticos dos sistemas de abastecimento. Dentre as metas estabelecidas no Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), que consiste no planejamento integrado do saneamento básico no Brasil, está a redução das perdas de águas nos sistemas de abastecimento brasileiros de 37% para 31% (BRASIL, 2013). Cunha, Santos e Gonzalez (2021) citam que, entre as possíveis ações que podem ser adotadas pelas empresas para reduzir as perdas de água, estão a detecção e o reparo sistemático de vazamentos na rede, o controle da pressão e a redução do consumo operacional. Segundo Dini, Hemmati e Hashemi (2022), o gerenciamento da pressão nos sistemas de abastecimento é uma maneira importante de reduzir vazamentos e, conseqüentemente, o consumo de energia, além de aumentar a confiabilidade da rede.

Segundo Cunha, Santos e Gonzalez (2021), o Programa de Gestão e Controle de Perdas de Água (PGCP), utilizado a partir de 1994 na região da cidade de Campinas, São Paulo, Brasil; prevê uma série de ações envolvendo o diagnóstico, o monitoramento e a atualização do sistema de abastecimento visando a diminuição das perdas reais e aparentes. Tal programa resultou, de 1994 a 2016, na redução de 34,6% para 12,5% nas perdas na distribuição, e de 37,7% para 21,6% nas perdas no faturamento. A diferença entre os valores economizados e os investidos no período representou uma economia de R\$758 milhões, e o volume de água não desperdiçado foi de 454 milhões de m^3 (CUNHA; SANTOS; GONZALEZ, 2021), demonstrando os impactos positivos nos âmbitos financeiro e ambiental da redução das perdas de água nos sistemas de abastecimento.

2.2 Revisão da literatura

A partir do final da década de 1980 nota-se o interesse em estudos relacionados ao racionamento energético nos sistemas de abastecimento de água. Mala-Jetmarova, Sultanova e Savic (2017) realizaram uma revisão de mais de 200 trabalhos existentes nas três décadas anteriores sobre a operação nos sistemas de abastecimento de água, onde constataram que estes se concentram em três áreas: na operação ótima das bombas, de modo a minimizar os custos com energia elétrica dos sistemas de abastecimento de água, e que pode ou não considerar o controle em tempo real; na gestão da qualidade da água, de modo a atender a demanda com água de qualidade e em quantidade adequada; e no uso de válvulas de controle, no geral, utilizadas junto com as duas primeiras áreas. Os autores observaram que todos os trabalhos utilizam a primeira

área, a operação ótima das bombas, sendo 41% destes sua a única área de aplicação. Além disso, os autores constataram que 84% dos trabalhos utilizaram modelos de otimização monobjetivos.

Dentro da operação ótima das bombas, [Mala-Jetmarova, Sultanova e Savic \(2017\)](#) observaram que a maioria dos modelos da literatura utilizam a técnica do planejamento explícito das bombas, em que as variáveis de decisão podem ser o *status* da bomba (ligada/desligada) em cada intervalo de tempo pré-definidos dentro do horizonte de planejamento; o tempo em que a bomba deve permanecer ligada; ou o período de início e fim da operação da bomba.

Nota-se, também, o aumento no uso de *softwares* hidráulicos para projetos e simulações associadas aos sistemas de abastecimento de água, em que se destaca o *software* EPANET ([ROSSMAN et al., 2009](#)). O EPANET é um *software* livre e de código aberto, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA), que realiza simulações de longo período do comportamento hidráulico e da qualidade em redes de tubulação pressurizada ([EUA, 2012](#)), e que pode executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico sem limitação no número de elementos da rede.

A Figura 2.4 apresenta o número de trabalhos publicados que citam o EPANET, iniciando em 1994. Tal figura foi obtida através da base de dados Scopus ao se realizar uma busca utilizando a palavra "EPANET" no dia 05/07/2024. Nesta vê-se o aumento da frequência que o termo vem sendo utilizado na literatura, indicando ser uma ferramenta importante para pesquisas envolvendo os sistemas de abastecimento de água, como veremos nos trabalhos descritos a seguir. Observe também que, nos primeiros 6 meses de 2024, tem-se 68 trabalhos que citam o o EPANET, enquanto houve um total de 74 trabalhos que falaram sobre o EPANET durante todo o ano de 2019.

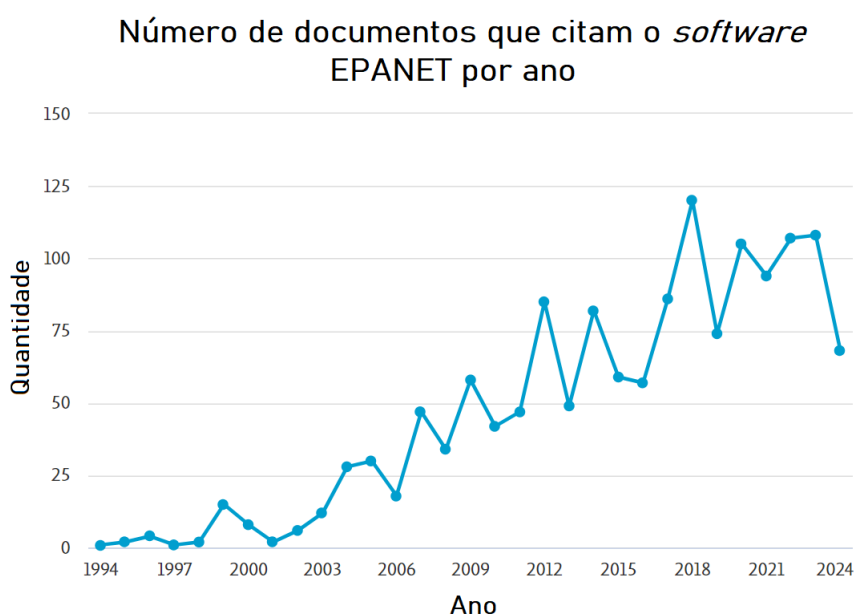


Figura 2.4 – Número de documentos que citam o *software* EPANET ao longo dos anos até 05/07/2024.

A seguir, descrevemos alguns trabalhos que apresentam modelos matemáticos para a otimização energética em sistemas de abastecimento de água, a partir de 2019. Nestes, tem-se a minimização dos custos com energia relacionados ao funcionamento das bombas hidráulicas como função objetivo para modelos de otimização monobjetivos, ou como uma de suas funções em modelos multiobjetivos.

Luna et al. (2019) propõem um método de otimização híbrido baseado no Algoritmo Genético (AG) para a programação das bombas para melhorar a gestão e a eficiência energética em sistemas de abastecimento de água, visando reduzir o consumo de energia e, conseqüentemente, os custos; e as emissões de gás carbono. Os autores fornecem dois tipos de soluções: uma focada apenas na minimização dos custos através do planejamento da operação das bombas; e outra, que também minimiza tais custos, mas considerando a quantidade da água nos reservatórios, a fim de facilitar a operação de um futuro horizonte de planejamento. Em ambos os casos as soluções são validadas através do EPANET.

Um estudo de caso foi realizado em parceria com uma empresa de água responsável pelo abastecimento da região de Algarve, Portugal. Comparada a operação realizada na prática, a otimização da operação das bombas proposta por Luna et al. (2019) resultou numa melhoria média de 15% da eficiência energética do sistema, sendo o maior resultado alcançado de 25%. Vale ressaltar que o trabalho de Luna et al. (2019) faz parte do projeto europeu *LIFE SWSS e Smart Water Supply Systems* que, além da etapa da otimização apresentada neste trabalho, também contou com as etapas de diagnóstico, em que foram realizadas avaliações detalhadas nas estações elevatórias para definir o cenário base do estudo; a modelagem, com o desenho da rede no *software* EPANET; e a previsão, onde foi desenvolvido um modelo de previsão de consumo com base em dados históricos.

O trabalho de Luna et al. (2019) propõe um modelo de programação não linear inteiro misto que, por ser resolvido através do AG, possui o risco de ficar preso em soluções ótimas locais, mesmo tendo suas soluções avaliadas pelo EPANET, como dito pelos autores. O critério de parada adotado foi de 140 gerações, indicando um alto tempo computacional para adquirir boas soluções. Além disso, os autores não realizaram testes numéricos com redes disponíveis na literatura, não sendo possível a comparação de seus resultados com os demais trabalhos.

Housh e Salomons (2019) trabalharam com um modelo de otimização multiobjetivo, minimizando o custo com energia proveniente da operação das bombas e maximizando o intervalo entre as comutações destas. A metodologia proposta, segundo os autores, é relevante para os casos onde a bomba funciona contra um ponto de carga relativamente constante e quando opera numa parte da rede considerada pequena e plana, já que considera a operação local das bombas, e não um planejamento global da rede.

Os testes realizados por Housh e Salomons (2019) consideraram uma adaptação do sistema de abastecimento do norte da Itália de Alvisi e Franchini (2017), e utilizaram o método do ϵ -restrito para transformar o modelo multiobjetivo em monobjetivos, discretizando as variáveis

em seu espaço de soluções viáveis e analisando o valor das possíveis funções objetivo. Além disso, os autores apresentam um modelo de otimização onde troca-se o objetivo de maximizar o intervalo entre as comutações das bombas por minimizar o número de comutações durante o horizonte de planejamento. Assim, para a rede em questão, que atende as características propostas na metodologia dos autores, o modelo multiobjetivo retornou melhores resultados.

O trabalho de [Housh e Salomons \(2019\)](#) tem como pontos negativos a aplicação apenas em redes que atendem as características descritas anteriormente, não sendo aplicável à todos os sistemas de abastecimento de água, considerando a operação local das bombas. Além disso, os autores não utilizam *softwares* para a simulação hidráulica das soluções obtidas, como o EPANET, a fim de validar suas soluções.

[Vieira et al. \(2020\)](#) utilizam uma metodologia híbrida, abordada inicialmente por [Giacomello, Kapelan e Nicolini \(2013\)](#), em que o modelo de otimização encontra o cronograma ideal para as bombas e o EPANET verifica a viabilidade da solução. Os autores propõem um modelo de programação não linear inteira mista, que é resolvido através de uma técnica de linearização. O procedimento inclui variáveis de comutação das bombas através de um número menor de variáveis binárias. Também foi necessário o desenvolvimento de um procedimento de correção dos erros induzidos pela linearização, como citado pelos autores.

Testes realizados pelos autores superaram os resultados encontrados até então para a rede de [Zyl, Savic e Walters \(2004\)](#) por [Marchi, Simpson e Lambert \(2016\)](#); para a rede Richmond Esqueleto por [Giacomello, Kapelan e Nicolini \(2013\)](#); e para a rede Richmond por [López-Ibáñez, Prasad e Paechter \(2008\)](#); porém, como permitem a alteração do volume inicial de seus reservatórios, algumas de suas redes não se encontram nas mesmas condições iniciais de outras literaturas, não sendo possível comparar seus resultados. Além disso, o trabalho de [Vieira et al. \(2020\)](#) contribui fornecendo uma nova instância obtida a partir do sistema de abastecimento de Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, que considera condições específicas da tarifação energética brasileira.

À medida que os efeitos das mudanças climáticas se tornam mais aparentes, considerar as emissões de GEE pelos sistemas de abastecimento de água tem sido discutido. Nesse sentido, [Güngör-Demirci, Lee e Keck \(2020\)](#) consideram como um dos objetivos de seu modelo minimizar a quantidade de GEE produzidos e lançados no meio ambiente na geração da energia utilizada para operar as bombas em um sistema de abastecimento de água, calculado através de um fator multiplicativo constante vinculado ao consumo de energia das bombas. Considerar tais emissões, assim como em [Wu, Simpson e Maier \(2012\)](#) e [Stokes, Maier e Simpson \(2015\)](#), vêm do fato de que a matriz energética da Austrália é composta, em sua grande maioria, por fontes de energia não renováveis, como carvão, gás e petróleo. Este não é o caso do Brasil, que, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) 2020, possuía 46,1% de sua matriz composta por fontes renováveis em 2019, enquanto a média mundial, em 2017, foi de apenas 13,9% ([BRASIL, 2020](#)).

O segundo objetivo de [Güngör-Demirci, Lee e Keck \(2020\)](#) visa minimizar os custos com

energia elétrica proveniente da operação das bombas. Os autores ainda consideram a manutenção da qualidade da água através do tempo em que esta permanece nos nós com demanda diferente de zero em que, hora a qualidade da água é utilizada como um objetivo, hora como restrição; de modo a avaliar seu impacto nos outros dois objetivos. Segundo os autores, este é o primeiro estudo que integra os três objetivos, e único em termos de comparação da qualidade da água como um objetivo e como uma restrição.

Nos resultados dos testes com a Rede 3 do EPANET, [Güngör-Demirci, Lee e Keck \(2020\)](#) observaram que, o cenário que não utiliza a qualidade da água, nem como objetivo e nem como restrição, gera um conflito entre os custos de energia e a quantidade de GEE emitido, assim como em [Stokes, Maier e Simpson \(2015\)](#). Já o cenário onde a qualidade da água é tratada como restrição, os custos de bombeamento e as emissões de GEE continuaram em conflito, porém com valores maiores. Já o cenário onde a qualidade da água é tratada como objetivo, a relação entre os custos de energia e as emissões do GEE se tornam positivas, mas a qualidade da água se torna inversamente proporcional a eles.

[Parras \(2020\)](#) propõem modelo matemático de otimização linear inteiro misto que têm como diferencial considerar características hidráulicas como potência e rendimento das bombas, altura manométrica, perda de carga nas tubulações e zonas de pressão, que normalmente, não são consideradas neste tipo de modelo. Testes numéricos foram realizados com uma rede proposta pelos autores e com a rede Anytown modificada, indicando a eficiência do modelo para as redes em questão. Porém, abordagem utilizada pelos autores não faz uso da simulação hidráulica para validar suas soluções.

[Faccioli \(2021\)](#) não apresenta um novo modelo matemático, mas preenche uma lacuna deixada por [Parras \(2020\)](#), em que realiza simulações através do EPANET com as soluções obtidas em [Parras \(2020\)](#) para sua rede hipotética e para a rede Anytown modificada, além de variações nas condições iniciais da rede, indicando a importância do uso do simulador hidráulico para validar soluções e estruturar novas redes.

[Chen et al. \(2021\)](#) desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo resolvido através do Algoritmo Genético de Classificação Não Dominado-II (*Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II* - NSGA-II), que visa minimizar o custo operacional e o consumo de energia operacional médios diários do sistema durante o ciclo operacional otimizado; e o número diário de comutações das bombas de captação. Tal trabalho utiliza como estratégia um sistema de dois estágios, onde um diz respeito à estação de bombeamento que capta água da fonte e o outro à estação de bombeamento que abastece a demanda, justificada pelos autores pela falta de trabalhos que utilizem essa otimização de forma sistematizada. Os autores ainda avaliam os impactos causados pela frequência e pelo intervalo de comutação das bombas na durabilidade da estação de bombeamento.

As estratégias propostas por [Chen et al. \(2021\)](#) foram desenvolvidas com base em uma abordagem de controle de *feedback* de nível dinâmico, a qual insere um intervalo de tempo

antes do final do período que a energia é mais cara, média e mais barata; alterando o nível do reservatório que, por sua vez, afeta o *status* da bomba. Tal abordagem é otimizada através da definição da operação ideal das bombas de captação de acordo com o nível do reservatório. A primeira estratégia diz respeito a minimizar as funções objetivo relacionadas ao custo operacional e o consumo de energia operacionais médios diários do sistema de abastecimento contendo uma penalidade para o intervalo de tempo de comutação da bomba; e a segunda minimiza as funções objetivo relacionadas ao custo operacional médio diário do sistema e o número diário de comutações das bombas de captação; onde, de acordo com [Chen et al. \(2021\)](#), a primeira estratégia é a ideal do ponto de vista do consumo de energia. Porém, os autores não utilizam *softwares* para a simulação hidráulica e não fazem uso de redes disponíveis na literatura, não sendo possível a comparação de seus resultados.

[Kowalik e Rzemieniak \(2021\)](#) apresentam um modelo de programação linear binário com o objetivo é minimizar o custo de energia utilizada pelas bombas em que as variáveis dizem respeito ao seu *status* no período. Para isso, utilizam uma análise dos volumes estimados de consumo para reduzir os custos com energia baseada em [Kozłowski et al. \(2017\)](#), com a introdução de variáveis auxiliares referentes ao volume de água nos reservatórios a cada período. Os autores também propõem uma extensão do modelo, permitindo uma maior flexibilidade para a programação das bombas. Testes numéricos foram realizados com dados do sistema de abastecimento de uma cidade do leste da Polônia, na qual têm-se 3 níveis tarifários para a energia: alto, das 16h às 21h; médio, das 7h às 13h; e baixo nos demais períodos (0h às 7h, 13h às 16h e 21h às 24h). Nestes, os autores concluem que o modelo proposto resultou em custos quase iguais aos de [Kozłowski et al. \(2017\)](#); e sua extensão resulta em um custo um pouco menor.

O Microsoft Excel é utilizado juntamente com um *OpenSolver* para os testes numéricos, onde [Kowalik e Rzemieniak \(2021\)](#) indicam que sua escolha justifica-se porque tal ferramenta é mais barata se comparada a outras, e que é disponibilizada em grande parte das empresas. Além disso os autores frisam que modelos matemáticos de otimização enfrentam uma questão importante no mundo real, onde, geralmente, tais métodos não são aplicáveis em empresas sem o suporte computacional adequado. Porém, a justificativa dos autores não considera que solucionadores comerciais são de fácil acesso e amplamente utilizados na resolução de problemas de operação das bombas nos sistemas de abastecimento, e que muitos possuem sua distribuição de forma gratuita. Além disso, os autores não utilizam *softwares* para a simulação hidráulica para validar suas soluções.

[Dadar et al. \(2021\)](#) apresentam um modelo de programação não linear que propõem um novo cálculo para a energia consumida pelas bombas, onde as variáveis são a vazão e a eficiência da bomba, minimizada pela função objetivo. A função objetivo ainda é acrescida por penalidades relacionadas ao volume dos reservatórios para que este atinja o melhor equilíbrio, atendendo as restrições do sistema sem alcançar seu volume mínimo ao final da simulação, de modo a facilitar a operação futura.

O modelo foi resolvido através do AG, e os testes foram realizados com dados de três dias do sistema de abastecimento da cidade de Gonabad, Irã; encontrando uma redução diária de 15% a 17% nos custos com energia elétrica em relação à operação realizada na prática. Além disso, [Dadar et al. \(2021\)](#) concluem que o modelo é adequado na seleção de novas bombas para a ampliação do sistema de abastecimento em questão.

Assim como em [Luna et al. \(2019\)](#), [Dadar et al. \(2021\)](#) faz uso do AG, não havendo garantia de se atingir a solução ótima. Os autores também não utilizam *softwares* para a simulação hidráulica de forma a validar suas soluções e nem de redes disponíveis na literatura para os testes.

[Ayyagari et al. \(2021\)](#) apresentam um modelo para o problema de fluxo ótimo da água em sistemas de abastecimento cujo diferencial é considerar a eficiência da bomba como uma variável dependente da vazão para minimizar a potência consumida pela bomba e, conseqüentemente, o consumo de energia desta. A dificuldade no trabalho de [Ayyagari et al. \(2021\)](#) provém do complexo modelo de programação não linear inteiro misto, não convexo, que utiliza aproximações lineares e trata da parte fracionária referente a potência da bomba através do Algoritmo de Dinkelback ([SHEN; YU, 2018](#)), obtendo um problema de programação linear inteira mista.

Os testes foram realizados com uma rede fictícia criada pelos autores e divididos em 3 casos. O primeiro é o caso base, utilizado para comparação com os resultados obtidos pelo modelo proposto, em que [Ayyagari et al. \(2021\)](#) utilizam os controles baseados no EPANET. No segundo caso, os autores resolvem o modelo utilizando a eficiência da bomba como um parâmetro fixo; e no terceiro, o problema é resolvido através da metodologia proposta, com a eficiência da bomba sendo uma variável que depende da vazão da bomba. Nos segundo e terceiro casos os autores tiveram a viabilidade de seus resultados avaliados no EPANET. O trabalho de [Ayyagari et al. \(2021\)](#) conclui que a utilização da eficiência da bomba como variável no modelo de otimização permite que a bomba opere próxima ao seu valor ótimo enquanto reduz, ao mesmo tempo, sua potência consumida, e, conseqüentemente, os custos com energia elétrica. Porém, os autores não realizam testes com redes disponíveis na literatura para efeito de comparação com resultados conhecidos.

[Abdelsalam e Gabbar \(2021\)](#) utilizam uma metodologia híbrida, em que vários cronogramas das bombas são obtidos através de um algoritmo de otimização e são verificados pelo EPANET, retornando a melhor solução encontrada. Os autores utilizam o Algoritmo de Campo Elétrico Artificial (*Artificial Electric Field Algorithm - AEFA*), uma meta-heurística formulada com base nas leis de Coulomb e na 2ª lei de Newton, e que se assemelha a Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*). O objetivo é minimizar o custo do consumo de energia elétrica; a manutenção da bomba, através de seu número de comutações; e a carga de demanda.

Resultados encontrados por [Abdelsalam e Gabbar \(2021\)](#) descrevem uma redução de 18,4% no custo diário com energia elétrica para a Rede 3 do EPANET. Para a rede Richmond

esqueleto, de Zyl (2001), os autores obtiveram uma redução de 15,5% nos custos quando comparados à Ghaddar et al. (2015). Para parte da rede de Toronto, Canadá, a redução encontrada foi de 36,3% quando comparada a política de acionamentos realizada na prática. Além disso, os autores realizaram testes utilizando os AG e o PSO em que, para todos os casos, a metodologia proposta encontrou a melhor solução em um número menor de iterações.

Um modelo de programação linear inteira mista e um método de solução baseado na heurística *relax-and-fix*, que fornece soluções viáveis em um menor tempo computacional, são propostos por Santos et al. (2022). Tal modelo se diferencia, segundo os autores, por ser o primeiro modelo linear inteiro misto da literatura que considera a interdependência do sistema de abastecimento, com uma ou mais bombas por trecho que podem estar ligadas, e por considerar restrições relacionadas à demanda de energia contratada.

Além dos testes numéricos com a rede Anytown modificada (WALTERS et al., 1999), Santos et al. (2022) realizaram testes com a parte central da rede de abastecimento da cidade de São Carlos, São Paulo, Brasil; no qual os gestores da empresa de saneamento da cidade utilizaram as soluções encontradas para rever os contratos de energia, obtendo economias significativas. Porém, o modelo é formulado para o uso em redes ramificadas, sendo necessárias adaptações para redes malhadas da literatura. Além disso, os autores não utilizam *softwares* para a simulação hidráulica, de forma a validar as soluções obtidas.

O trabalho de Dini, Hemmati e Hashemi (2022) tem como objetivo determinar o número ideal de bombas ativas ao mesmo tempo em que otimiza suas configurações, pois utiliza bombas com velocidade variável. Para isso, foi desenvolvido um modelo não linear cuja função objetivo, baseada em Dini e Tabesh (2019), utiliza a lógica Fuzzy, que favorece pressões superiores de modo a otimizar as pressões nos nós da rede. O modelo é resolvido através do PSO implementado no *software* Matlab, combinado ao EPANET, que avalia as soluções.

Testes numéricos foram realizados para duas redes, a rede amostral de Larock, Jeppson e Watters (1999) e a rede da cidade de Ahar, Irã. Em ambos os testes foram utilizados três cenários: no primeiro, todas as bombas funcionam na velocidade máxima, constante; no segundo, as bombas estão com seus cronogramas ideais mas sem otimizar suas configurações; e no terceiro, as bombas tem seus cronogramas e configurações otimizadas. Para a rede amostral de Larock, Jeppson e Watters (1999), Dini, Hemmati e Hashemi (2022) obtiveram uma melhoria de até 50,5% nos vazamentos e de 56,5% no uso da energia. Para a rede da cidade Ahar os autores registraram melhorias de até 26,5% e 76,2% em relação aos vazamentos e ao uso da energia, respectivamente, comparados à prática.

Sharif et al. (2022) desenvolveram uma metodologia dividida em três estágios para otimizar os custos com energia provenientes da operação das bombas e a qualidade da água. O primeiro estágio otimiza a localização dos *boosters* de cloro para manter a faixa desejada de cloro em toda rede utilizando uma abordagem baseada em risco desenvolvida pelos autores em um trabalho anterior (SHARIF et al., 2017). Para o segundo estágio, os autores desenvolveram

um modelo de otimização por metas inteira mista, no qual algumas restrições ditas rígidas, como a capacidade dos reservatórios, são convertidas em restrições flexíveis, como a necessidade de água dos reservatórios, de acordo com a teoria da programação por metas. O modelo de otimização é resolvido através do *solver* CPLEX integrado ao EPANET, e minimiza os custos de bombeamento. No terceiro estágio os autores realizam a integração dos resultados obtidos nos primeiro e segundo estágios, e realizam a simulação no EPANET para validar os resultados.

Testes numéricos foram realizados com dados da rede de abastecimento da cidade de Al-Khobar, Arábia Saudita, nos quais [Sharif et al. \(2022\)](#) obtiveram uma redução de cerca de 20% nos custos com energia elétrica em relação a operação realizada na prática. Além disso, os autores observaram uma melhoria de 40% na qualidade da água.

[Marini et al. \(2023\)](#) consideram como uma lacuna na literatura a falta de análises adicionais para avaliar se as soluções obtidas são tecnicamente viáveis. Para isto os autores desenvolveram dois modelos de otimização, ambos resolvidos através do AG Pikaia ([BOULDER, 1995](#)) e integrados ao EPANET. O primeiro é utilizado para identificar soluções em duas literaturas disponíveis que são inviáveis para o modelo proposto, pois induzem ao transbordamento do tanque ou a comutação contínua das bombas. O segundo modelo compara o número de passos do EPANET com o valor previsto, calculado através da razão entre a duração da simulação e passo de tempo hidráulico; em que, se forem diferentes, uma penalidade é adicionada a função objetivo para evitar soluções inviáveis ocasionadas pelo transbordamento ou esvaziamento dos tanques. Os autores destacam que, ao reduzir o intervalo de comutação das bombas, os resultados obtidos pelo modelos matemáticos serão mais confiáveis, porém a custos computacionais muitas vezes inaceitáveis.

Para a rede Anytown de [Walters et al. \(1999\)](#), [Marini et al. \(2023\)](#) utilizaram os resultados de [Savić, Bicik e Morley \(2011\)](#), e, para a Mini rede de [Zyl, Savić e Walters \(2004\)](#), [Marini et al. \(2023\)](#) utilizaram os resultados de [Marchi, Simpson e Lambert \(2016\)](#). Para ambas as redes, o primeiro modelo proposto pelos autores constata o transbordamento de um tanque; e, após as correções propostas através do segundo modelo, os autores obtêm uma redução de 12% nos custos com energia quando comparadas as soluções de [Savić, Bicik e Morley \(2011\)](#), e um acréscimo de 1% em relação a solução de [Marchi, Simpson e Lambert \(2016\)](#), respectivamente.

[Egito, Azevedo e Bezerra \(2023\)](#) desenvolveram um modelo que otimiza o acionamento das bombas ao mesmo tempo que faz o uso eficiente dos reservatórios, em que utiliza um conjunto de restrições que determinam o acionamento da bomba apenas quando uma porcentagem pré-determinada do volume máximo do reservatório tenha sido utilizada. Além disso, o modelo de otimização não linear inteiro misto faz uso de uma quantidade pequena de restrições, que é resolvido através do AG e têm suas soluções para o liga/desliga das bombas simuladas e validadas através do EPANET. Tal característica vem sendo observada nos modelos de otimização mais recentes, já que o uso do EPANET garante a viabilidade hidráulica das soluções, suprimindo o uso de algumas restrições no modelo.

Testes numéricos foram realizados com a Rede Anytown modificada apresentada em [Rao e Salomons \(2007\)](#), onde os autores analisaram as soluções obtidas para o custo apenas através do modelo de otimização e as soluções após a simulação e validação pelo EPANET. Com isso, [Egito, Azevedo e Bezerra \(2023\)](#) obtiveram uma redução de 21% do custo com energia elétrica após a simulação através do EPANET, além da validação das soluções, indicando a viabilidade hidráulica da operação.

[Miquelin et al. \(2023\)](#) apresentam um modelo de programação linear inteiro misto que minimiza os custos com energia elétrica advindos da operação das bombas que possui como diferencial o uso de restrições que exigem pressão suficiente para que os centros consumidores sejam abastecidos. Os autores também apresentam um modelo matemático que simula a operação de bombeamento realizada, comumente, na prática dos sistemas de abastecimento, em que ligam-se as bombas quando os níveis dos reservatório se aproximam do volume mínimo, desligando-as quando estes atingem seus volumes máximos, sem levar em consideração a variação do custo da energia ao longo das horas do dia.

Testes numéricos foram realizados com a rede fictícia de [Toledo et al. \(2008\)](#), em que o modelo de otimização proposto obtém uma redução no consumo de energia entre 12% e 25% quando comparado ao modelo que simula a operação realizada na prática. Porém, o modelo apresentado por [Miquelin et al. \(2023\)](#) é passível de uso para redes ramificadas, mas não se aplica a redes malhadas.

O trabalho de [Shao et al. \(2024\)](#) se difere por apresentar um novo método de linearização com uma abordagem que reduz o número de variáveis binárias para um modelo de programação não linear baseado em [Vieira et al. \(2020\)](#). O modelo linearizado é resolvido através do *solver* Gurobi e sua solução é simulada através do *software* EPANET. Se o EPANET retornar uma simulação bem sucedida, adota-se esta solução. Caso contrário, os autores realizam um ajuste na fase de linearização, reduzindo o desvio máximo de pressão permitido para todos os tubos.

Os testes numéricos foram realizados com a Mini rede de VanZyl ([ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004](#)), a Rede Richmond ([ZYL, 2001](#)) e uma rede realista de uma cidade da China. Para a Mini rede de VanZyl e a Rede Richmond, [Shao et al. \(2024\)](#) obtiveram uma redução de, aproximadamente, 0,87% e 5,09%, respectivamente, em relação aos resultados de [Vieira et al. \(2020\)](#). Vale ressaltar que os autores utilizam a solução obtida para o custo energético advindo do resultado do PLIM, e não o retornado pelo EPANET. Para a rede de uma cidade da China os autores alcançaram uma redução de 9,83% nos custos quando comparados a operação realizada na prática. Assim, [Shao et al. \(2024\)](#) deixa um *gap*, descrito pelo próprios autores, entre o valor da função objetivo e o limite inferior, advindo do tamanho do desvio permitido durante a linearização.

[Brentan et al. \(2024\)](#) apresentam um modelo de programação multiobjetivo que busca a operação ótima das bombas que minimiza o consumo de energia e maximiza os indicadores de qualidade da água. O foco principal do trabalho é avaliar a influência de restrições e funções de

penalidade na solução ótima de programação de bombas, ao mesmo tempo em que considera o efeito secundário da operação ótima na qualidade da água. Os testes foram realizados com uma adaptação da rede fictícia D-town (STOKES; WU; DANDY, 2012), onde foram gerados diferentes cenários indicando que soluções ótimas geralmente exigem o equilíbrio de objetivos conflitantes. Além disso, os autores utilizam a biblioteca *Water Network Tool for Resilience* (WNTR) (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018), que contém o simulador do *software* EPANET. Os resultados destacam a necessidade de uma tomada de decisão robusta para lidar com as complexidades dos sistemas de distribuição de água.

2.3 Síntese da literatura

A Tabela 2.1 apresenta a síntese das principais características dos trabalhos descritos neste capítulo, em ordem cronológica, indicando o tipo do modelo matemático e restrições (ou grupo de restrições); o tipo de rede em que o modelo pode ser aplicado sem haver a necessidade de adaptações nesta (ramificada ou malhada); se o método de solução faz uso do *software* EPANET e as redes utilizadas nos testes numéricos; e sumariza as contribuições do modelo matemático juntamente com a abordagem de solução propostos neste trabalho para a minimizar os custos advindos da operação das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água em relação aos demais da literatura. Nesta tabela, considere:

- Modelo: PLB - Programação Linear Binária, PLIM - Programação Linear Inteira Mista, PNL - Programação Não Linear, PNLIM - Programação Não Linear Inteira Mista, PMIM - Programação por Metas Inteira Mista e OM - Otimização Multiobjetivo.
- Restrições: 1 - Funções e/ou restrições que evitam uma grande quantidade de acionamentos das bombas, como limitar o número de acionamentos durante o período de simulação e/ou indicar o período mínimo em que a bomba deve permanecer ligada/desligada; e 2 - Funções e/ou restrições sobre características hidráulicas da rede, como potência consumida pela bomba e pressão;
- Aplicação: I - Rede ramificada; e II - Rede malhada.
- Rede testada: A - Rede Anytown (WALSKI et al., 1987) e/ou Rede Anytown modificada (WALTERS et al., 1999), B - Mini rede de VanZyl (ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004), C - Rede Richmond (ZYL, 2001; ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004), D - Rede Richmond Esqueleto, E - Rede 3 do EPANET; F - Rede fictícia disponível na literatura diferente das citadas anteriormente e/ou criada pelos autores; G - Rede de abastecimento real e/ou baseada em uma rede real.

Tabela 2.1 – Comparação de trabalhos da literatura

Referência	Modelo	Restrições		Aplicação		EPANET	Rede testada							
		1	2	I	II		A	B	C	D	E	F	G	
Luna et al. (2019)	PNLIM				X	X								X
Housh e Salomons (2019)	OM		X	X										X
Vieira et al. (2020)	PNLIM	X	X		X	X		X	X	X				X
Güngör-Demirci, Lee e Keck (2020)	OM		X		X	X					X			
Parras (2020)	PLIM	X	X	X			X						X	
Faccioli (2021)	PLIM	X	X	X		X	X						X	
Chen et al. (2021)	OM	X	X	X									X	
Kowalik e Rzemieniak (2021)	PLB	X	X	X										X
Dadar et al. (2021)	PNL		X	X										X
Ayyagari et al. (2021)	PNLIM		X		X	X							X	
Abdelsalam e Gabbar (2021)	PNLIM	X	X		X	X				X	X			X
Santos et al. (2022)	PLIM			X			X							X
Dini, Hemmati e Hashemi (2022)	PNL		X		X	X								X
Sharif et al. (2022)	PMIM		X		X	X								X
Marini et al. (2023)	PNLIM	X	X		X	X	X	X						
Egito, Azevedo e Bezerra (2023)	PNLIM	X	X		X	X	X							
Miquelin et al. (2023)	PLIM	X	X	X									X	
Shao et al. (2024)	PNLIM	X	X		X	X		X		X				X
Brentan et al. (2024)	OM		X		X	X							X	
Trabalho presente	PLIM	X			X	X		X	X	X				X

A Tabela 2.1 indica o aumento do uso do *software* EPANET nos últimos anos, pois, através dele, garante-se o atendimento de todas as condições hidráulicas da rede. Além disso, ao fazer uso do EPANET, permite-se a utilização de modelos de otimização mais simples, sem a necessidade de restrições que representem algumas características hidráulicas da rede, que geralmente são não-lineares e não-convexas, pois estas possuem a garantia de atendimento pelo *software*.

Em relação à aplicação da metodologia a redes ramificadas ou malhadas, a Tabela 2.1 indica que modelos de otimização vem sendo desenvolvidos para ambos os casos. Porém, vale ressaltar que modelos formulados para redes malhadas também são viáveis de aplicação em redes ramificadas sem que haja necessidade de adaptações nos dados das redes; porém a recíproca não é verdadeira; ou seja, para modelos desenvolvidos para redes ramificadas, é preciso realizar alterações nos dados das redes malhadas para adaptá-las ao modelo matemático.

Também na Tabela 2.1, observa-se o número elevado de trabalhos cuja a aplicação se dá em redes de abastecimento baseadas em redes reais distintas. Tal aplicação é válida do ponto de vista de utilizar a metodologia na prática local, muitas vezes minimizando os custos quando comparados ao que era realizado na prática; porém, o não uso de redes utilizadas na literatura dificulta a comparação entre as metodologias propostas. Além disso, para algumas dessas redes reais, os dados não estão publicamente disponíveis.

Desse modo, o modelo matemático proposto neste trabalho trata-se de um PLIM de fácil resolução computacional para redes malhadas, que minimiza os custos relacionados a operação das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento. Propõe-se uma abordagem de solução que, mesmo sem fazer uso de restrições sobre as características hidráulicas da rede, possui a garantia de atendimento destas através do uso do *software* EPANET, assegurando a viabilidade das soluções.

No próximo capítulo são apresentados o modelo de otimização para o problema do custo operacional das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água e a abordagem de solução propostos neste trabalho.

3 MODELO MATEMÁTICO E ABORDAGEM DE SOLUÇÃO PROPOSTOS

Neste capítulo é apresentado o modelo matemático de programação linear inteiro misto proposto neste trabalho para minimizar os custos com energia elétrica advindos da operação das bombas hidráulicas nos sistemas de abastecimento de água. Tal modelo tem como diferenciais:

- Trata-se de um modelo de programação linear, sendo viável sua resolução por *solvers* comerciais;
- Possui aplicação para redes malhadas, aproximando-o da realidade dos sistemas de abastecimento de água;
- Além de minimizar os custos relacionados ao funcionamento as bombas, possui em sua formulação a minimização do número de acionamentos das bombas e suas vazões, de modo a reduzir os custos e o desgaste das bombas, já que diminui o número de períodos que estas permanecem ligadas;
- A solução obtida refere-se a programação da operação das bombas, cuja aplicação prática não necessita de investimentos ou alterações estruturais na rede.

Também é apresentado neste capítulo a abordagem de solução proposta. Esta abordagem faz uso do modelo matemático proposto; do *software* EPANET, que garante o atendimento das restrições hidráulicas não consideradas no modelo proposto; e de duas heurísticas, também propostas neste trabalho: uma para a correção de pressões negativas; em que, ao final, obtém-se uma solução que reduz os custos energéticos dos sistemas de abastecimento de água e que é validada do ponto de vista hidráulico; e outra que garante que os volumes dos reservatórios ao final da simulação fiquem próximos aos seus volumes iniciais, de modo a facilitar a operação de um novo horizonte de planejamento.

3.1 Definições iniciais

Seja N o conjunto de nós e A o conjunto de pares dos nós, chamados de arestas, em que o par $G = (N, A)$ é chamado de grafo (Figura 3.1). As arestas são chamadas de arcos quando são pares ordenados, isto é, um arco (i, j) tem o nó i como nó inicial e o nó j como nó final, obtendo-se, assim, um grafo ordenado (ou direcionado) (ARENALES et al., 2006) (Figura 3.2).

Quando os nós e as arestas do grafo ordenado possuem valores associados, este é chamado de rede (Figura 3.3).

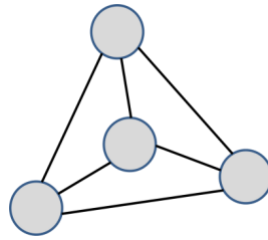


Figura 3.1 – Representação de um grafo (Fonte: Freitas (2014)).

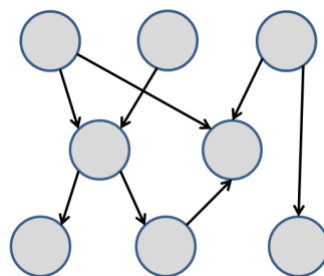


Figura 3.2 – Representação de um grafo direcionado (Fonte: Freitas (2014)).

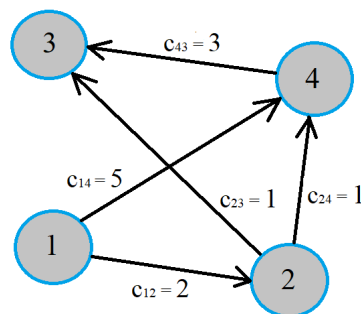


Figura 3.3 – Representação de uma rede com fluxo (Fonte: baseado em Arenales et al. (2006)).

Uma rede com fluxo pode ser considerada como um grafo direcionado onde cada arco tem uma capacidade e um fluxo associados, em que o fluxo não pode ultrapassar sua capacidade (BRITO; MOTTA, 2016). Além disso, um fluxo deve satisfazer a restrição de conservação de fluxo, ou seja, a quantidade de fluxo que entra em um nó é a mesma que sai, com exceção dos nós que são fontes; ou seja, aqueles que fornecem água para o sistema; e os que possuem demanda; aqueles que consomem a água.

Neste trabalho consideramos que o sistema de abastecimento de água como um grafo direcionado em que cada arco possui sua capacidade e fluxo, obtendo-se, assim, um modelo matemático aplicável em redes malhadas.

Os nós podem ser divididos em três categorias: nós que são fontes, aqueles que fornecem água para o sistema, como rios e mananciais; nós que são reservatórios, responsáveis por

armazenar e distribuir a água captada para a rede; e nós que são junções, que são nós que interligam a tubulação e que podem ou não possuir demanda.

Um nó predecessor é aquele que vem antes de um determinado nó, considerando a direção do fluxo; e um nó sucessor é aquele que vem imediatamente depois de um determinado nó (NETTO, 2003). Exemplificando através da Figura 3.3, tem-se que o nó 1 é predecessor dos nós 2 e 4, ou seja, o fluxo ocorre na direção do nó 1 para o nó 2, e do nó 1 para o nó 4, obtendo-se, assim, os arcos $(1, 2)$ e $(1, 4)$. Logo, o nó 2 e o nó 4 são sucessores do nó 1.

3.2 Modelagem matemática

Seja o grafo direcionado $G = (N, A)$, onde N é o conjunto dos nós e A é o conjunto dos arcos da rede. Para os sistemas de abastecimento, um nó i pode ser do tipo fonte ($i \in F$), reservatório ($i \in R$) ou junção ($i \in J$), em que junção é um ponto onde dois arcos se encontram. Cada nó pode ser de apenas um tipo, ou seja, $F \cap R = \emptyset$, $F \cap J = \emptyset$ e $R \cap J = \emptyset$, em que $F \cup R \cup J = N$.

Um arco (ou trecho) (i, j) , pode operar através de uma bomba ($(i, j) \in B$); por uma válvula ($(i, j) \in V$), que limita a pressão ou a vazão num ponto particular da rede; ou ser um arco que está sob pressão ($(i, j) \in SP$), o que indica que o escoamento através dele ocorre por conta da pressão existente na rede, mas sem a existência de bomba neste trecho. Cada arco da rede pode ser de apenas um tipo, ou seja, $B \cap SP = \emptyset$, $B \cap V = \emptyset$ e $SP \cap V = \emptyset$, em que $B \cup SP \cup V = A$. A vazão em um arco que possui bomba ocorre em apenas uma direção, ou seja, no arco que possui a bomba $(i, j) \in B$ a vazão segue do nó i ao nó j . Já em arcos que atuam através da pressão da rede ($(i, j) \in SP$) ou que possuem válvula ($(i, j) \in V$), o escoamento pode ser bidirecional a depender da cota topográfica do nós inicial e final do trecho e da pressão da rede no gera, ou do tipo de válvula instalada, respectivamente.

Foram considerados os seguintes conjuntos para a modelagem matemática:

N : conjunto de todos os nós;

$F \subseteq N$: conjunto dos nós que são fontes;

$R \subseteq N$: conjunto dos nós que são reservatórios;

$J \subseteq N$: conjunto dos nós que são junções;

$P(i) \subset N$: conjunto dos nós predecessores do nó i , ou seja, $P(i) = \{k, \text{ tal que } (k, i) \in A\}$, para $i \in J \cup R$;

$S(i) \subset N$: conjunto dos nós sucessores do nó i , ou seja, $S(i) = \{j, \text{ tal que } (i, j) \in A\}$, para $j \in J \cup R$;

A : conjunto de todos os arcos;

$B \subseteq A$: conjunto dos arcos que contém bombas;

$V \subseteq A$: conjunto dos arcos que contém válvulas;

$SP \subseteq A$: conjunto dos arcos que não contém bombas e nem válvulas, ou seja, operam sob as

condições de pressão da rede;

T : conjunto de todos os períodos do horizonte de planejamento.

Considerou-se que cada período de tempo $t \in T$ representa um intervalo semiaberto do tipo $[hora, hora + 1[$, assim como o EPANET considera cada período. Desse modo, o primeiro período do horizonte de planejamento representa o intervalo $[0, 1[$, que se inicia às 0 horas e finaliza às 0 horas, 59 minutos e 59 segundos. O segundo período representa o intervalo $[1, 2[$, e assim por diante.

Para o modelo matemático proposto tem-se a função objetivo descrita em (3.1). A primeira parcela minimiza custos relacionados ao funcionamento das bombas; a segunda, o número de acionamentos das bombas; e a terceira, a quantidade de períodos que as bombas permanecem ligadas. α_{ijt} foi introduzido na função objetivo pois, sem ele, como minimizamos o número de acionamentos das bombas, pode ocorrer desta ser acionada apenas uma vez e permanecer ligada por vários períodos seguidos funcionando com uma baixa vazão. Assim, ao minimizar α_{ijt} , estamos atribuindo um custo a cada período de funcionamento da bomba, ponderado através do λ , reduzindo o número de períodos que estas permanecem ligadas. Desse modo, a função objetivo minimiza os custos com energia elétrica relacionados ao funcionamento e ao acionamento das bombas hidráulicas, além do número de acionamentos e de períodos em que a bomba permanece ligada; reduzindo os gastos com energia elétrica e o desgaste das bombas, buscando melhorar sua eficiência.

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in B} (x_{ijt} \cdot c_{ijt} + l_{ijt} \cdot ca_{ijt} + \alpha_{ijt} \cdot \lambda) \quad (3.1)$$

Onde:

x_{ijt} : fração da vazão através do arco (i, j) no período t , $(i, j) \in A, t \in T$;

c_{ijt} : custo de manter ligada a bomba do arco (i, j) durante todo o período t (em unidades monetárias), $(i, j) \in B, t \in T$;

$l_{ijt} : \begin{cases} 1, & \text{se a bomba do arco } (i, j) \text{ é acionada no período } t, (i, j) \in B, t \in T; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

ca_{ijt} : custo de acionar a bomba do arco (i, j) durante o período t (em unidades monetárias), $(i, j) \in B, t \in T$;

$\alpha_{ijt} : \begin{cases} 1, & \text{se há fluxo no arco } (i, j) \text{ no período } t, (i, j) \in A, t \in T; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

λ : custo para o fluxo nos arcos.

A seguir são descritas as restrições que compõem o modelo matemático proposto.

As restrições (3.2) representam o balanceamento do volume de água em cada nó que possui reservatório, para cada período. Este é obtido através do estoque de água restante no nó no período anterior $(t - 1)$, adicionada a água que entra no nó e subtraída a água que sai do nó

no período t .

$$e_{it} = e_{i,t-1} + \sum_{k \in P(i)} (v_{ki} \cdot x_{kit}) - \sum_{j \in S(i)} (v_{ij} \cdot x_{ijt}), \quad i \in R, t \in T \quad (3.2)$$

Em que:

e_{it} : volume de água (estoque) no reservatório do nó i ao final do período t (em m^3), $i \in R$, $t \in T$;

v_{ij} : vazão máxima do arco (i, j) (em m^3/h), $(i, j) \in A$.

As restrições (3.3) representam o balanceamento de água em cada nó de junção, para cada um dos períodos. Tal restrição garante que, para os nós cuja demanda é diferente de zero, esta seja atendida; e, para os nós que não possuem demanda, o balanceamento resulte em zero. Tal balanceamento é realizado através da água que entra e da água que sai do nó durante o período t .

$$d_{it} = \sum_{k \in P(i)} (v_{ki} \cdot x_{kit}) - \sum_{j \in S(i)} (v_{ij} \cdot x_{ijt}), \quad i \in J, t \in T \quad (3.3)$$

Em que:

d_{it} : demanda do nó i no período t (em m^3), $i \in J$, $t \in T$.

As restrições (3.4) indicam que pode haver uma fração da vazão máxima permitida para o arco no período; ou seja, se $x_{ijt} = 0,5$ então a vazão através do arco (i, j) no período t é de 50% de sua vazão máxima v_{ij} . As restrições (3.5) indicam que, em arcos que não possuem bomba, o fluxo pode ser bidirecional.

$$0 \leq x_{ijt} \leq 1, \quad (i, j) \in A, t \in T \quad (3.4)$$

$$0 \leq x_{jit} \leq 1, \quad (j, i) \in V \cup SP, t \in T; \quad (3.5)$$

As restrições (3.6) garantem que se $x_{ijt} > 0$ então $\alpha_{ijt} = 1$, indicando os períodos onde há fluxo no arco.

$$x_{ijt} \leq \alpha_{ijt}, \quad (i, j) \in A, t \in T \quad (3.6)$$

Para julgar a qualidade da programação das bombas, alguns operadores levam em consideração não apenas o seu custo operacional, mas também o intervalo de comutação dessas (LANSEY; AWUMAH, 1994), o qual deve ser, preferencialmente, superior a 1h (GHADDAR et al., 2015), já que um intervalo de tempo pequeno leva ao aumento repentino da corrente de partida, danificando o ciclo de vida da bomba. Outra prática comum, apontada por Vieira et al.

(2020) e Chen et al. (2021), é limitar o número de vezes que uma bomba pode ser ligada/desligada em um determinado período de tempo, como, por exemplo, durante 24h.

Neste trabalho, a função objetivo tem como característica minimizar o custo relacionado ao acionamento das bombas. Desse modo, foram adicionadas ao modelo matemático proposto as restrições (3.7), baseadas em Toledo et al. (2008), que indicam quando a bomba é acionada.

$$l_{ijt} \geq \alpha_{ijt} - \alpha_{ij,t-1}, \quad (i, j) \in B, t \in T \quad (3.7)$$

Os volumes mínimos e máximos de água em cada nó que possui reservatório, em cada período, são definidos pelas restrições (3.8).

$$vol_i^{min} \leq e_{it} \leq vol_i^{max}, \quad i \in R, t \in T \quad (3.8)$$

Em que:

vol_i^{min} : volume mínimo permitido para o reservatório do nó i (em m^3), $i \in R$;

vol_i^{max} : volume máximo permitido para o reservatório do nó i (em m^3), $i \in R$.

O fluxo de todos os arcos são ajustados no início do horizonte de planejamento pelas restrições (3.9), e as restrições (3.10) definem o volume inicial dos nós que possuem reservatórios (e_{i0} , com $i \in R$).

$$x_{ij0} = x_{ij}^0, \quad (i, j) \in A \quad (3.9)$$

$$e_{i0} = vol_i^0, \quad i \in R \quad (3.10)$$

Em que:

x_{ij}^0 : estado inicial do arco (i, j) , $(i, j) \in A$;

vol_i^0 : volume inicial para o reservatório do nó i (em m^3), $i \in R$.

Por fim, as restrições (3.11) definem o domínio das variáveis.

$$x_{ijt} \in [0, 1], l_{ijt} \in \{0, 1\}, \alpha_{ijt} \in \{0, 1\}, e_{it} \geq 0, \quad (i, j) \in A, t \in T \quad (3.11)$$

3.2.1 Modelo matemático completo

A seguir, descrevemos o modelo matemático proposto completo, juntamente com os conjuntos e seus respectivos índices, parâmetros e variáveis utilizados em sua formulação. Tal modelo é uma aproximação linear para a operação das bombas hidráulicas nos sistemas de abastecimento de água.

Conjuntos:

N : conjunto de todos os nós;

$F \subseteq N$: conjunto dos nós que são fontes;

$R \subseteq N$: conjunto dos nós que são reservatórios;

$J \subseteq N$: conjunto dos nós que são junções;

$P(i) \subset N$: conjunto dos nós predecessores do nó i , ou seja, $P(i) = \{k, \text{ tal que } (k, i) \in A\}$, para $i \in J \cup R$;

$S(i) \subset N$: conjunto dos nós sucessores do nó i , ou seja, $S(i) = \{j, \text{ tal que } (i, j) \in A\}$, para $j \in J \cup R$;

A : conjunto de todos os arcos;

$B \subseteq A$: conjunto dos arcos que contém bombas;

$V \subseteq A$: conjunto dos arcos que contém válvulas;

$SP \subseteq A$: conjunto dos arcos que não contém bombas e nem válvulas, ou seja, operam sob as condições de pressão da rede;

T : conjunto de todos os períodos do horizonte de planejamento.

Parâmetros:

c_{ijt} : custo de manter ligada a bomba do arco (i, j) durante todo o período t (em unidades monetárias), $(i, j) \in B, t \in T$;

ca_{ijt} : custo de acionar a bomba do arco (i, j) durante o período t (em unidades monetárias), $(i, j) \in B, t \in T$;

λ : custo para o fluxo nos arcos;

d_{it} : demanda do nó i no período t (em m^3), $i \in J, t \in T$;

v_{ij} : vazão máxima do arco (i, j) (em m^3/h), $(i, j) \in A$;

vol_i^0 : volume inicial para o reservatório do nó i (em m^3), $i \in R$;

vol_i^{min} : volume mínimo permitido para o reservatório do nó i (em m^3), $i \in R$;

vol_i^{max} : volume máximo permitido para o reservatório do nó i (em m^3), $i \in R$;

x_{ij}^0 : estado inicial do arco (i, j) , $(i, j) \in A$.

Variáveis de decisão:

x_{ijt} : fração da vazão através do arco (i, j) no período t , $(i, j) \in A, t \in T$;

$$\alpha_{ijt} : \begin{cases} 1, & \text{se há fluxo no arco } (i, j) \text{ no período } t, (i, j) \in A, t \in T; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

e_{it} : volume de água (estoque) no reservatório do nó i ao final do período t (em m^3), $i \in R, t \in T$;

$$l_{ijt} : \begin{cases} 1, & \text{se a bomba do arco } (i, j) \text{ é acionada no período } t, (i, j) \in B, t \in T; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Assim, temos o modelo matemático proposto:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in B} (x_{ijt} \cdot c_{ijt} + l_{ijt} \cdot ca_{ijt} + \alpha_{ijt} \cdot \lambda) \quad (3.12)$$

Sujeito a:

$$e_{it} = e_{i,t-1} + \sum_{k \in P(i)} (v_{ki} \cdot x_{kit}) - \sum_{j \in S(i)} (v_{ij} \cdot x_{ijt}), \quad i \in R, t \in T; \quad (3.13)$$

$$d_{it} = \sum_{k \in P(i)} (v_{ki} \cdot x_{kit}) - \sum_{j \in S(i)} (v_{ij} \cdot x_{ijt}), \quad i \in J, t \in T; \quad (3.14)$$

$$0 \leq x_{ijt} \leq 1, \quad (i, j) \in A, t \in T; \quad (3.15)$$

$$0 \leq x_{jit} \leq 1, \quad (j, i) \in V \cup SP, t \in T; \quad (3.16)$$

$$x_{ijt} \leq \alpha_{ijt}, \quad (i, j) \in A, t \in T; \quad (3.17)$$

$$l_{ijt} \geq \alpha_{ijt} - \alpha_{ij,t-1}, \quad (i, j) \in B, t \in T; \quad (3.18)$$

$$vol_i^{min} \leq e_{it} \leq vol_i^{max}, \quad i \in R, t \in T; \quad (3.19)$$

$$x_{ij0} = x_{ij}^0, \quad (i, j) \in A; \quad (3.20)$$

$$e_{i0} = vol_i^0, \quad i \in R; \quad (3.21)$$

$$x_{ijt} \in [0, 1], l_{ijt} \in \{0, 1\}, \alpha_{ijt} \in \{0, 1\}, e_{it} \geq 0, \quad (i, j) \in A, t \in T. \quad (3.22)$$

3.3 Abordagem de solução

A solução do modelo matemático proposto fornece a programação da operação das bombas hidráulicas do sistema de abastecimento de água de modo a minimizar os custos com energia elétrica, atendendo as restrições descritas. Tais restrições não levam em consideração características dos sistemas de abastecimento relacionadas a tubulação, a pressão da água, a

cota topográfica dos nós, entre outras; pois estas resultariam em um modelo de programação não linear de difícil resolução, geralmente computacionalmente caro. A abordagem de solução proposta neste trabalho utiliza o modelo de programação linear inteiro misto proposto e garante o atendimento das características hidráulicas do sistema através do uso do *software* EPANET (ROSSMAN et al., 2009). Assim, a solução para o liga/desliga das bombas obtida através do modelo matemático é simulada no EPANET, de modo a validar tal solução.

Algumas das restrições hidráulicas inclusas no escopo do EPANET são descritas a seguir (ROSSMAN et al., 2009):

- Conservação da energia (Equação de Bernoulli): o *software* aplica a equação de energia ao longo de cada trecho de tubulação, considerando a perda de carga devido ao atrito e outros fatores, assegurando que as diferenças de pressão entre nós sejam consistentes com as resistências hidráulicas (perda de carga);
- Lei de Darcy-Weisbach ou Fórmulas de Perda de Carga empíricas: o EPANET usa uma destas equações para calcular a perda de carga em função da vazão, do diâmetro e do comprimento da tubulação, além da rugosidade;
- Níveis de pressão: impõe restrições sobre os níveis de pressão mínima e máxima em nós de demanda, como a pressão deve ser suficiente para atender às necessidades dos consumidores sem causar danos à rede ou interromper o abastecimento.

Devido ao modelo proposto não possuir as restrições hidráulicas descritas anteriormente, a simulação de sua solução realizada pelo EPANET pode retornar mensagens de advertência indicando a existência de pressões negativas em nós com demanda não nula. Com isto, foi elaborada a Heurística de Correção de Pressões Negativas (HCPN), baseada em Vieira et al. (2020) e que utiliza conceitos de Mecânica dos Fluidos (WHITE, 2018) em sua formulação. Ao final, obtém-se uma solução cujas pressões são regulares ou o indicativo de que não é possível obter uma solução cujas pressões são regulares.

Também é através do simulador hidráulico EPANET que obtemos o custo diário da operação do sistema, obtido após a validação da operação das bombas. Desse modo tem-se o custo real para o sistema, pois o simulador considera todas as características físicas da rede de abastecimento, diferentemente do custo calculado através da função objetivo do modelo matemático. Assim obtemos uma abordagem que une o modelo matemático linear inteiro misto e o *software* de simulação hidráulica, aplicável em redes de abastecimento reais, gerando soluções validadas.

A abordagem de solução proposta é descrita no Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Abordagem de solução proposta

```

input : Dados da rede de abastecimento de água
output : Solução com pressões regulares, ou não é possível obter uma solução cujas pressões são regulares

1 Resolver o modelo matemático
2 Simular no EPANET
3 if Solução com pressões regulares then
4   | if Volumes finais dos reservatórios próximos aos iniciais then
5   |   | Fim
6   | end
7   | else
8   |   | Heurística de Correção de Volumes Finais (HCVF) (Algoritmo 3)
9   | end
10 end
11 else
12   | if Solução com pressões negativas then
13   |   | Heurística de Correção de Pressões Negativas (HCPN) (Algoritmo 2)
14   |   | if Volumes finais dos reservatórios próximos aos iniciais then
15   |   |   | Fim
16   |   | end
17   |   | else
18   |   |   | Heurística de Correção de Volumes Finais (HCVF) (Algoritmo 3)
19   |   | end
20   | end
21 end

```

3.3.1 Heurística de Correção de Pressões Negativas (HCPN)

O pseudo-código da HCPN é descrito no Algoritmo 2. Neste, considere:

$NP \in J$: conjunto dos nós i_n com pressão negativa no período t ;

γ : um número natural que se refere ao incremento do período;

$BP_n \subset B$: conjunto dos arcos (i_0, j_0) que contém a(s) bomba(s) de distribuição ou de transferência mais próxima(s) do nó $i_n \in NP$;

$r_0 \in R$: nó r_0 que possui o reservatório mais próximos do nó $i_n \in NP$;

$BC_n \subset B$: conjunto dos arcos (i_f, j_f) que contém a(s) bomba(s) de captação mais próxima(s) do(s) nó(s) que possui fonte $i \in F$;

B_{order} : conjunto dos arcos (i, j) ordenados que contém bombas de acordo com o arquivo de dados da rede.

Algoritmo 2: Heurística de Correção de Pressões Negativas (HCPN)

```

input : Solução com pressões negativas
output : Solução com pressões regulares, ou não é possível obter uma solução cujas pressões são regulares

1 for  $i_n \in NP$  do
2    $\gamma = 1$ 
3   for  $(i_0, j_0) \in BP_n$  do
4     if  $x_{i_0, j_0, t} = 0$  e  $e_{r_0, t} < vol_{r_0}^{max}$  then
5        $x_{i_0, j_0, t} = 1$ 
6     end
7     else
8       if  $x_{i_0, j_0, t-\gamma} = 0$ ,  $x_{i_0, j_0, t} > 0$  e  $e_{r_0, t} < vol_{r_0}^{max}$  then
9         Para  $t \in [t - \gamma, t]$ ,  $x_{i_0, j_0, t} = 1$ 
10        end
11      end
12    end
13    Simular no EPANET
14    if Solução com pressões regulares then
15      Fim
16    end
17    else
18      for  $(i_f, j_f) \in BC_n$  do
19        if  $x_{i_f, j_f, t} = 0$  then
20           $x_{i_f, j_f, t} = 1$ 
21        end
22        else
23          if  $x_{i_f, j_f, t-\gamma} = 0$  e  $x_{i_f, j_f, t} > 0$  then
24            Para  $t \in [t - \gamma, t]$ ,  $x_{i_f, j_f, t} = 1$ 
25          end
26        end
27      end
28    end
29    Simular no EPANET
30    if Solução com pressões regulares then
31      Fim
32    end
33    else
34      for  $(i, j) \in B_{order}$  do
35        if  $x_{i, j, t} = 0$  then
36           $x_{i, j, t} = 1$ 
37        end
38        else
39          if  $x_{i, j, t-\gamma} = 0$  e  $x_{i, j, t} > 0$  then
40            Para  $t \in [t - \gamma, t]$ ,  $x_{i, j, t} = 1$ 
41          end
42        end
43      end
44    end
45    Simular no EPANET
46    if Solução com pressões regulares then
47      Fim
48    end
49    else
50      if Não há bomba para atender aos critérios descritos e  $\gamma < T - 1$  then
51         $\gamma \leftarrow \gamma + 1$ 
52      end
53    end
54    if as bombas estão operando durante todo o horizonte de planejamento then
55      Não é possível obter uma solução cujas pressões são regulares
56    end
57 end

```

Inicialmente, a HCPN busca a bomba de distribuição (ou de transferência) do arco $(i_0, j_0) \in BP_n$ mais próxima responsável por enviar água para o nó $i_n \in NP$ com pressão negativa no período t (linha 3). Caso exista mais de uma bomba (i_0, j_0) a uma mesma distância do nó i_n , escolhe-se aquela com o menor custo de funcionamento durante o período t . Se ainda existir mais de uma bomba (i_0, j_0) , escolhe-se aquela com o menor número de acionamentos durante o horizonte de planejamento. Se ainda assim existir mais de uma bomba (i_0, j_0) , escolhe-se de acordo com a ordem descrita no arquivo de dados da rede.

Para a bomba (i_0, j_0) escolhida, se esta não está ligada no período em que ocorre a pressão negativa ($x_{i_0, j_0, t} = 0$), aciona-se tal bomba no início do período t , mantendo-a ligada até o final deste, desde que o reservatório mais próximo do nó i_n não tenha atingido seu volume máximo no período t ($e_{r_0, t} < vol_{r_0}^{max}$) (linhas 4 e 5).

Se a bomba está ligada no período em que ocorre a pressão negativa ($x_{i_0, j_0, t} > 0$) mas está desligada no período anterior ($x_{i_0, j_0, t-1} = 0$), adiantamos seu acionamento para o período $t - 1$, mantendo-a ligada até o final do período t , desde que o reservatório mais próximo do nó i_n não tenha atingido seu volume máximo no período t ($e_{r_0, t} < vol_{r_0}^{max}$) (linhas 8 e 9). Tal escolha é realizada para não aumentar o número de acionamentos das bombas, utilizando uma que já estava em operação, de modo a minimizar o gastos com energia elétrica e o desgaste de tal bomba.

Em ambos os casos, se o reservatório mais próximo do nó i_n tenha atingido seu volume máximo no período t , então esta bomba não atende aos critérios descritos, indicando que a heurística deve prosseguir para o próximo conjunto de bombas.

Se a bomba do arco (i_0, j_0) mais próxima responsável por enviar água para o nó i_n está em funcionamento em $t - 1$ e t , e ainda houver a ocorrência de pressão negativa no nó i_n em t , significa que tal bomba não pode atender aos critérios descritos; ou seja, esta não consegue gerar energia suficiente para que não haja a ocorrência de pressões irregulares no período determinado.

A mecânica dos fluídos é o estudo dos fluídos em movimento ou repouso (WHITE, 2018), em que, dentre suas inúmeras aplicações, estão os sistemas de abastecimento de água. Dentro dos sistemas de abastecimento de água podemos considerar que ocorre um balanceamento de massa, onde toda a água captada dos nós que possuem fontes escoam de acordo com a rede, e é consumida nos nós que são junções e que possuem demanda não nula. Assim, ao faltar pressão num determinado nó de junção com demanda não nula, tem-se o indicativo de que falta energia para movimentar a água na rede, que pode ser compensada através do funcionamento das bombas de captação.

Assim, a HPCN busca a bomba de captação do arco $(i_f, j_f) \in BC_n$ mais próxima do nó que possui fonte $i \in F$ (linha 18). Caso exista mais de uma bomba (i_f, j_f) a uma mesma distância do nó $i \in F$, escolhe-se aquela com o menor custo de funcionamento durante o período t . Se ainda existir mais de uma bomba (i_f, j_f) , escolhe-se aquela com o menor número de

acionamentos durante o horizonte de planejamento. Se ainda assim existir mais de uma bomba (i_f, j_f) , escolhe-se de acordo com a ordem descrita no arquivo de dados da rede.

Para a bomba (i_f, j_f) escolhida, se esta não está ligada no período em que ocorre a pressão negativa ($x_{i_f, j_f, t} = 0$), aciona-se tal bomba no início do período t , mantendo-a ligada até o final deste (linhas 19 e 20). Se a bomba está ligada no período em que ocorre a pressão negativa ($x_{i_f, j_f, t} > 0$) mas está desligada no período anterior ($x_{i_f, j_f, t-1} = 0$), adiantamos seu acionamento para o período $t - 1$, mantendo-a ligada até o final do período t (linhas 23 e 24). Nestes casos não é preciso se preocupar com o volume dos reservatórios, pois com o aumento da captação, a rede conseguem realizar uma melhor distribuição de sua água, sem ultrapassar o volume máximo dos reservatórios.

Caso não exista bomba que atenda aos critérios, a HCPN busca a bomba do arco $(i, j) \in B_{order}$, ou seja, de acordo com a ordem das bombas descritas no arquivo de dados (linha 34). Se a bomba não está ligada no período em que ocorre a pressão negativa ($x_{i, j, t} = 0$), aciona-se tal bomba no início do período t , mantendo-a ligada até o final deste (linhas 35 e 36). Se a bomba está ligada no período em que ocorre a pressão negativa ($x_{i, j, t} > 0$) mas está desligada no período anterior ($x_{i, j, t-1} = 0$), adiantamos seu acionamento para o período $t - 1$, mantendo-a ligada até o final do período t (linhas 39 e 40). Tal procedimento é adotado pois, de acordo com [Rossman et al. \(2009\)](#), a pressão negativa indicada pelo EPANET no nó i_n pode ser ocasionada pela falta de pressão em trechos intermediários na rede; ou seja, falta pressão na rede para enviar água do nó que possui fonte ($i \in F$) para o nó que possui demanda positiva. Isto ocorre em redes cujos pontos de captação estão distantes dos pontos de demanda. Assim, bombas de transferência também podem ser acionadas, ajudando no fluxo da rede.

Caso não exista bomba que atenda aos critérios, aumentamos em 1 o valor de γ , iniciado em 1, ou seja, $\gamma \leftarrow \gamma + 1$, de modo a reiniciar o processo da HCPN adiantando em um o período para o acionamento das bombas (linhas 50 e 51).

O procedimento é repetido até a HCPN retornar numa solução para o liga/desliga das bombas hidráulicas do sistema de abastecimento de água cujas pressões são regulares validada pelo EPANET; ou indicar que não é possível obter uma solução quando todas as bombas estão em funcionamento durante todo o período de planejamento. Este último pode ocorrer quando a capacidade de captação do sistema é menor do que a demanda total em um determinado período.

3.3.2 Heurística de Correção de Volumes Finais (HCVF)

De modo a facilitar a operação de um novo horizonte de planejamento, é proposta a Heurística de Correção de Volumes Finais (HCVF), baseada na HCPN, que faz com que o volume do reservatório no último período com horizonte de planejamento ($e_{i, t_{final}}$) possua um estoque maior ou igual a uma porcentagem (Δ) do seu volume inicial (vol_i^0). Além disso, a HCVF pode ser utilizada de modo a garantir um determinado volume de água nos reservatórios

para um próximo horizonte de planejamento, minimizando os riscos de desabastecimento da rede caso ocorram intercorrências, como falhas nas bombas de captação ou incêndios.

O pseudo-código da HCVF é descrito no Algoritmo 3. Neste, considere:

$t_{final} \in T$: último período do horizonte de planejamento;

β : um número natural que se refere ao incremento do período;

$RF \in R$: conjunto dos reservatórios i com o volume no último período ($e_{i,t_{final}}$) menor que uma porcentagem (Δ) de seu volume inicial (vol_i^0), ou seja, $e_{i,t_{final}} < \Delta \cdot vol_i^0$;

Δ : porcentagem em relação ao volume inicial do reservatório i (vol_i^0);

$BR_r \subset B$: conjunto dos arcos (i_r, j_r) que contém a(s) bomba(s) de distribuição ou de transferência mais próxima(s) do nó que possui reservatório $i \in R$;

$BC_r \subset B$: conjunto dos arcos (i_f, j_f) que contém a(s) bomba(s) de captação mais próxima(s) do(s) nó(s) que possui fonte $i \in F$;

B_{order} : conjunto dos arcos (i, j) que contém bombas ordenados de acordo com o arquivo de dados da rede.

Algoritmo 3: Heurística de Correção de Volumes Finais (HCVF)

```

input : Solução com  $e_{i,t_{final}} < \Delta \cdot vol_i^0$ 
output : Solução com  $e_{i,t_{final}} \geq \Delta \cdot vol_i^0$ , ou não é possível obter uma solução cujos volumes finais dos
          reservatórios estão próximos aos seus volumes iniciais

1 for  $i \in RF$  do
2    $\beta = 1$ 
3   for  $(i_r, j_r) \in BR_r$  do
4     if  $x_{i_r, j_r, t_{final}} = 0$  then
5        $x_{i_r, j_r, t_{final}} = 1$ 
6     end
7     else
8       if  $x_{i_r, j_r, t_{final} - \beta} = 0$  e  $x_{i_r, j_r, t_{final}} > 0$  then
9         Para  $t \in [t_{final} - \beta, t_{final}]$ ,  $x_{i_r, j_r, t} = 1$ 
10        end
11      end
12    end
13    Simular no EPANET
14    if  $e_{i,t_{final}} \geq \Delta \cdot vol_i^0$  then
15      Fim
16    end
17    else
18      for  $(i_f, j_f) \in BC_r$  do
19        if  $x_{i_f, j_f, t_{final}} = 0$  then
20           $x_{i_f, j_f, t_{final}} = 1$ 
21        end
22        else
23          if  $x_{i_f, j_f, t_{final} - \beta} = 0$  e  $x_{i_f, j_f, t_{final}} > 0$  then
24            Para  $t \in [t_{final} - \beta, t_{final}]$ ,  $x_{i_f, j_f, t} = 1$ 
25            end
26          end
27        end
28      end
29      Simular no EPANET
30      if  $e_{i,t_{final}} \geq \Delta \cdot vol_i^0$  then
31        Fim
32      end
33      else
34        for  $(i, j) \in B_{order}$  do
35          if  $x_{i, j, t_{final}} = 0$  then
36             $x_{i, j, t_{final}} = 1$ 
37          end
38          else
39            if  $x_{i, j, t_{final} - 1} = 0$  e  $x_{i, j, t_{final}} > 0$  then
40              Para  $t \in [t_{final} - \beta, t_{final}]$ ,  $x_{i, j, t} = 1$ 
41              end
42            end
43          end
44        end
45        Simular no EPANET
46        if  $e_{i,t_{final}} \geq \Delta \cdot vol_i^0$  then
47          Fim
48        end
49        else
50          if Não há bomba para atender aos critérios descritos e  $\beta < T - 1$  then
51             $\beta \leftarrow \beta + 1$ 
52          end
53        end
54        if As bombas estão operando durante todo o horizonte de planejamento then
55          Não é possível obter uma solução cujos volumes finais dos reservatórios estão próximos aos seus volumes
          iniciais
56        end
57 end

```

Inicialmente, a HCVF busca a bomba de distribuição (ou de transferência) do arco $(i_r, j_r) \in BR_r$ mais próxima responsável por enviar água para o nó $i \in RF$ cujo volume final está abaixo de uma porcentagem de seu volume inicial, ou seja, $e_{i,t_{final}} < \Delta \cdot vol_i^0$ (linha 3). Caso exista mais de uma bomba (i_r, j_r) a uma mesma distância do nó $i \in RF$, escolhe-se aquela com o menor custo de funcionamento durante o período t . Se ainda existir mais de uma bomba (i_r, j_r) , escolhe-se aquela com o menor número de acionamentos durante o horizonte de planejamento. Se ainda assim existir mais de uma bomba (i_r, j_r) , escolhe-se de acordo com a ordem descrita no arquivo de dados da rede.

Para a bomba (i_r, j_r) escolhida, se esta não está ligada no período t_{final} ($x_{i_r, j_r, t_{final}} = 0$), aciona-se tal bomba no início do período t , mantendo-a ligada até o final deste (linhas 4 e 5). Se a bomba está ligada no período t_{final} ($x_{i_r, j_r, t_{final}} > 0$) mas está desligada no período anterior ($x_{i_r, j_r, t_{final}-1} = 0$), adiantamos seu acionamento para o período $t - 1$, mantendo-a ligada até o final do período t_{final} (linhas 8 e 9). Tal escolha é realizada para não aumentar o número de acionamentos das bombas, utilizando uma que já estava em operação, de modo a minimizar os gastos com energia elétrica e o desgaste de tal bomba.

Se a bomba do arco (i_r, j_r) mais próxima responsável por enviar água para o nó i_r esta em funcionamento em $t_{final-1}$ e t_{final} , e ainda houver a ocorrência de $e_{i,t_{final}} < \Delta \cdot vol_i^0$, significa que tal bomba não pode atender aos critérios descritos; ; ou seja, esta não consegue gerar energia suficiente para que não haja a ocorrência de pressões irregulares no período determinado.

Assim como na HCPN, para a HCVF utiliza-se conceitos referentes a mecânica dos fluidos, em que o baixo volume de água em um reservatório pode indicar que não há água suficiente na rede de forma que o sistema consiga estocar água (WHITE, 2018). Com isso, a HCVF busca a bomba de captação do arco $(i_f, j_f) \in BC_r$ mais próxima do nó que possui fonte $i \in F$ (linha 18). Caso exista mais de uma bomba (i_f, j_f) a uma mesma distância do nó $i \in F$, escolhe-se aquela com o menor custo de funcionamento durante o período t . Se ainda existir mais de uma bomba (i_f, j_f) , escolhe-se aquela com o menor número de acionamentos durante o horizonte de planejamento. Se ainda assim existir mais de uma bomba (i_f, j_f) , escolhe-se de acordo com a ordem descrita no arquivo de dados da rede.

Para a bomba (i_f, j_f) escolhida, se esta não está ligada no período t_{final} ($x_{i_f, j_f, t_{final}} = 0$), aciona-se tal bomba no início do período t_{final} , mantendo-a ligada até o final deste (linhas 19 e 20). Se a bomba está ligada no período t_{final} ($x_{i_f, j_f, t_{final}} > 0$) mas está desligada no período anterior ($x_{i_f, j_f, t_{final}-1} = 0$), adiantamos seu acionamento para o período $t_{final}-1$, mantendo-a ligada até o final do período t_{final} (linhas 23 e 24). Nestes casos não é preciso se preocupar com o estoque dos reservatórios que atingiram o volume $\Delta \cdot vol_i^0$, pois o EPANET realiza a distribuição de sua água respeitando o volume máximo dos reservatórios (ROSSMAN et al., 2009).

Caso não exista bomba de captação que atenda aos critérios, a HCVF busca a bomba do arco $(i, j) \in B_{order}$, ou seja, de acordo com a ordem das bombas descritas no arquivo de dados

(linha 34). Se a bomba não está ligada no período t_{final} ($x_{i,j,t_{final}} = 0$), aciona-se tal bomba no início do período t , mantendo-a ligada até o final deste (linhas 35 e 36). Se a bomba está ligada no período T_{final} ($x_{i,j,t_{final}} > 0$) mas está desligada no período anterior ($x_{i,j,t_{final-1}} = 0$), adiantamos seu acionamento para o período $t_{final-1}$, mantendo-a ligada até o final do período T_{final} (linhas 39 e 40). Tal procedimento é adotado pois, assim, bombas de transferência também podem ser acionadas, ajudando no fluxo da rede.

Caso não exista bomba que atenda aos critérios, aumentamos em 1 o valor de β , iniciado em 1, ou seja, $\beta \leftarrow \beta + 1$, de modo a reiniciar o processo da HCVF adiantando em um o período para o acionamento das bombas (linhas 50 e 51).

O procedimento é repetido até a HCVF retornar uma solução para o liga/desliga das bombas hidráulicas do sistema de abastecimento de água cujos volumes finais dos reservatórios estão próximos aos seus volumes iniciais validada pelo EPANET; ou indicar que não é possível obter uma solução quando todas as bombas estão em funcionamento durante todo o período de planejamento. Este último pode ocorrer quando a capacidade de captação do sistema é menor do que a o volume que deve ser estocado menos a demanda a ser atendida, de modo que não ocorram pressões irregulares no sistema.

Trabalhos da literatura utilizam restrições nos modelos matemáticos para garantir que os volumes finais dos reservatórios estejam próximos aos seus volumes iniciais (PARRAS, 2020; SANTOS et al., 2022; MIQUELIN et al., 2023); porém, tais trabalhos não fazem uso do simulador hidráulico, e, com isso, não há a garantia de que suas soluções estão em concordância com a simulação hidráulica. Sendo assim, este trabalho optou pelo uso da HCVF ao invés da restrição adicionada ao modelo matemático pois, como o modelo é uma aproximação da operação do sistema de abastecimento, seu resultado para o volume dos reservatórios também é uma aproximação do resultado real obtido através do EPANET. Como a HCVF realiza apenas alterações na operação das bombas durante a simulação no EPANET, tem-se a garantia de que os volumes finais obtidos pelos reservatórios são seus volumes reais.

O capítulo seguinte apresenta os testes numéricos realizados com o modelo matemático e com a abordagem de solução propostos.

4 TESTES NUMÉRICOS

A abordagem de solução proposta foi implementada utilizando a linguagem de programação Python, versão 3.9.7. O modelo matemático foi resolvido através do pacote de otimização Gurobi, versão 9.5.1 (GUROBI, 2022); e para a realização das simulações hidráulicas foi utilizada a biblioteca *Water Network Tool for Resilience* (WNTR) (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018), que contém o simulador do *software* EPANET. A escolha da WNTR se justifica por este possuir, dentre seus recursos, a simulação hidráulica da rede e a modificação da operação, que inclui a configuração de controles condicionais e baseados em tempo, utilizados neste trabalho. Além disso, a WNTR é compatível com pacotes de computação científica amplamente utilizados no Python, como NumPy (WALT; COLBERT; VAROQUAUX, 2011) e pandas (MCKINNEY, 2012), utilizados neste trabalho. Todos os testes foram realizados em um computador com processador Intel Core i7, 7ª geração, com 16 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 Home.

Os testes foram realizadas com quatro redes disponíveis na literatura: a Mini Rede de VanZyl (ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004), a Rede de Florianópolis (VIEIRA et al., 2020), e as Redes Richmond Esqueleto e Richmond (ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004). Nestas, a vazão em um arco que possui bomba ocorre em apenas uma direção; em arcos que atuam sob pressão do sistema o escoamento pode ser bidirecional a depender da cota topográfica do nós; e as válvulas são de retenção, cujo objetivo é prevenir a inversão da vazão, fazendo, assim, que o escoamento ocorra em apenas uma direção no trecho de sua instalação (ROSSMAN et al., 2009).

Nos testes realizados, o cálculo para obter a vazão máxima para arcos que possuem bomba ($v_{ij} \in B$) foi feita através da vazão da bomba em relação ao seu rendimento, utilizando o rendimento global da rede, indicado no arquivo de dados. Assim, se o rendimento global for de 85%, a vazão máxima considerada para as bombas será aquela atingida quando sua curva de rendimento está em 85%. Desse modo, obtém-se uma vazão média através do arquivo de dados da rede.

Para os arcos que não possuem bomba ($v_{ij} \in V \cup SP$), o cálculo da vazão é dado pelo produto entre a área da seção transversal desse tubo e a velocidade de escoamento da água nele (NETTO; FERNÁNDEZ, 1998). A tubulação dos sistemas de abastecimento de água são, em sua totalidade, de formato cilíndrico, com isso utilizamos as equações (4.1), que relacionam a vazão e a velocidade de escoamento da água no arco para cada período, com a área da seção transversal descrito em Perras (2020). Como o diâmetro dm_{ij} é dado em metros (m) e a velocidade máxima de escoamento vel^{max} em metros por segundo (m/s), multiplicamos por 3600 para que a unidade da vazão resulte em m^3/h . De acordo com Netto e Fernández (1998), a velocidade máxima de

escoamento, no Brasil, deve permanecer abaixo de $3m/s$.

$$v_{ij} = 3600 \cdot \frac{\pi \cdot dm_{ij}^2}{4} \cdot vel^{max}, \quad (i, j) \in V \cup SP; \quad (4.1)$$

Os reservatórios das redes utilizadas nos testes possuem formato cilíndrico (ROSSMAN et al., 2009). Com isso, para o cálculo dos volumes iniciais e máximos em um nó i que possui reservatório ($i \in R$) foi utilizada a equação (4.2), que indica o volume de um cilindro V_i , em metros cúbicos (m^3), em que r_i é o raio do reservatório e h_i a altura inicial/máxima da água dentro do reservatório i , ambos em metros (m). O volume mínimo de cada reservatório foi considerado como sendo 25% do seu volume máximo, correspondente a parcela emergencial, responsável por atender a população em caso de incêndios, acidentes, interrupções na captação, entre outros (NETTO; FERNÁNDEZ, 1998).

$$V_i = \pi \cdot r_i^2 \cdot h_i, \quad i \in R; \quad (4.2)$$

É importante ressaltar que os arquivos de dados das redes de abastecimento podem possuir unidades de medida diferentes. Assim, quando necessário, foram realizadas as conversões para os testes numéricos.

Em todos os testes foi considerado um horizonte de planejamento de um dia (24 horas) divididos em 24 períodos de uma hora cada, em que cada período é definido pelo intervalo $[t, t + 1]$, ou seja, por exemplo, o intervalo $[0, 1[$ se inicia às 0 horas e finaliza às 0 horas, 59 minutos e 59 segundos. Cada sistema de abastecimento utilizado nos testes possui períodos de ponta específicos, onde a energia é mais cara, de acordo com os moldes de cobrança tarifária utilizados na sua elaboração.

O fator de ajuste λ foi considerado como 1 em todos os testes.

É importante ressaltar que os arquivos de dados das redes de abastecimento vem, comumente, com controles e regras padrões associados ao funcionamento das bombas hidráulicas. Assim, tais comandos foram deletados, de modo a utilizar o liga/desliga das bombas de acordo com a solução resultante do modelo matemático proposto.

No EPANET, o número máximo de iterações é um parâmetro importante que influencia o processo de cálculo e a convergência da solução do modelo hidráulico. Alguns pontos que podem ser afetados pela sua alteração são (ROSSMAN et al., 2009):

- A convergência da solução, já que se o número de iterações for muito baixo o algoritmo pode não ter tempo suficiente para convergir, resultando em uma solução não confiável ou em erros de convergência;
- A precisão dos resultados, em que um número maior de iterações permite que o algoritmo faça ajustes mais refinados, melhorando a precisão dos resultados; porém, após um certo

ponto, aumentos adicionais no número máximo de iterações podem não trazer melhorias significativas na precisão, especialmente se a rede já estiver bem condicionada e a solução convergir rapidamente;

- O tempo de simulação, já que mais iterações aumentam o tempo necessário para completar a simulação;
- A estabilidade da simulação, em que redes mal condicionadas ou com configurações extremas (por exemplo, altas demandas, pressões muito baixas ou muito altas) podem precisar de mais iterações para alcançar a convergência.

Neste trabalho todos os testes foram realizados utilizando o número máximo de iterações permitidas para o EPANET de acordo com o arquivo de dados de cada rede utilizada nos testes.

Para os testes, as restrições (3.3), referentes ao balanço de água nos nós de junção, foram relaxadas de modo a permitir o excesso (ϵ_{it}^+) ou a falta de água (ϵ_{it}^-) no nó de junção $i \in J$ a cada período t ; resultando nas restrições (4.3). Com isso, foram adicionadas as restrições (4.4) e (4.5) ao modelo. Tal mudança foi necessária pois, especialmente em grandes redes, vários nós de junção não possuem demanda, ou seja, a demanda é zero, dificultando a resolução do modelo matemático.

$$d_{it} + \epsilon_{it}^+ - \epsilon_{it}^- = \sum_{k \in P(i)} (v_{ki} \cdot x_{kit}) - \sum_{j \in S(i)} (v_{ij} \cdot x_{ijt}), \quad i \in J, t \in T; \quad (4.3)$$

$$\epsilon_{it}^+ \geq 0, \quad i \in J, t \in T; \quad (4.4)$$

$$\epsilon_{it}^- \geq 0, \quad i \in J, t \in T; \quad (4.5)$$

Para minimizar a diferença entre a demanda real e a demanda relaxada, tal relaxamento é adicionado a função objetivo através de uma penalidade p , resultando na função objetivo (4.6). Em todos os testes o valor de p foi utilizado como sendo 10% da maior tarifa associada ao funcionamento de uma bomba durante o período de ponta (c_{ijt}); ou seja, por exemplo, para uma rede em que as tarifas para os períodos de ponta são de 0,23, 0,33, 0,35 e 0,97; então $p = 0,1 \cdot 0,97$.

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in B} (x_{ijt} \cdot c_{ijt} + l_{ijt} \cdot ca_{ijt} + \alpha_{ijt} \cdot \lambda) + \sum_{t \in T} \sum_{i \in J} (\epsilon_{it}^+ \cdot p + \epsilon_{it}^- \cdot p) \quad (4.6)$$

Tal relaxação é realizada apenas no modelo matemático e não altera os resultados finais, obtidos através da abordagem de solução, pois, como dito anteriormente, uma das garantias oferecidas pela simulação no *software* EPANET é a conservação da massa, em que a soma das

vazões que entram e saem em qualquer nó de junção que não possui demanda é igual a zero (ROSSMAN et al., 2009). Assim, a alteração realizada no modelo matemático não altera os valores de demanda da simulação hidráulica. Tem-se também que tal relaxação não altera a solução para o custo com energia elétrica da rede, já que este é obtido através do EPANET.

Além disto, este trabalho contribui com a disponibilização dos dados das redes e de suas variações em Miquelin (2024), de forma a facilitar futuros trabalhos que possam ser desenvolvidos; pois foram constatadas diferenças nos dados entre as mesmas redes de acordo com a literatura, em que os testes demonstram que pequenas alterações nos dados iniciais geram diferentes soluções.

Os resultados dos testes numéricos são apresentados a seguir.

4.1 Mini rede de VanZyl

A Mini rede de VanZyl é um sistema abastecimento fictício desenvolvido por Zyl, Savic e Walters (2004) amplamente utilizada na literatura. Essa rede é composta por 16 nós, sendo 1 fonte, 2 reservatórios e 13 junções; e 18 trechos, nos quais 3 possuem uma bomba cada e 15 operam por gravidade, onde um possui uma válvula de retenção, conforme a Figura 4.1. O arquivo de dados utilizado para a rede foi extraído da página do Professor Doutor Manuel López-Ibáñez da Universidade de Manchester, Inglaterra (LÓPEZ-IBÁÑEZ, 2015).

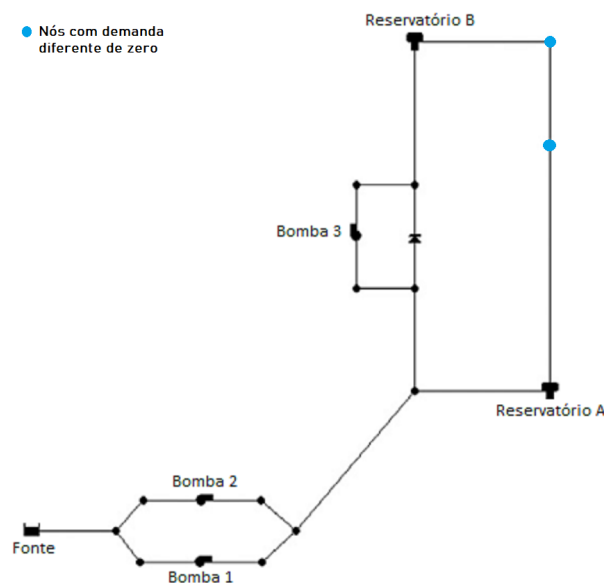


Figura 4.1 – Mini rede de VanZyl (Fonte: baseado em Zyl, Savic e Walters (2004)).

Nesta rede tem-se 24h de simulação iniciando às 7h da manhã e finalizando às 7h da manhã do dia seguinte. Os períodos de ponta, em que a energia elétrica é mais cara, estão compreendidos entre às 7h e às 24h; e os períodos fora de ponta, compreendidos entre às 0h e às 7h, cujas tarifas estão descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tarifas de energia a cada hora para cada bomba - Mini rede de VanZyl.

Bomba	Tarifa nos períodos de ponta	Tarifa nos períodos fora de ponta
1, 2 e 3	0,1194	0,0244

O rendimento de bombeamento global da rede é de 85%. Com isso, tem-se as vazões máximas por hora para os arcos que possuem bombas utilizadas no modelo matemático descritas na Tabela 4.2. Para os demais arcos, $(i, j) \in V \cup G$, a vazão máxima possui uma variação de $339,2920 \text{ m}^3/\text{h}$ à $8482,3002 \text{ m}^3/\text{h}$, de acordo com seu diâmetro.

Tabela 4.2 – Vazão máxima de cada bomba por período - Mini rede de VanZyl.

Bomba	Vazão máxima (em m^3/h)
1 e 2	510
3	253

Os volumes iniciais, mínimos e máximos para cada um dos reservatórios são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Volumes inicial, mínimo e máximo dos reservatórios - Mini rede de VanZyl.

Reservatório	Volume inicial (em m^3)	Volume mínimo (em m^3)	Volume máximo (em m^3)
A	441,78	122,71	490,87
B	298,453	78,53	314,15

O padrão de consumo é um fator que multiplica a demanda base dos nós que são junções, obtendo-se, assim, a demanda em cada período t para cada nó $i \in J$. A Figura 4.2 apresenta o fator de consumo da Mini rede de VanZyl, das 0h às 24h, onde é possível observar dois picos de consumo, ambos no horário de ponta, sendo o maior às 7h, quando este se inicia.

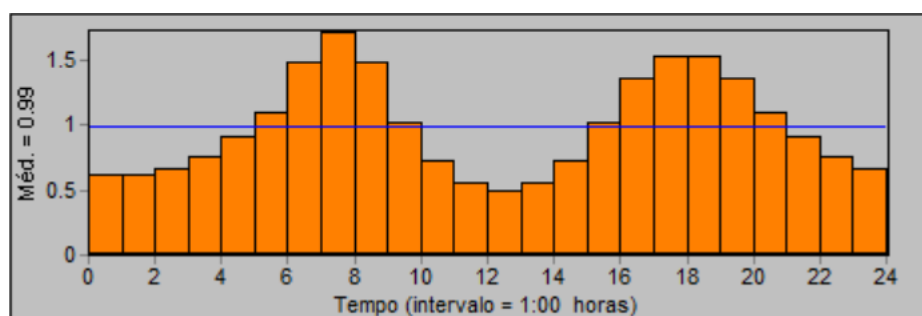


Figura 4.2 – Padrão de consumo - Mini rede de VanZyl.

O número máximo de iterações do arquivo com extensão .inp para o EPANET da Mini rede de VanZyl é de 40 iterações.

Nos testes realizados com a Mini rede de VanZyl, o custo energético diário retornado pelo EPANET foi de \$330,27. A solução obtida pelo modelo matemático retornou uma simulação bem

sucedida pelo EPANET, ou seja, não houve a ocorrência de pressões irregulares. Assim, apesar do modelo matemático não considerar algumas restrições hidráulicas da rede de abastecimento, sua solução atende a tais requisitos, conforme demonstrado pela simulação hidráulica bem sucedida sem a necessidade do uso da HCPN. Além disso, a solução é encontrada em 6,65 segundos e validada quase instantaneamente pelo EPANET.

A Figura 4.3 indica os períodos em que as bombas estão ligadas na solução encontrada pelo modelo matemático, em que o período 0 corresponde às 7h, início da simulação. Esta também é a solução validada no EPANET, já que este não altera o liga/desliga das bombas, que são adicionados em sua configuração na forma de controles. Nota-se nesta que o sistema evita manter as bombas ligadas por muitos períodos durante o horário de ponta, porém, não é possível não utilizá-las nestes, já que grande parte dos períodos pertencem a ele. Como característica dos dados da rede, os reservatórios possuem volumes iniciais de água altos, com isso, parte das demandas dos primeiro períodos são abastecidas através da água inicialmente presente nos reservatórios, sem haver a necessidade do acionamento das bombas. Porém, a bomba de captação B1 permanece ligada boa parte do horário de ponta (períodos 0 ao 1, 3 ao 12 e 13 ao 14; ou seja, das 7h às 8h, das 10h às 19h e das 20h às 21h), de forma a manter a pressão necessária da rede.

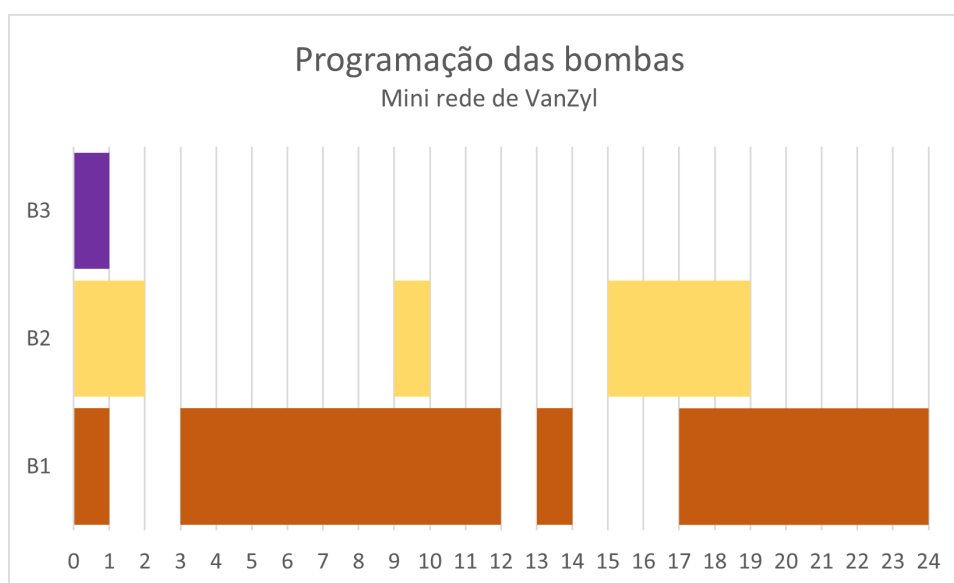


Figura 4.3 – Programação das bombas - Mini rede de VanZyl.

A Figura 4.4 apresenta a altura da água nos reservatórios, em metros, a cada período. Nota-se nesta que o reservatório A tende a manter seus volumes final e inicial próximos, enquanto o reservatório B perde seu volume ao longo do horizonte de planejamento. Isto ocorre pois, de acordo com Zyl, Savic e Walters (2004) e a disposição da rede, o reservatório B é abastecido pelas bombas de captação e pela bomba de transferência B3, o que faz com que manter seus níveis de água altos onere os custos com energia advindos do funcionamento das bombas. Além disso, como o resultado para o liga/desliga das bombas é resultado do modelo matemático, este minimiza os custos, mantendo as bombas ligadas o mínimo para atender as restrições o sistema.

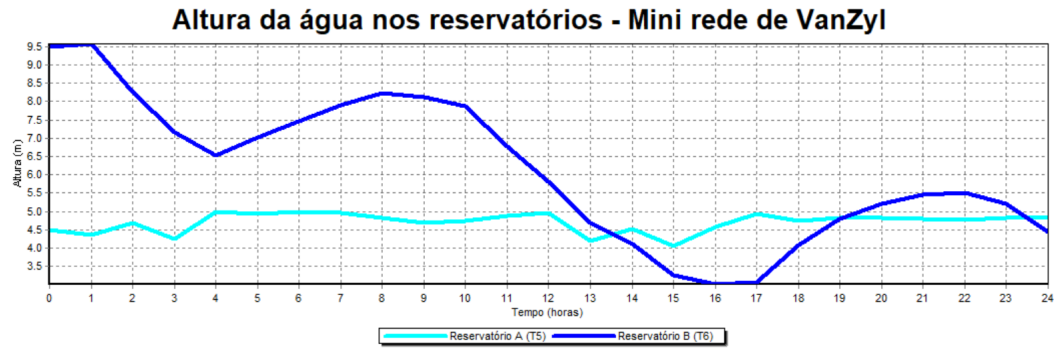


Figura 4.4 – Altura da água nos reservatórios - Mini rede de VanZyl.

A Figura 4.5 apresenta o balanço de vazão da rede (em litros/segundo), que representa a relação entre as vazões totais produzida e consumida ao longo do horizonte de planejamento. Nesta é possível observar que, ao longo do horizonte de planejamento, existe um equilíbrio entre a quantidade de água captada e consumida, onde ocorre uma maior captação nos períodos que antecedem os picos de consumo.

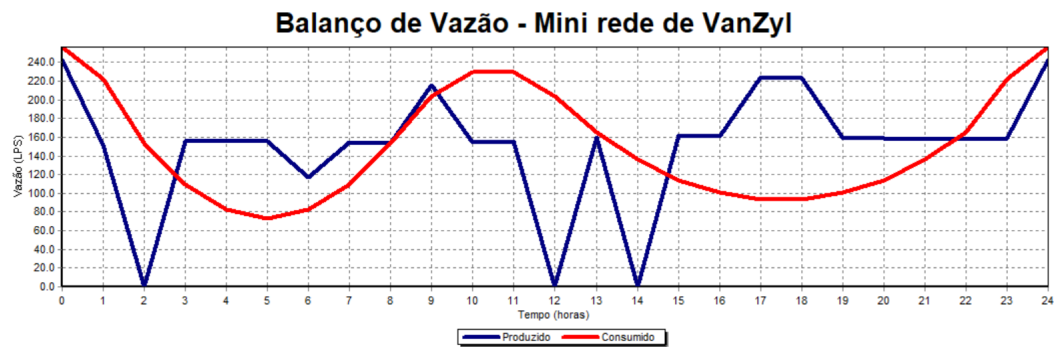


Figura 4.5 – Balanço de vazão - Mini rede de VanZyl.

A Figura 4.6 apresenta a vazão das bombas (em litros/segundo) ao longo do horizonte de planejamento, em que observa-se uma maior vazão de água através da bomba 1, responsável pela maior parte da captação de água e dos custos com energia elétrica.

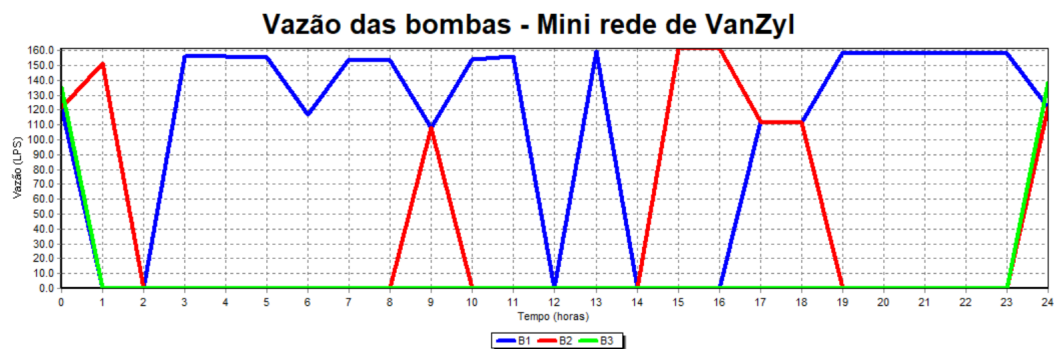


Figura 4.6 – Vazão das bombas - Mini rede de VanZyl.

De modo a facilitar a operação de um futuro horizonte de planejamento, foi utilizada a HCVF para que os volumes dos reservatórios no último período estivessem próximos aos

seus volumes iniciais. Para isso foi utilizado $\Delta = 0,9$, ou seja, o volume de cada reservatório no último período deve ser maior ou igual a 90% de seu volume inicial. Os resultados são apresentados a seguir.

O custo energético diário para a Mini rede de VanZyl retornado pelo EPANET após aplicar a HC VF à solução encontrada pelo modelo matemático proposto (MM), ou seja, MM+HC VF, foi de \$355,14.

As Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 indicam os períodos em que as bombas estão ligadas, a altura da água nos reservatórios, o balanço de vazão da rede e a vazão das bombas na solução encontrada através do MM+HC VF.

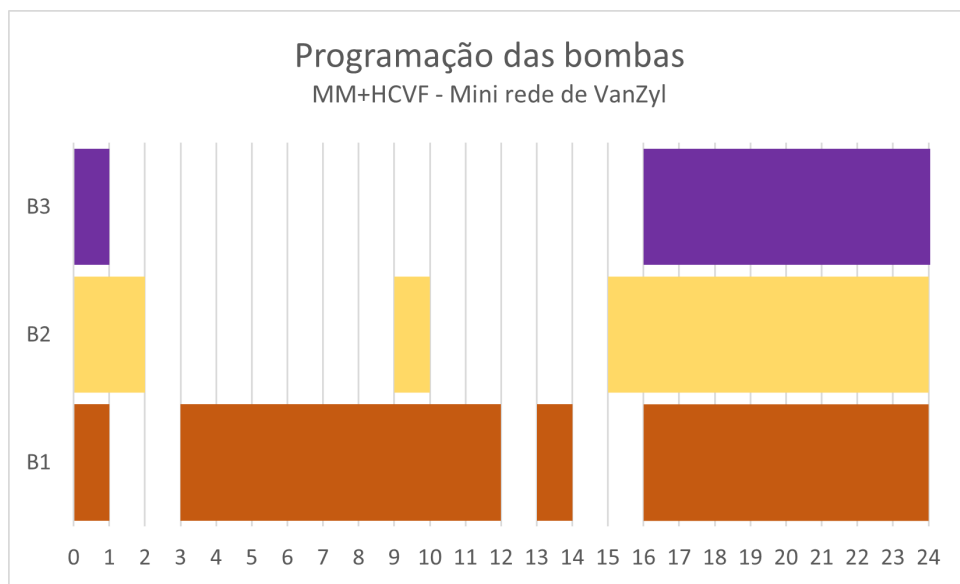


Figura 4.7 – Programação das bombas (MM+HC VF) - Mini rede de VanZyl.

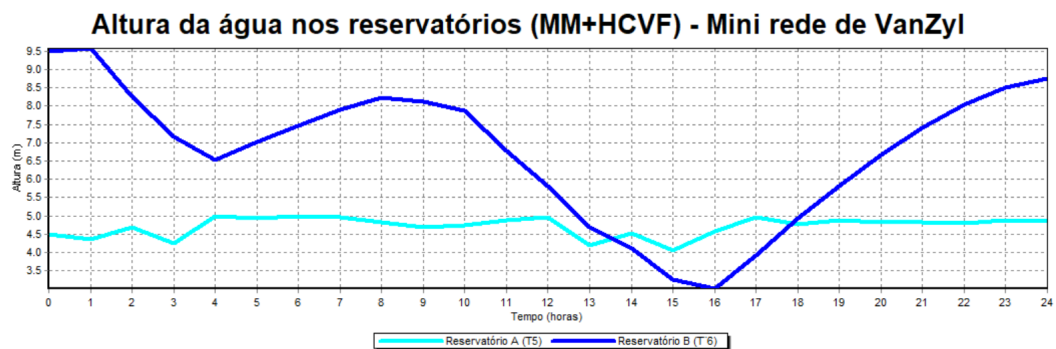


Figura 4.8 – Altura da água nos reservatórios (MM+HC VF) - Mini rede de VanZyl.

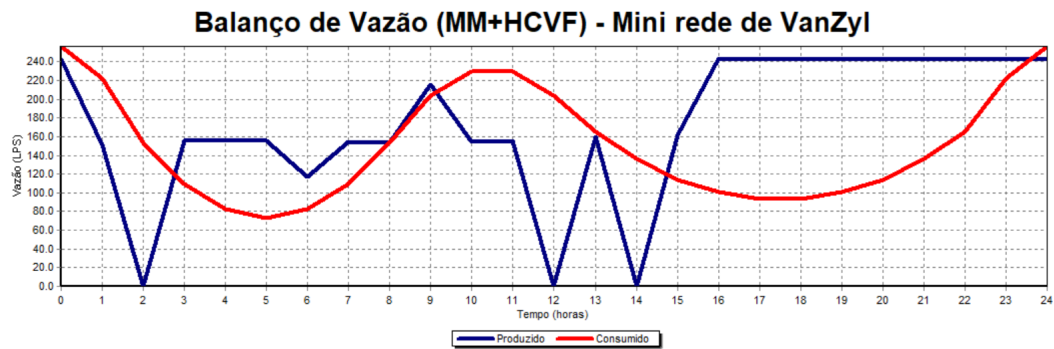


Figura 4.9 – Balanço de vazão (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.

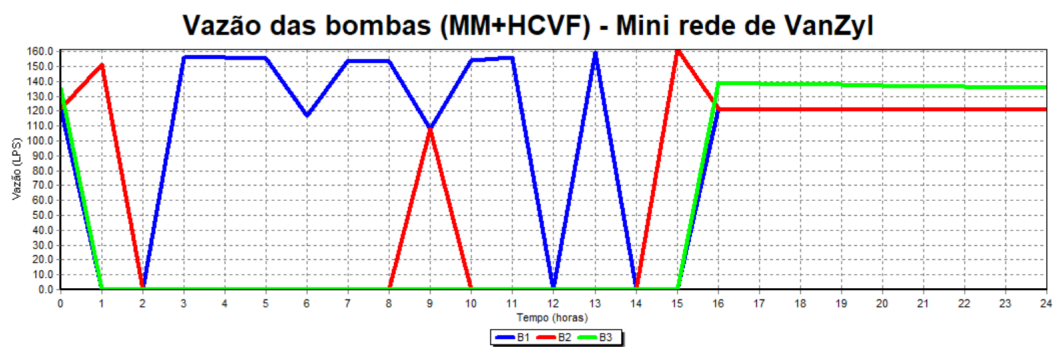


Figura 4.10 – Vazão das bombas (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.

Para alcançar os níveis desejados de água nos reservatórios no último período, foi preciso acionar as bombas 2 e 3 nos períodos que antecedem o final da simulação (Figura 4.7); pois estas são responsáveis pelo abastecimento do reservatório B, que não mantém seus volumes final e inicial próximos na solução sem o uso da HCVF (Figura 4.4). Tais acionamentos aumentam o custo energético diário para o sistema (cerca de 7,53% em relação a solução sem o uso da HCVF), mas garantem água para abastecer os primeiros períodos de um novo horizonte, o que facilita a operação de um próximo dia. A vantagem destes acionamentos é que eles ocorrem nos últimos períodos do horizonte de planejamento, que correspondem ao horário das 0h às 7h, onde a energia elétrica é mais barata. Caso contrário, seria necessário acionar as bombas no início do novo horizonte, períodos que pertencem ao horário de ponta (das 7h às 24h), onde a energia é mais cara, onerando os custos da empresa de abastecimento.

Os volumes finais dos reservatórios estão próximos aos seus volumes iniciais (Figura 4.8), facilitando a operação de um novo horizonte de planejamento e indicando a eficiência da HCVF para a rede em questão; em que há uma maior quantidade de água captada nos últimos períodos do horizonte de planejamento (Figura 4.9) em relação à solução sem o uso da HCVF (Figura 4.5). Também observa-se que há vazão de água através de todas as bombas nos últimos períodos do horizonte de planejamento (Figura 4.10), a fim de suprir a quantidade de água dos reservatórios determinada pela HCVF; enquanto na solução sem a heurística a vazão ocorre apenas pela bomba 1. Assim, as bombas 2 e 3 são responsáveis pelo aumento dos custos com energia elétrica quando comparada a solução sem o uso da HCVF.

4.1.1 Análise dos resultados - Mini rede de VanZyl

A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos para o custo diário com energia elétrica para a Mini rede de VanZyl, em ordem cronológica, de Zyl, Savic e Walters (2004), Marini et al. (2023) e a solução proposta neste trabalho através do MM+HCVF, em unidades monetárias (u.m.). Tal solução é escolhida por ter os reservatórios com volumes finais próximos aos iniciais, se encontrando nas mesmas condições das soluções da literatura descritas.

Tabela 4.4 – Comparação entre os custos diários de energia para a Mini rede de VanZyl.

Referência	Custo diário (em u.m.)
Zyl, Savic e Walters (2004)	344,19
Marini et al. (2023)	337,66
MM + HCVF	355,14

A solução obtida através do MM+HCVF possui seu custo próximo as soluções da literatura, sendo 3,19% e 5,18% maior em relação a Zyl, Savic e Walters (2004) e Marini et al. (2023), respectivamente. O custo maior da solução proposta é justificado pelo fato do modelo matemático não conter as restrições hidráulicas do sistema, que são garantidas através do EPANET; ou seja, o modelo não otimiza características como vazões e pressões da rede. Porém, tal condição do modelo faz com que sua solução seja obtida de forma mais simples e rápida, sendo validada pelo EPANET quase instantaneamente. Além disso, o modelo proposto é linear e de fácil resolução por *solvers* comerciais, enquanto as literaturas descritas utilizam modelos não lineares, solucionados por variações de AG que, comumente, possuem custo computacional elevado.

A solução obtida apenas através do modelo matemático e validada pelo EPANET possui um custo de \$330,27, sendo menor que as demais soluções apresentadas, pois trata-se da solução sem o uso da HCVF. Assim, o modelo matemático gera a operação das bombas de modo a atender as restrições do sistema, minimizando os custos com energia, o que faz com que não haja a preocupação com o volume final dos reservatórios, que apenas se mantém entre seus volumes mínimo e máximo pré determinados.

López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008) apresenta em seu trabalho um custo de \$333,09 para a Mini rede de VanZyl; porém, como não apresenta suas soluções para a operação e vazões das bombas e nem o volume dos reservatórios, não é possível determinar se esta solução se encontra nas mesmas condições das soluções encontradas através do MM ou do MM+HCVF.

Existem trabalhos na literatura para a Mini rede de VanZyl que obtiveram custos energéticos menores que o obtido neste trabalho e os apresentados na Tabela 4.4, no entanto, tais estudos operaram em condições distintas das propostas originalmente para a rede e adotadas neste trabalho; como, por exemplo, Vieira et al. (2020), que obteve um custo total de \$306,54 alterando o volume inicial dos reservatórios; e Shao et al. (2024), que obteve um custo total de \$306,88 e que também permite variações no nível inicial do reservatório desde que a conti-

nuidade do nível de água seja respeitado. Além disso, os autores fazem uso de restrições que consideram características hidráulicas da rede, como a pressão e altura manométrica das bombas, resultando em modelos matemáticos não lineares e não convexos de difíceis resoluções, em que são aplicadas técnicas de linearização para a obtenção de uma solução viável, que precisam ser ajustada ao final do método de solução utilizado por cada autor.

É importante observar que pequenas alterações nas condições iniciais da rede podem causar distinções nos resultados, como visto em [Marini et al. \(2023\)](#), que realizou dois testes com a Rede Anytown; um em que a rede se encontra em suas condições padrão, e um alterando a altura máxima da água permitida para um dos reservatórios de 35 para 80 pés; obtendo vazões para as bombas e a altura final da água no reservatório diferentes dos resultados obtidos no teste com os parâmetros originais.

As Figuras 4.11 e 4.12 e indicam os períodos em que as bombas estão ligadas nos resultados de [Zyl, Savic e Walters \(2004\)](#) e [Marini et al. \(2023\)](#), respectivamente. As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam a programação das bombas e as vazões ao longo do horizonte de planejamento na solução proposta para a Mini rede de VanZyl para MM+HCVF. Para as soluções de [Zyl, Savic e Walters \(2004\)](#), *Run + nmero* indica uma de suas soluções obtidas, já que este faz uso de um AG híbrido, gerando um conjunto de soluções para o problema. [Zyl, Savic e Walters \(2004\)](#) não apresentam as vazões das bombas em seus resultados. Para as soluções apresentadas por [Marini et al. \(2023\)](#), *Q_PMP1*, *Q_PMP2* e *Q_PMP6* representam o funcionamento das bombas 1, 2 e 3, respectivamente, em que $Q(l/s)$ indica a vazão da bomba.

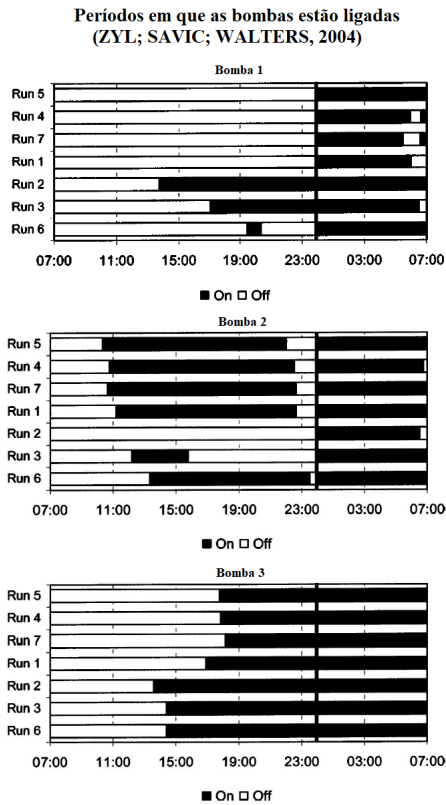


Figura 4.11 – Programação das bombas de Zyl, Savic e Walters (2004) - Mini rede de VanZyl.

Altura da água nos reservatórios e períodos em que as bombas estão ligadas (MARINI, et al., 2023)

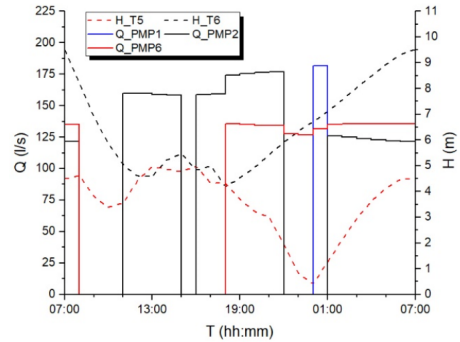


Figura 4.12 – Programação das bombas e altura da água nos reservatórios de Marini et al. (2023) - Mini rede de VanZyl.

Períodos em que as bombas estão ligadas (MM+HCVF)

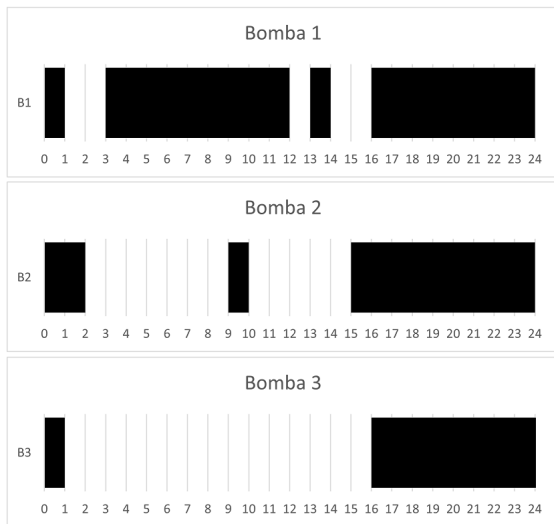


Figura 4.13 – Programação das bombas (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.

Vazão das bombas - Mini rede de VanZyl (MM+HCVF)

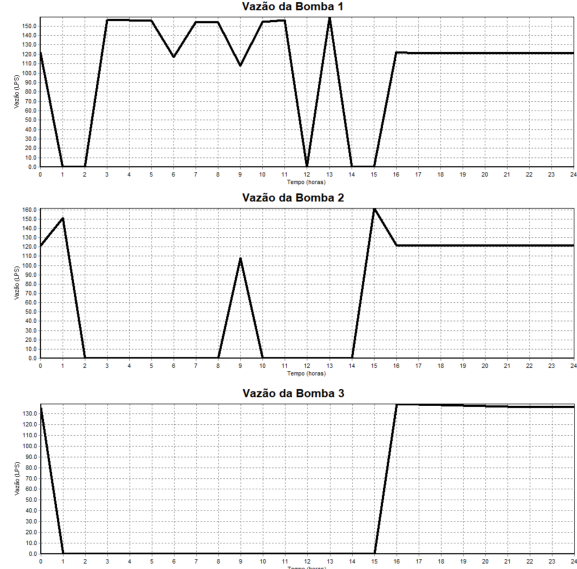


Figura 4.14 – Vazão das bombas (MM+HCVF) - Mini rede de VanZyl.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 podemos observar que a bomba de captação 2 é mais utilizada do que a 1; enquanto a solução proposta neste trabalho faz mais uso da bomba 1 do que da 2

(Figura 4.13). Também é possível observar que nas soluções de Zyl, Savic e Walters (2004), as bombas operam quase em todo o período fora de ponta, de forma a armazenar água, assim como na solução proposta de MM+HCVF. Porém, tanto nas soluções de Zyl, Savic e Walters (2004) quanto de Marini et al. (2023), a bomba de transferência 3 permanece em funcionamento grande parte do período de ponta, diferente da solução proposta neste trabalho.

Na Figura 4.12 há uma maior vazão relacionada a bomba 2 ao invés da 1, ao contrário da Figura 4.14; porém, de acordo com as características da rede, ambas possuem as mesmas capacidades de captação e custos associados. Na solução apresentada por Marini et al. (2023) todas as bombas atingem vazões maiores do que na solução proposta neste trabalho, isto pode ocasionar não apenas custos maiores com energia relacionados aos seus funcionamentos, mas também um aumento de pressão na rede, que gera mais perdas de água; além de um desgaste maior das bombas.

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam a altura da água nos reservatórios, em metros, a cada período, nos resultados de Zyl, Savic e Walters (2004), Marini et al. (2023) e na solução proposta para a Mini rede de VanZyl através de MM+HCVF. Nos gráficos apresentados por Zyl, Savic e Walters (2004), a altura da água nos reservatórios considera a cota topográfica dos nós, ou seja, a altura em que o reservatório se encontra em relação o mar. Assim, para o reservatórios A e B, cujas as cotas são de 80 m e 85 m, respectivamente, equivalem ao 0 m nos resultados apresentados através da solução obtida com MM+HCVF. Além disso, cada linha corresponde a uma solução do conjunto de soluções obtidas pelo AG híbrido. Na solução apresentada por Marini et al. (2023), H_{T5} e H_{T6} representam a altura da água nos reservatórios A e B, respectivamente.

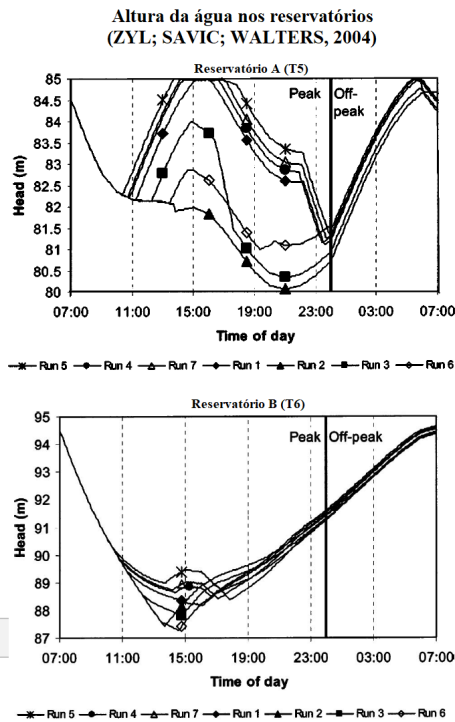


Figura 4.15 – Altura da água nos reservatórios de Zyl, Savic e Walters (2004) - Mini rede de VanZyl.

Altura da água nos reservatórios e períodos em que as bombas estão ligadas (MARINI, et al., 2023)

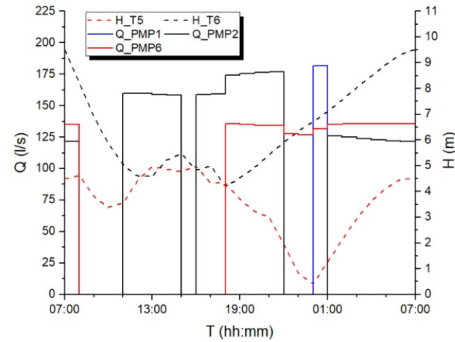


Figura 4.16 – Altura da água nos reservatórios e programação das bombas de Marini et al. (2023) - Mini rede de VanZyl.

Altura da água nos reservatórios - Mini rede de VanZyl (MM+HCVF)

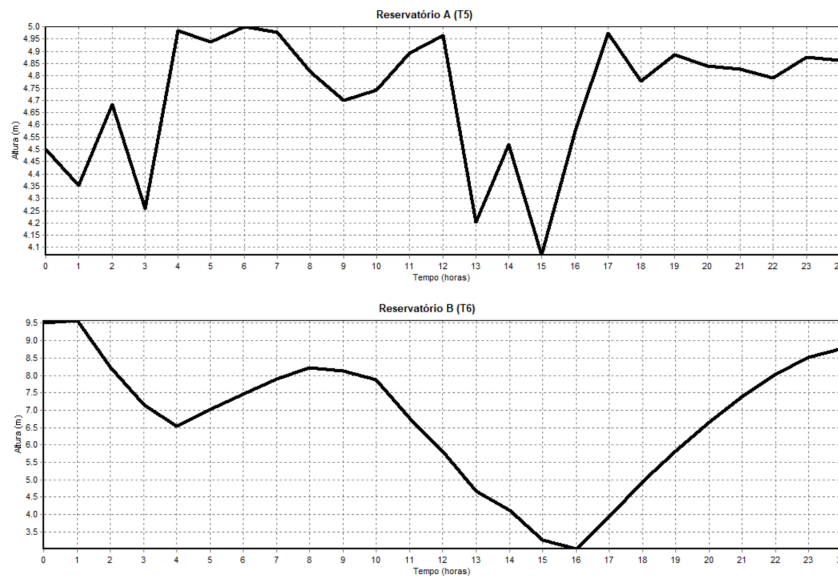


Figura 4.17 – Altura da água nos reservatórios para MM+HCVF - Mini rede de VanZyl.

Para as Figuras 4.15, 4.16 e 4.17, observamos que em todas as soluções os volumes dos reservatórios no último período do horizonte de planejamento estão próximos aos seus volumes iniciais. Também é possível observar que há uma queda no volume de água nos períodos que antecedem os períodos fora de ponta, evitando-se o acionamento das bombas onde a energia é

mais cara, fazendo com que a ocorra um esvaziamento dos reservatórios, que aumentam seus volumes assim que o horário de ponta termina. Porém, algumas soluções obtidas por Zyl, Savic e Walters (2004) mantém o volume do reservatório A próximo ao seu volume máximo durante o horário de ponta, assim como a solução de Marini et al. (2023), ocasionando grandes diferenças de volume e, conseqüentemente, de pressão no sistemas; diferente da solução proposta neste trabalho, que mantém o volume deste reservatório entre $4m$ e $5m$ durante todo o horizonte de planejamento.

Desse modo, conclui-se que, o modelo matemático mostrou-se consistente em sua solução para a Mini rede de VanZyl, obtendo-a de forma rápida e que é validada pelo o EPANET sem a ocorrência de pressões irregulares. Além disso, a HCVF mostrou-se eficiente no teste em questão, atingindo o objetivo proposto, onde os volumes dos reservatórios no último período ficaram próximos aos seus volumes iniciais, ficando próximo aos resultados encontrados na literatura.

4.2 Rede de Florianópolis

A Rede de Florianópolis (Figura 4.18) é baseada em uma rede real, sendo parte do sistema de abastecimento de água da cidade de Florianópolis, em Santa Catarina, proposta por Vieira et al. (2020). Essa rede é composta por 630 nós, sendo 6 fontes, 5 reservatórios e 619 junções; e 655 trechos, cujos 7 possuem uma bomba cada e 648 operam por gravidade, não havendo válvula. O arquivo de dados utilizado para a rede foi extraído da página do Professor Doutor Leandro Callegari Coelho da *Université Laval*, Canadá (COELHO, 2020). Na Figura 4.18, B "número" indica a posição de uma bomba, e R "número" indica a posição de um reservatório.

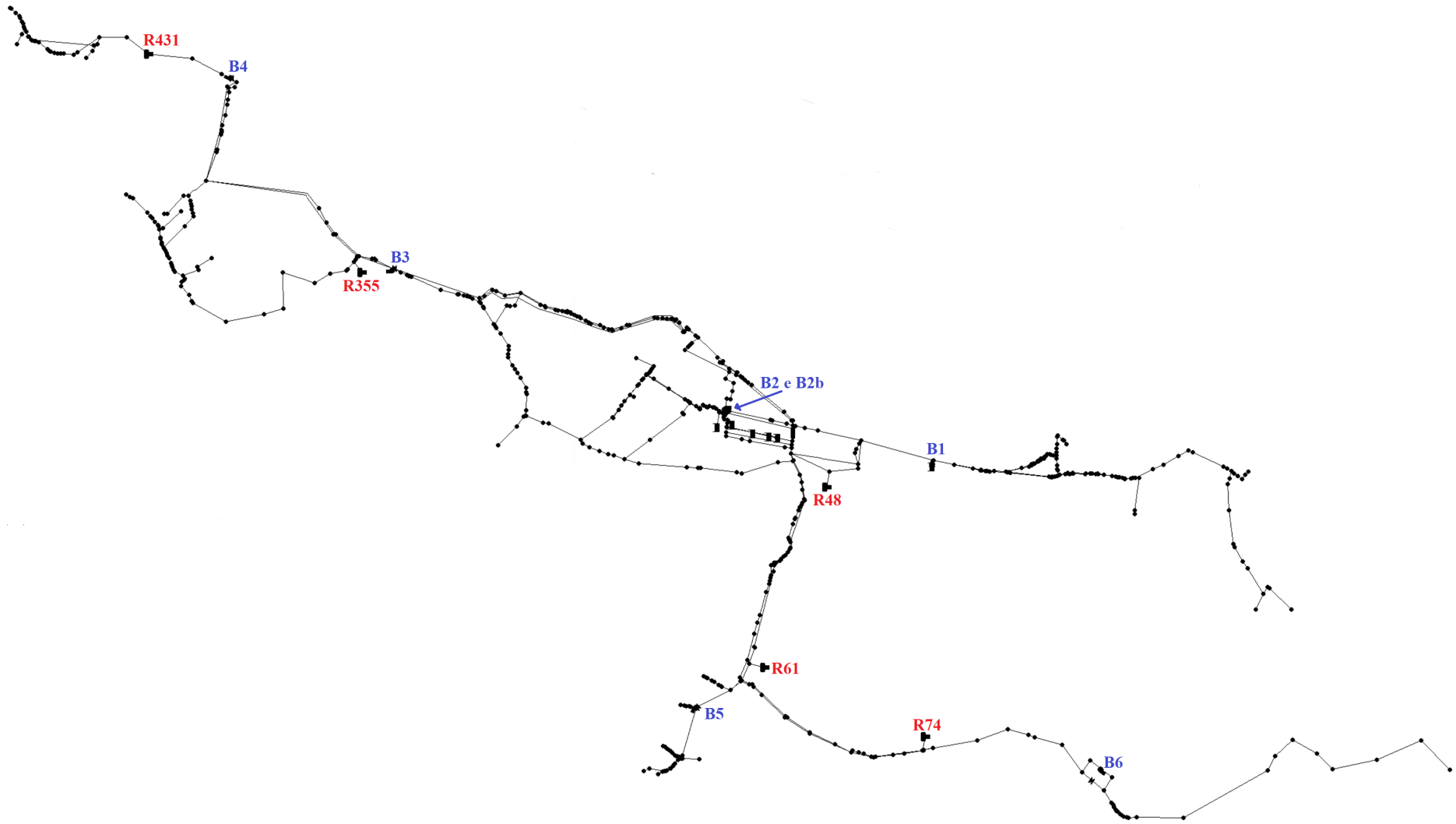


Figura 4.18 – Rede de Florianópolis (Fonte: [Vieira et al. \(2020\)](#)).

A rede possui 24h de simulação iniciando às 0h e finalizando às 24h. Os períodos de ponta, onde a energia elétrica é mais cara, estão compreendidos entre às 18h e às 21h; e os períodos fora de ponta, compreendidos entre às 0h e às 18h, e das 21h às 24h. Porém, tal distinção de tarifas está associada as bombas de captação, mas não as bombas de distribuição/transferência, cujas tarifas permanecem a mesma ao longo das 24h, descritas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Tarifas de energia a cada hora para cada bomba - Rede de Florianópolis.

Bomba	Tarifa nos períodos de ponta	Tarifa nos períodos fora de ponta
B1	0,33767472525097	0,226484133794058
B2 e B2b	0,979469170843766	0,285692579303081
B3 e B6	0,239259853042736	0,239259853042736
B4 e B5	0,351599729241877	0,351599729241877

O rendimento de bombeamento global da rede é de 80%. Com isso, tem-se as vazões máximas por hora para os arcos que possuem bombas utilizadas no modelo matemático descritas na Tabela 4.6. Para os demais arcos, $(i, j) \in V \cup G$, as vazões máximas possuem uma variação de $21,21 \text{ m}^3/h$ à $8482,30 \text{ m}^3/h$, de acordo com seu diâmetro.

Tabela 4.6 – Vazão máxima de cada bomba - Rede de Florianópolis.

Bomba	Vazão máxima (em m^3/h)
B1	840
B2 e B2b	118
B3	504
B4	160
B5	172
B6	80

Os volumes iniciais, mínimos e máximos para cada um dos reservatórios são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Volumes inicial, mínimo e máximo dos reservatórios - Rede de Florianópolis.

Reservatório	Volume inicial (em m^3)	Volume mínimo (em m^3)	Volume máximo (em m^3)
48	631,42	298,64	1194,58
61	51,42	83,32	333,29
74	0,0	122,71	490,87
355	212,656	99,93	399,73
431	65,99	49,99	199,997

A Figura 4.19 apresenta o fator de consumo da Rede de Florianópolis durante 24h, das 0h às 24h, onde é possível observar o pico de consumo no horário de ponta, sendo maior entre às 19h e às 21h, situação comumente observada nos sistemas de abastecimento brasileiros.

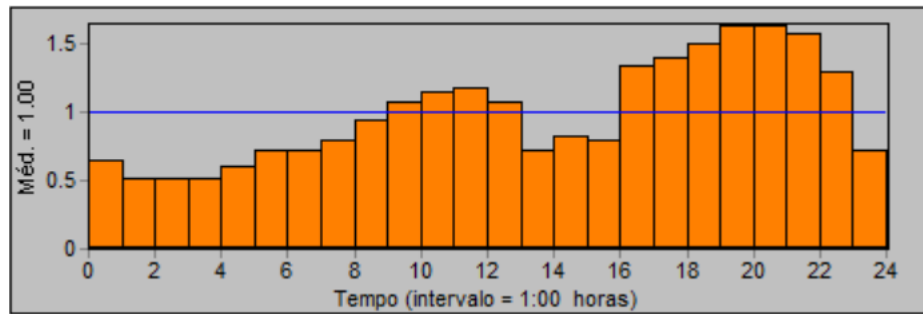


Figura 4.19 – Padrão de consumo - Rede de Florianópolis.

Os resultados descritos a seguir são alcançados utilizando o número máximo de iterações padrão, de 100.

O custo energético diário para a Rede de Florianópolis retornado pelo EPANET foi de \$1627,41 através da solução encontrada para o liga/desliga das bombas pelo modelo matemático proposto. Porém, tal solução não é validada pelo EPANET, pois gera a ocorrência de pressões negativas. Com isso foi preciso utilizar a HCPN. Assim, a solução validada pelo EPANET, ou seja, aquela em que não há ocorrência de pressões irregulares, retorna um custo de \$2138,02. A solução é encontrada pelo modelo matemático em 11,45 segundos e validada quase que instantaneamente pelo EPANET.

A Figura 4.20 indica os períodos em que as bombas estão ligadas na solução encontrada pelo modelo matemático proposto junto com a HCPN, em que o período 0 corresponde às 0h, início da simulação. Nota-se nesta que o sistema mantém as bombas ligadas quase que na totalidade do período em que a energia é mais cara. Isso ocorre pois estes são os períodos em que a demanda é maior. Com isso a rede deve abastecer a demanda dos nós consumidores, atendendo aos requisitos de pressão da rede e volume dos reservatórios. Também podemos observar que as bombas são pouco utilizadas nos primeiros períodos, por conta do volume inicial dos reservatórios conseguirem atender suas respectivas demandas.

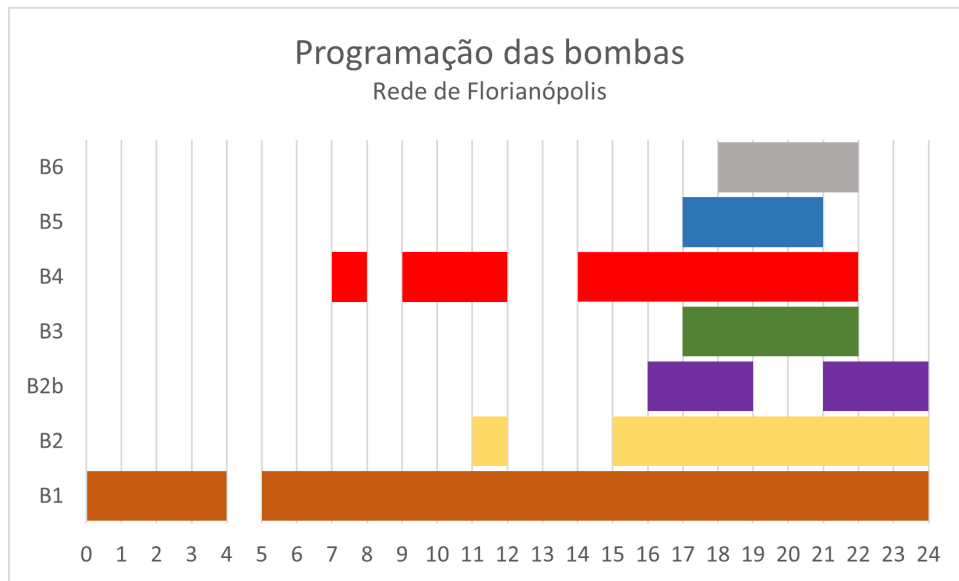


Figura 4.20 – Programação das bombas - Rede de Florianópolis.

A Figura 4.21 apresenta a altura da água nos reservatórios, em metros, a cada período. Observa-se que reservatórios os 48 e 61 tendem a elevar seus volumes ao longo do horizonte de planejamento, pois estes são próximos as bombas que captam água das fontes, com isso são responsáveis pela maior parte do armazenamento de água do sistema. Os reservatórios, 355 e 431, que tendem a diminuir seus volumes ao longo do horizonte, se encontram mais distantes da captação, exigindo uma maior pressão e, conseqüentemente, gerando um maior custo ao sistema para mantê-los com os níveis de água mais altos. Já o reservatório 74, além de se encontrar nas mesmas condições logísticas dos reservatórios 355 e 431, mantém-se vazio durante todo horizonte de planejamento pois a rede não precisa armazenar água neste para atender os nós que estão próximos, já que o fluxo pode prosseguir através da pressão, sem a necessidade de armazenamento no reservatório (Figura 4.22).

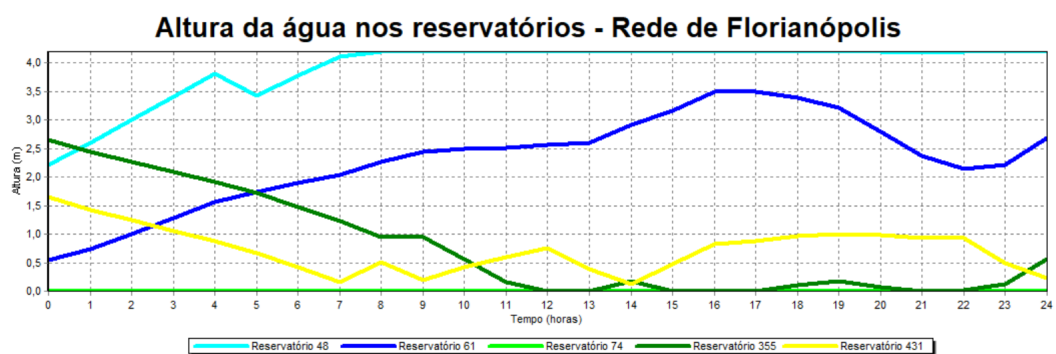


Figura 4.21 – Altura da água nos reservatórios - Rede de Florianópolis.

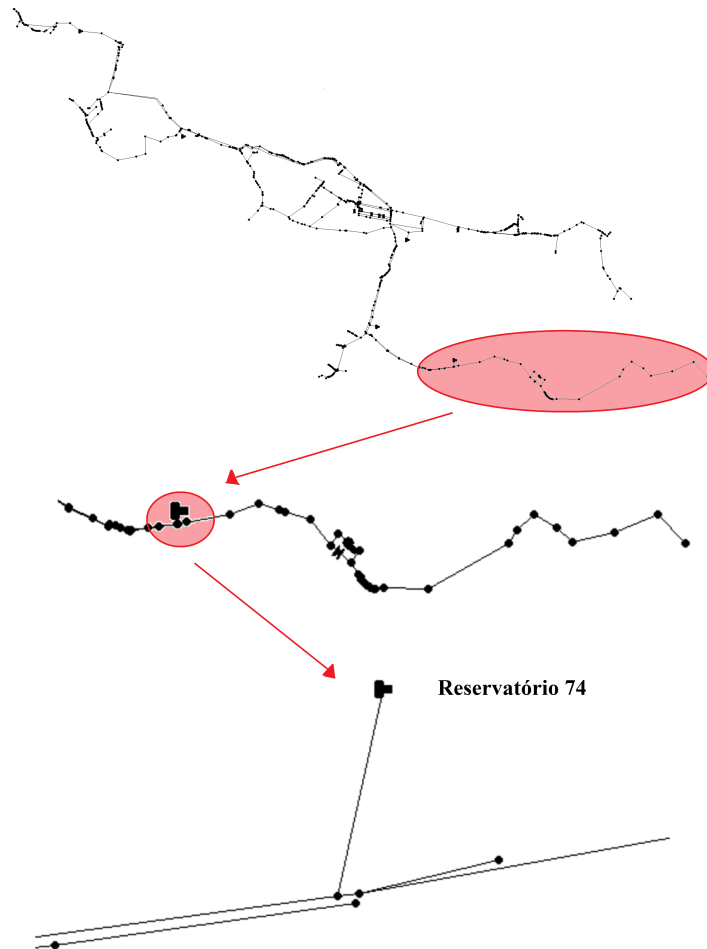


Figura 4.22 – Localização do reservatório 74 - Rede de Florianópolis.

A Figura 4.23 apresenta o balanço de vazão da rede (em m^3 /hora). Em concordância com a Figura 4.21, observa-se que os reservatórios 48 e 61 realizam o armazenamento de água nos períodos que antecedem o horário de ponta, períodos em que há uma menor demanda; enquanto os demais reservatórios não o fazem. Isto ocorre pois tais reservatórios são os mais próximos dos nós que possuem fonte e têm grandes capacidades de armazenagem, pois são responsáveis por enviar água para os demais reservatórios. Porém a demanda nos períodos de ponta pode chegar a 3 vezes a demanda nos períodos fora de ponta, o que justifica a operação das bombas nestes. Assim, tem-se o equilíbrio entre a água captada e a água consumida ao longo do horizonte de planejamento (Figura 4.23).

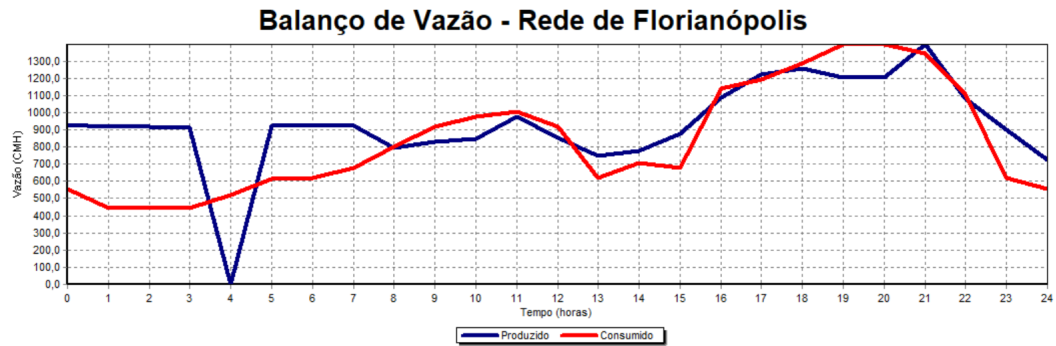


Figura 4.23 – Balanço de vazão - Rede de Florianópolis.

A Figura 4.24 apresenta a vazão das bombas (em m^3 /hora) ao longo do horizonte de planejamento, em que observa-se uma maior vazão de água através da bomba B1, que permanece ligada por quase todo horizonte de planejamento e possui a maior capacidade de bombeamento do sistema, sendo responsável pela maior parte da captação de água e dos custos com energia elétrica. Além disso, todas as bombas estão em funcionamento durante os períodos de ponta, e têm suas vazões aumentadas neste, onde também se encontra o pico de demanda. Porém, a bomba B6 é a que atinge uma menor vazão, pois esta se encontra próxima a uma das extremidades da rede, ou seja, é uma bomba de transferência, sendo responsável por poucos nós que possuem demanda.

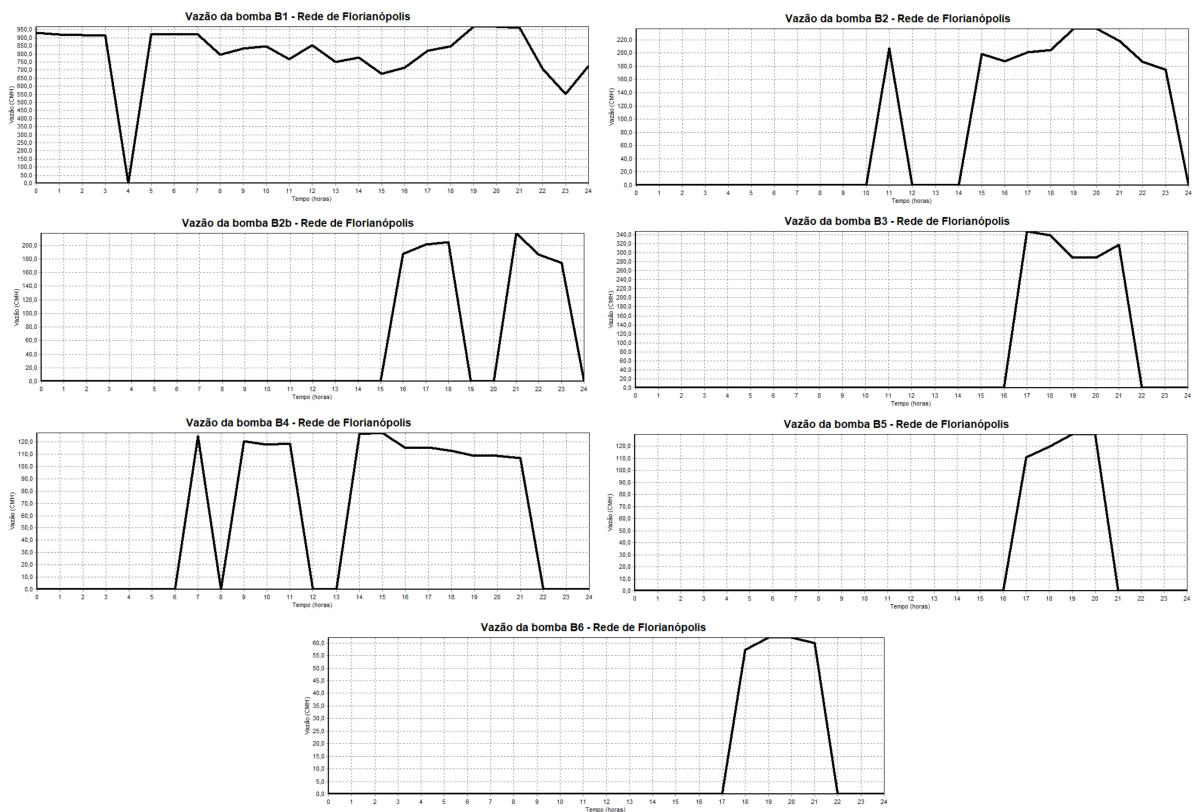


Figura 4.24 – Vazão das bombas - Rede de Florianópolis.

Também através da Figura 4.24 observa-se que bombas mais próximas das fontes, ou

seja, aquelas responsáveis pela captação de água do sistema (B1, B2 e B2b) atingem suas vazões máximas; enquanto as demais bombas, de transferência, permanecem abaixo de suas capacidades máximas. Isto ocorre pois as bombas de captação são responsáveis por captar e enviar água para os diversos pontos da rede, sejam eles nós que possuem reservatórios ou demanda, ou trechos que possuem outras bombas. Assim, necessitam captar grandes volumes para que possam atender toda a rede, respeitando as pressões determinadas. As demais bombas (B3, B4, B5 e B6), são responsáveis por abastecer trechos menores do sistema, podendo operar abaixo de suas capacidades máximas e, assim, economizar energia; mas sem deixar de atender as demandas e os requisitos de pressão da rede.

A seguir são apresentados os resultados para a Rede de Florianópolis ao utilizar a HCVF, com $\Delta = 0,9$.

O custo energético diário para a Rede de Florianópolis retornado pelo EPANET após aplicar a HCVF à solução encontrada pela abordagem de solução proposta, ou seja, MM+HCPN+HCVF, foi de \$2449,76.

As Figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 indicam os períodos em que as bombas estão ligadas, a altura da água nos reservatórios, o balanço de vazão da rede e a vazão das bombas na solução encontrada através do MM+HCPN+HCVF.

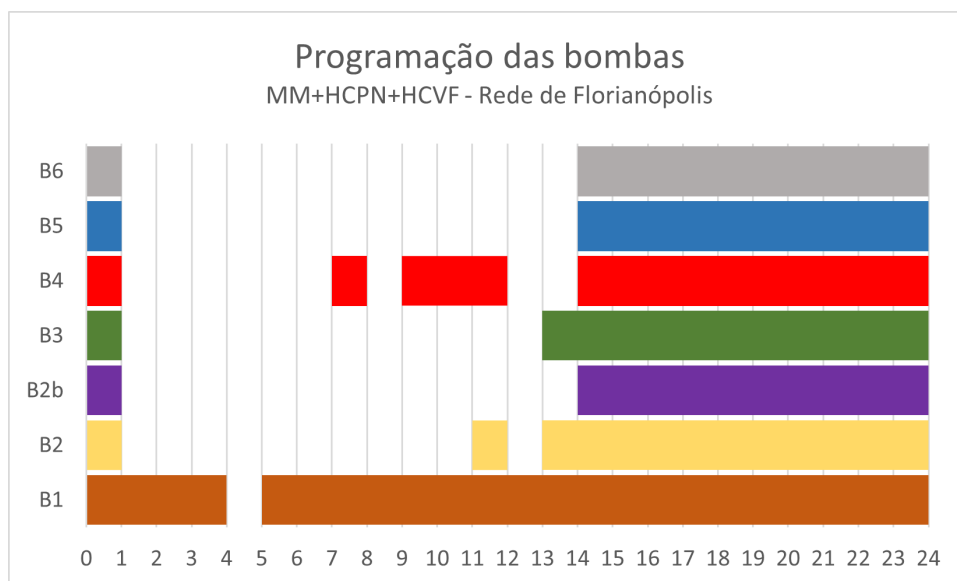


Figura 4.25 – Programação das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede de Florianópolis.

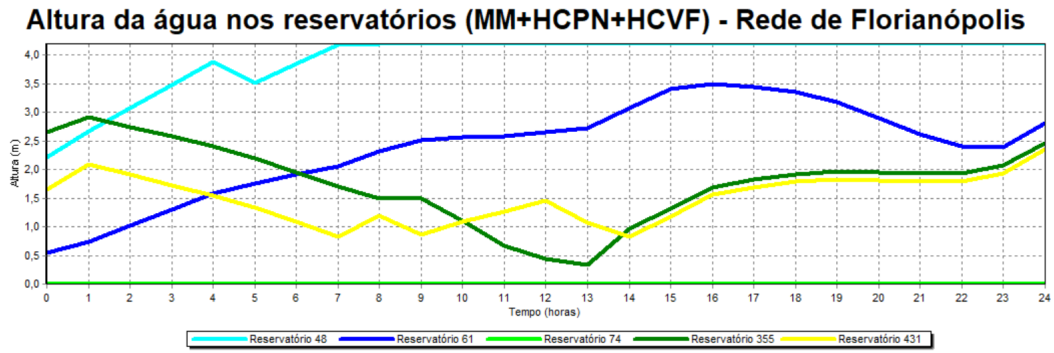


Figura 4.26 – Altura da água nos reservatórios (MM+HCPN+HCVF) - Rede de Florianópolis.

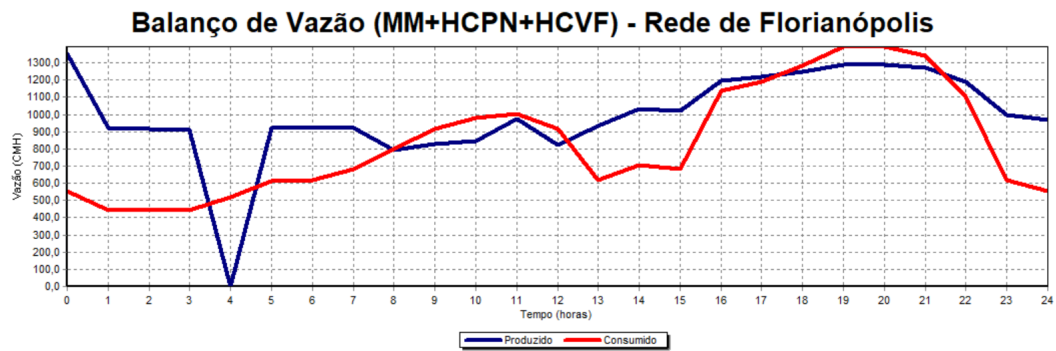


Figura 4.27 – Balanço de vazão (MM+HCPN+HCVF) - Rede de Florianópolis.

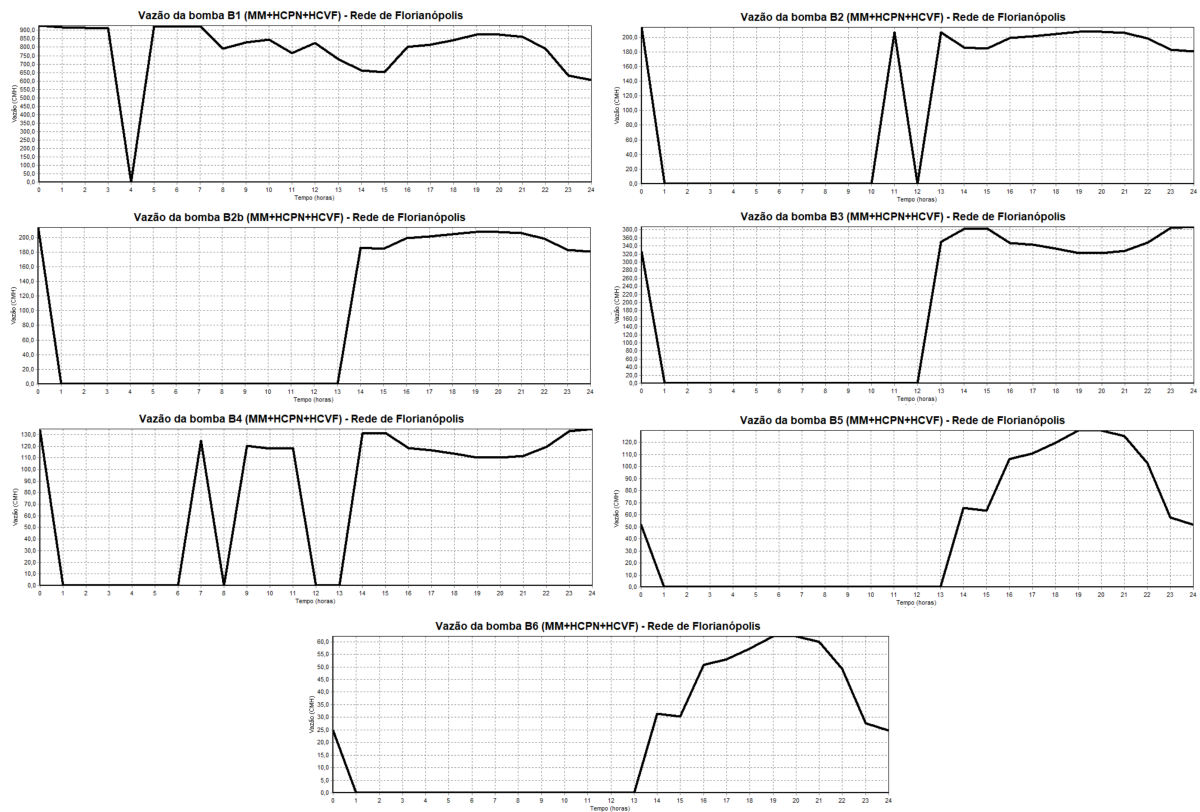


Figura 4.28 – Vazão das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede de Florianópolis.

As bombas permanecem ligadas durante os últimos períodos do horizonte de planeja-

mento, incluindo aqueles que a energia é mais cara, a fim de atender as demandas e estocar água para um futuro horizonte (Figura 4.25). Para a maioria dos reservatórios, os volumes finais estão acima de seus volumes iniciais, atendendo aos critérios da HCVF e facilitando a operação de um novo horizonte de planejamento (Figura 4.26). Porém, por conta da proximidade do último período com os períodos de ponta, tal armazenagem é responsável pelo aumento nos custos com energia elétrica em relação a solução sem o uso da HCVF de, aproximadamente, 14,58%. Assim, fica a critério do operador, de acordo com as condições diárias da rede, realizar ou não tal armazenamento para o horizonte futuro.

Na Figura 4.27 é possível observar o aumento na captação nos últimos períodos do horizonte de planejamento em relação a solução sem o uso da HCVF (Figura 4.23). Também há o aumento da vazão de água através de todas as bombas nos últimos períodos do horizonte de planejamento, a fim de suprir a quantidade de água dos reservatórios determinada pela HCVF (Figura 4.28); sendo, assim, todas responsáveis pelo aumento dos custos com energia elétrica quando comparada a solução sem o uso da HCVF. Ainda assim, as bombas que não estão próximas a captação seguem com as vazões abaixo de suas capacidades máximas, indicando que é menos oneroso manter as bombas ligadas por um maior número de períodos seguidos do que deixá-las atingir suas vazões máximas.

4.2.1 Análise dos resultados - Rede de Florianópolis

As soluções obtidas neste trabalho geraram um custo com energia elétrica de \$2138,02 e \$2449,76 para MM+HCPN e MM+HCPN+HCVF, respectivamente. [Vieira et al. \(2020\)](#) apresentam um custo de \$2085,48; porém, não apresentam seus resultados para a operação e a vazão das bombas, e nem o volume de seus reservatórios. Assim, não foi possível determinar se a solução de [Vieira et al. \(2020\)](#) se encontra nas mesmas condições que as soluções encontradas neste trabalho.

Assim, os resultados obtidos através do MM+HCPN para a Rede de Florianópolis se mostrou satisfatório, já que obtém uma solução cujo custo energético é próximo ao do descrito na literatura utilizando um modelo de programação linear inteiro misto de fácil resolução computacional e sem a necessidade de linearizações e ajustes de solução por conta destes, como em [Vieira et al. \(2020\)](#). Além disso, a solução encontrada através do MM+HCPN+HCVF, mesmo obtendo um custo energético maior, cumpriu seu objetivo de obter uma solução validada pelo EPANET que possui os volumes finais dos reservatórios próximos aos seus volumes iniciais.

4.3 Redes Richmond Esqueleto e Richmond

A Rede Richmond (Figura 4.29) é baseada em uma rede real, sendo parte do sistema de abastecimento de água do Reino Unido, proposta inicialmente por [Zyl, Savic e Walters \(2004\)](#). Essa rede é composta por 872 nós, sendo 1 fonte, 6 reservatórios e 865 junções; e 957 trechos,

cujos 7 possuem uma bomba cada, 1 possui uma válvula e 943 operam por gravidade. A Rede Richmond Esqueleto (Figura 4.30) é uma simplificação da Rede Richmond, mas não é um modelo hidráulicamente equivalente; composta por 48 nós, sendo 1 fonte, 6 reservatórios e 41 junções; e 51 trechos, cujos 7 possuem uma bomba cada e 44 operam por gravidade. Os arquivos de dados utilizados para ambas as redes foram extraídos da página do Centro de Recursos de Sistemas Hídricos *Centre for Water Systems*, da Universidade de Exeter, Inglaterra (EXETER, 2010). Na Figura 4.29, B "número" indica a posição de uma bomba, e R "letra" indica a posição de um reservatório.

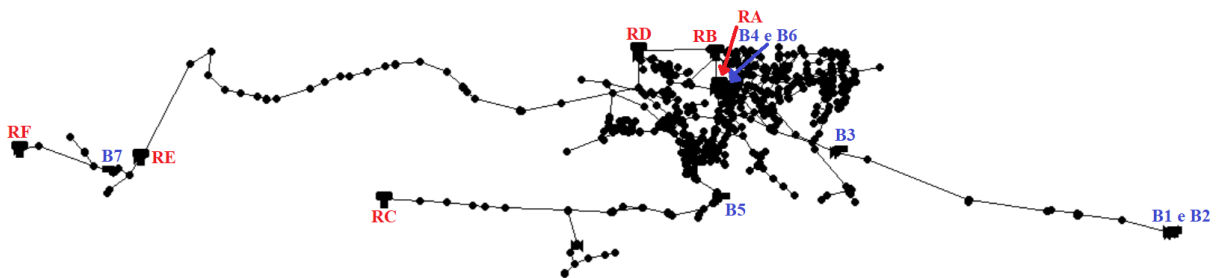


Figura 4.29 – Rede Richmond (Fonte: Zyl, Savic e Walters (2004)).

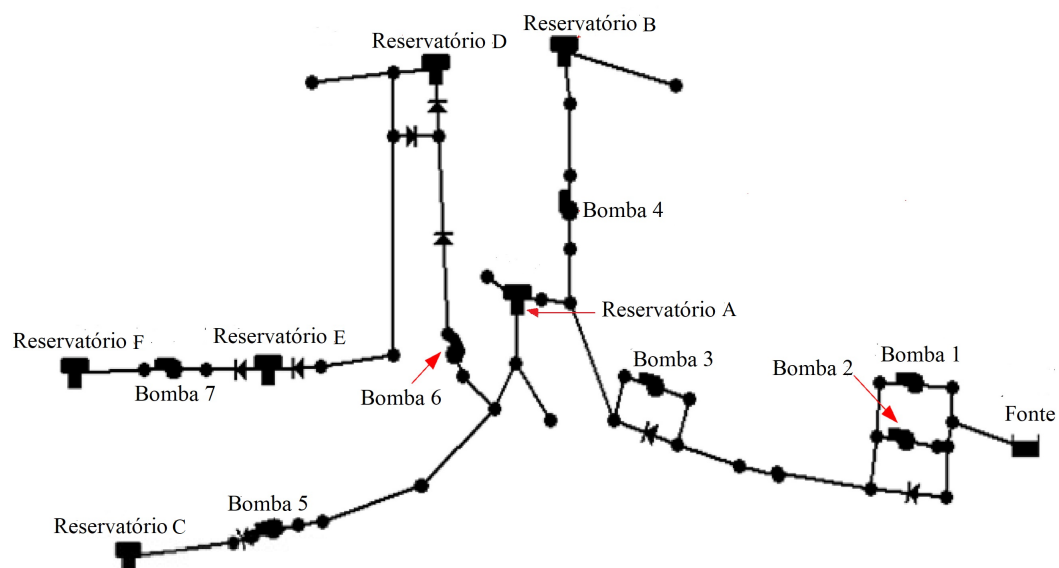


Figura 4.30 – Rede Richmond Esqueleto (Fonte: baseado em Abdelsalam e Gabbar (2021)).

4.3.1 Rede Richmond Esqueleto

A Rede Richmond Esqueleto adota uma simulação de 24h, iniciando às 7h da manhã e finalizando às 7h da manhã do dia seguinte. Os períodos de ponta estão compreendidos entre às 7h e às 24h; e os períodos fora de ponta, entre às 0h e às 7h; com exceção da bomba 5, que não possui diferenciação na tarifa ao longo do horizonte de planejamento. As tarifas são descritas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Tarifas de energia a cada hora para cada bomba - Rede Richmond Esqueleto.

Bomba	Tarifa nos períodos de ponta	Tarifa nos períodos fora de ponta
1 e 2	6,7945	2,40925
3	7,535	2,41
4	12,34	2,456666667
5	1	1
6	11,195	2,460
7	11,94	2,44

O rendimento de bombeamento global da rede é de 75%. Com isso, tem-se as vazões máximas por hora para os arcos que possuem bombas utilizadas no modelo matemático descritas na Tabela 4.9. Para os demais arcos, $(i, j) \in V \cup G$, as vazões máximas possuem uma variação de $48,99 \text{ m}^3/h$ à $763,41 \text{ m}^3/h$, de acordo com seu diâmetro.

Tabela 4.9 – Vazão máxima de cada bomba - Rede Richmond Esqueleto.

Bomba	Vazão máxima (em m^3/h)
1 e 2	126
3	332
4	252
5	162
6	40
7	20

Os volumes iniciais, mínimos e máximos para cada um dos reservatórios são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Volumes inicial, mínimo e máximo dos reservatórios - Rede Richmond Esqueleto.

Reservatório	Volume inicial (em m^3)	Volume mínimo (em m^3)	Volume máximo (em m^3)
A	321,76	108,43	433,73
B	102,06	46,56	186,26
C	25,65	8,558	34,21
D	51,82	27,33	109,35
E	18,68	12,56	50,26
F	6,97	2,54	10,17

A Figura 4.31 apresenta o fator de consumo da Rede Richmond Esqueleto durante 24h, das 0h às 24h, onde é possível observar dois picos de consumo, um fora do horário de ponta, de 1h às 2h, e o outro no horário de ponta, às 12h.

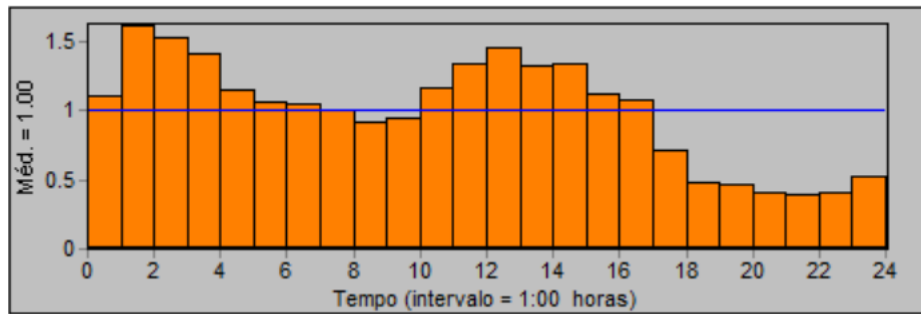


Figura 4.31 – Padrão de consumo - Rede Richmond Esqueleto.

Os resultados descritos a seguir são alcançados utilizando o número de iterações padrão, de 40.

O custo energético diário para a Rede Richmond Esqueleto retornado pelo EPANET foi de \$1763,15 através da solução encontrada para o liga/desliga das bombas pelo modelo matemático proposto. Porém, tal solução não é validada pelo EPANET, pois gera a ocorrência de pressões negativas, sendo necessário o uso da HCPN. Assim, a solução validada pelo EPANET retorna um custo de \$9042,04. A solução é encontrada pelo modelo matemático em 2,33 segundos e validada quase que instantaneamente pelo EPANET.

A Figura 4.32 indica os períodos em que as bombas estão ligadas na solução encontrada pelo modelo matemático proposto junto com a HCPN, em que o período 0 corresponde às 7h, início da simulação. Nota-se nesta figura que o sistema mantém as bombas ligadas por vários períodos em que a energia é mais cara. Isto ocorre pois, a maioria dos períodos do horizonte de planejamento pertencem ao horário de ponta, não sendo possível não acionar as bombas nestes. Porém, podemos observar que os acionamentos ocorrem nos períodos que antecedem os picos de demanda, mantendo as bombas em funcionamento até que a demanda reduza, de forma a atender os requisitos de pressão e volume dos reservatórios.

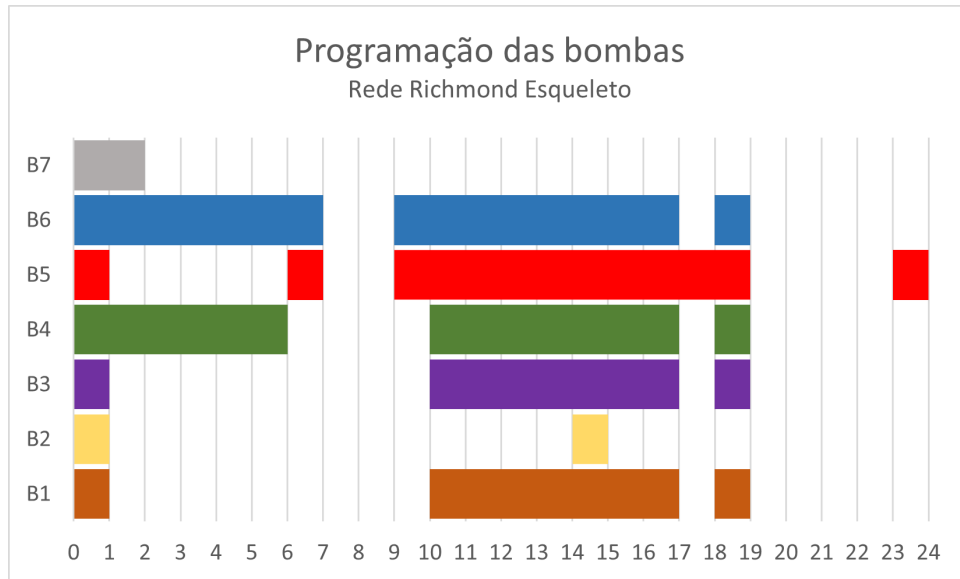


Figura 4.32 – Programação das bombas - Rede Richmond Esqueleto.

A Figura 4.33 apresenta a altura da água nos reservatórios, em metros, a cada período. Observa-se que os reservatórios C e E tendem a manter seus níveis elevados em grande parte do horizonte de planejamento pois são responsáveis pelo abastecimento de grandes demandas do sistema; enquanto o reservatório B possui pouca demanda associada a ele. Já a relação entre os reservatórios E e F são distintas, pois, enquanto o reservatório E mantém seus níveis elevados, o reservatório F tende ao seu volume mínimo, pois o reservatório E é responsável pelo abastecimento do F, que se encontra na extremidade da rede.

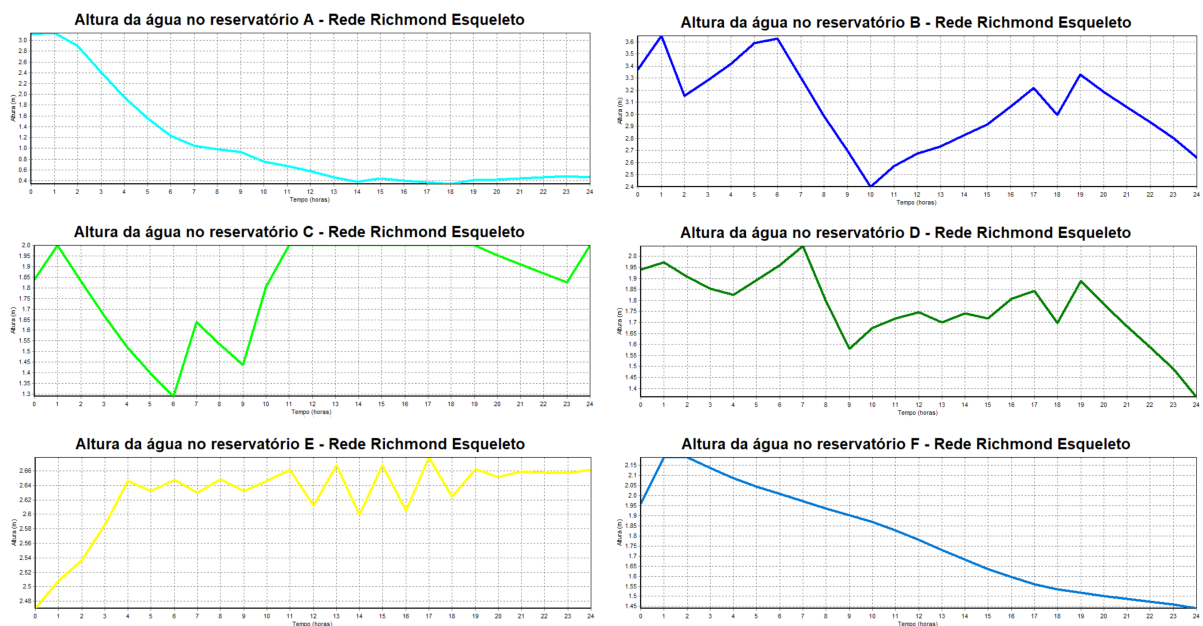


Figura 4.33 – Altura da água nos reservatórios - Rede Richmond Esqueleto.

O reservatório A se encontra em uma localização intermediária, sendo de grande importância e possuindo a maior capacidade de armazenamento da rede, já que é responsável direto

por alguns nós de demanda mas, principalmente, por enviar água para outros pontos da rede, incluindo os reservatórios C, D, E e F. Com isso, observa-se seu esvaziamento ao longo do horizonte de planejamento (Figura 4.33).

A Figura 4.34 apresenta o balanço de vazão da rede (em litros/segundo). Nesta é possível observar que os primeiros períodos há pouca captação de água, pois a demanda é abastecida pela água estocada nos reservatórios, que possuem volumes iniciais de água altos em quase todos eles. Também vê-se, na sequência, um aumento e uma diminuição na captação, em concordância com a operação das bombas, juntamente com a variação da demanda, indicando um equilíbrio entre a quantidade de água captada e consumida.

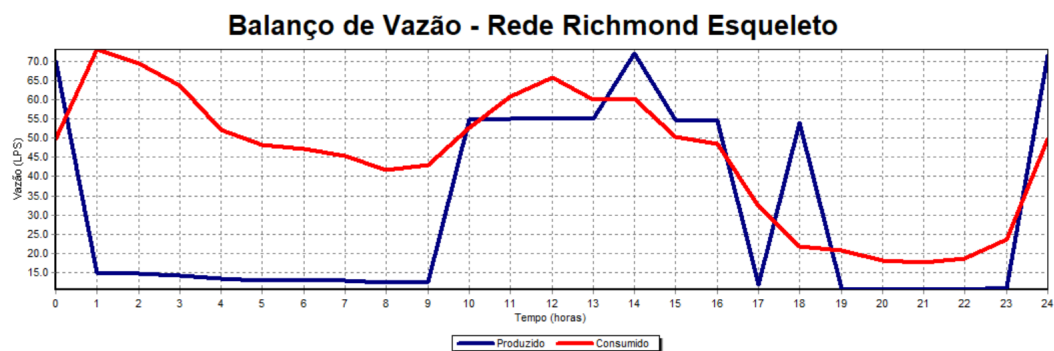


Figura 4.34 – Balanço de vazão - Rede Richmond Esqueleto.

A Figura 4.35 apresenta a vazão das bombas (em litros/segundo) ao longo do horizonte de planejamento, em que observa-se que as maiores vazões estão associadas as bombas B1 e B3. Isto ocorre pois B1 é responsável pela captação de água do sistema e B3 é uma bomba intermediária, entre a captação e as bombas responsáveis por atender nós com demanda e reservatórios. Bombas que se encontram próximas as extremidades da rede, como B5 e B7, possuem menor capacidade de transportar água mas também mantém suas vazões baixas, já que são responsáveis por enviar água para poucos nós de demanda e reservatórios com capacidade de armazenamento menores.

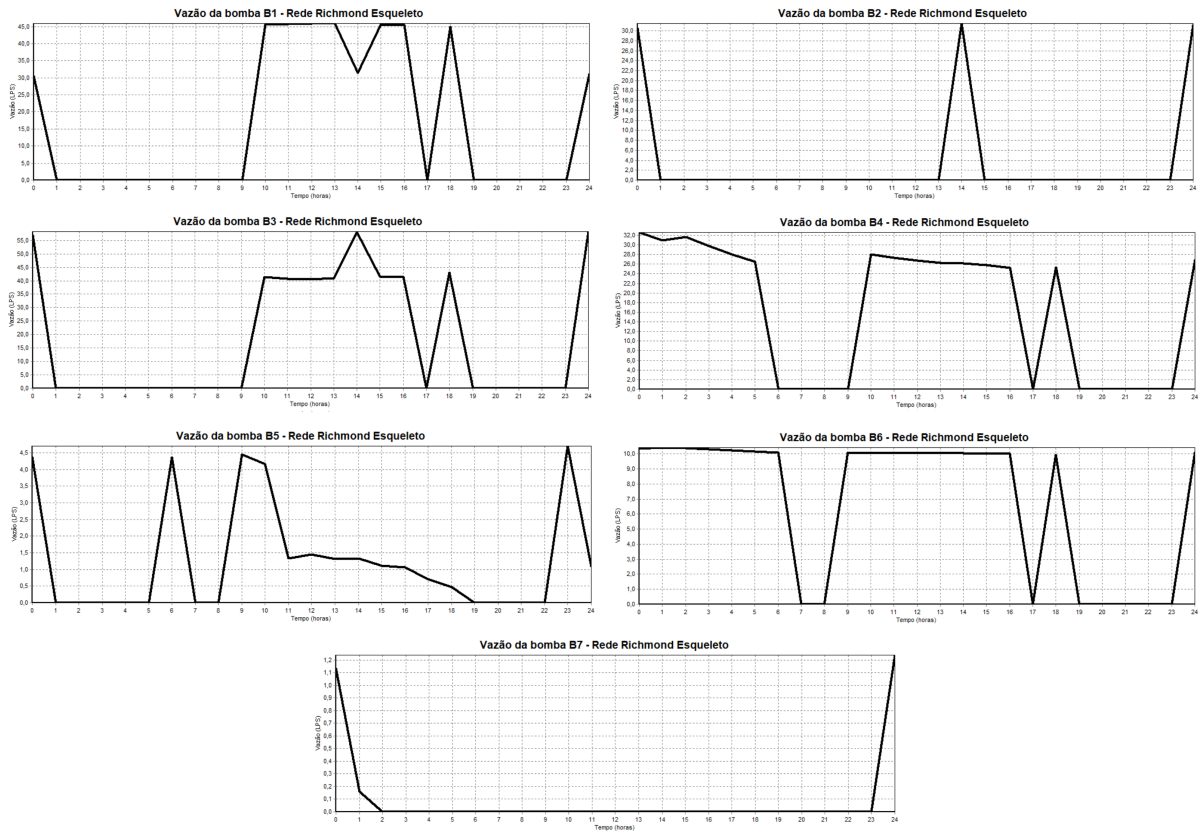


Figura 4.35 – Vazão das bombas - Rede Richmond Esqueleto.

A seguir são apresentados os resultados para a Rede Richmond Esqueleto ao utilizar a HCVF, com $\Delta = 0,9$.

O custo energético diário para a Rede Richmond Esqueleto retornado pelo EPANET após aplicar a HCVF à solução encontrada pela abordagem de solução proposta, ou seja, MM+HCPN+HCVF, foi de \$15310,74.

As Figuras 4.36, 4.37, 4.38 e 4.39 indicam os períodos em que as bombas estão ligadas, a altura da água nos reservatórios, o balanço de vazão da rede e a vazão das bombas na solução encontrada através do MM+HCPN+HCVF.

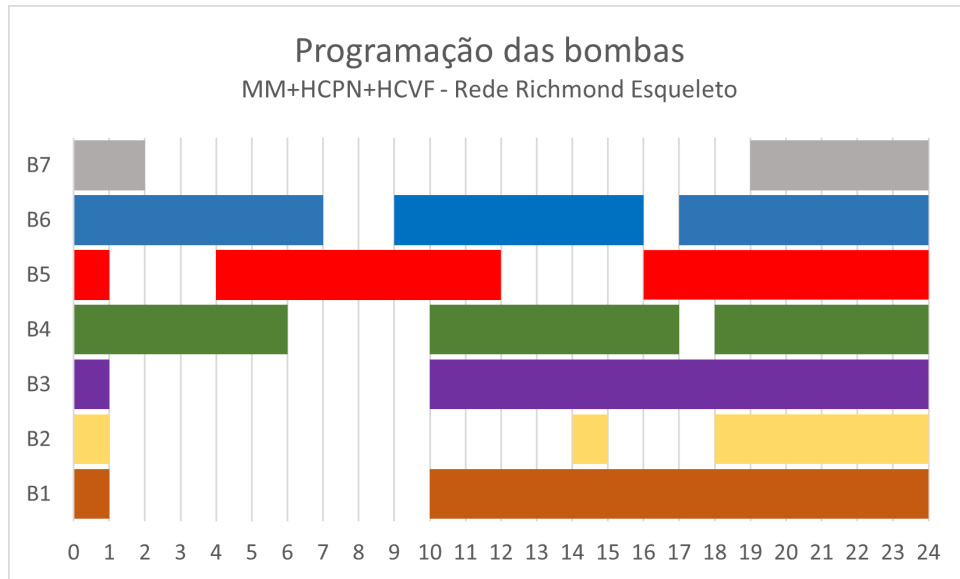


Figura 4.36 – Programação das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto.

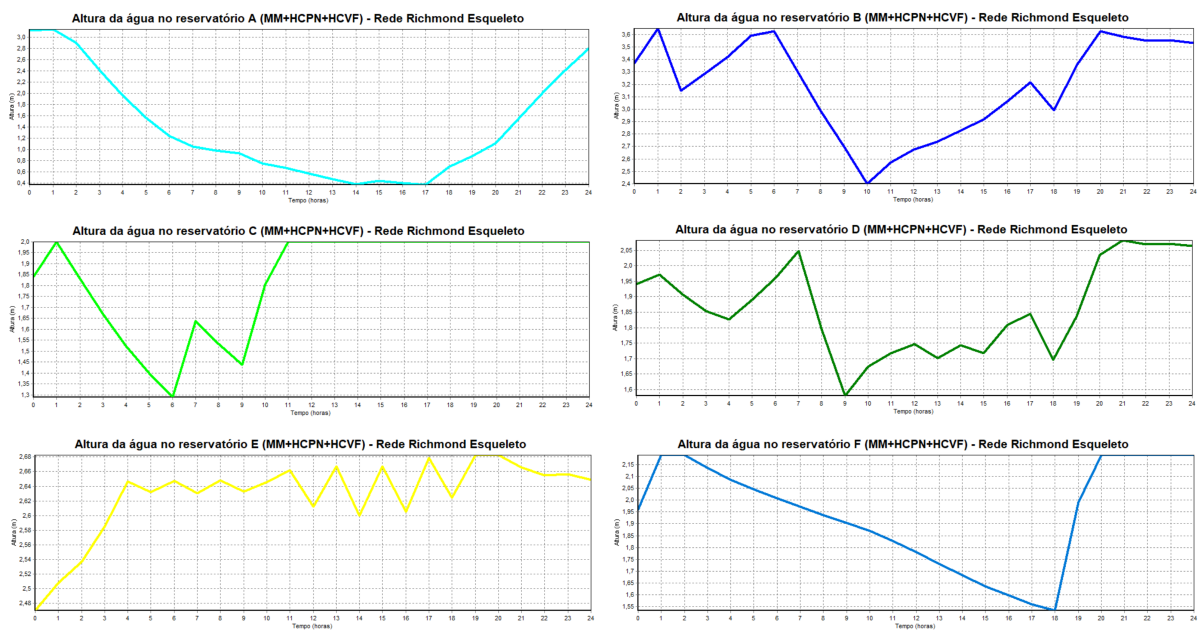


Figura 4.37 – Altura da água nos reservatórios (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto.

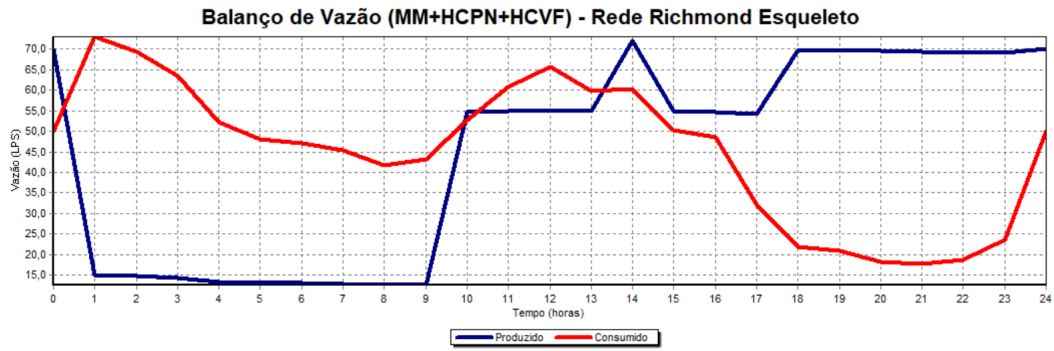


Figura 4.38 – Balço de vazão (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto.

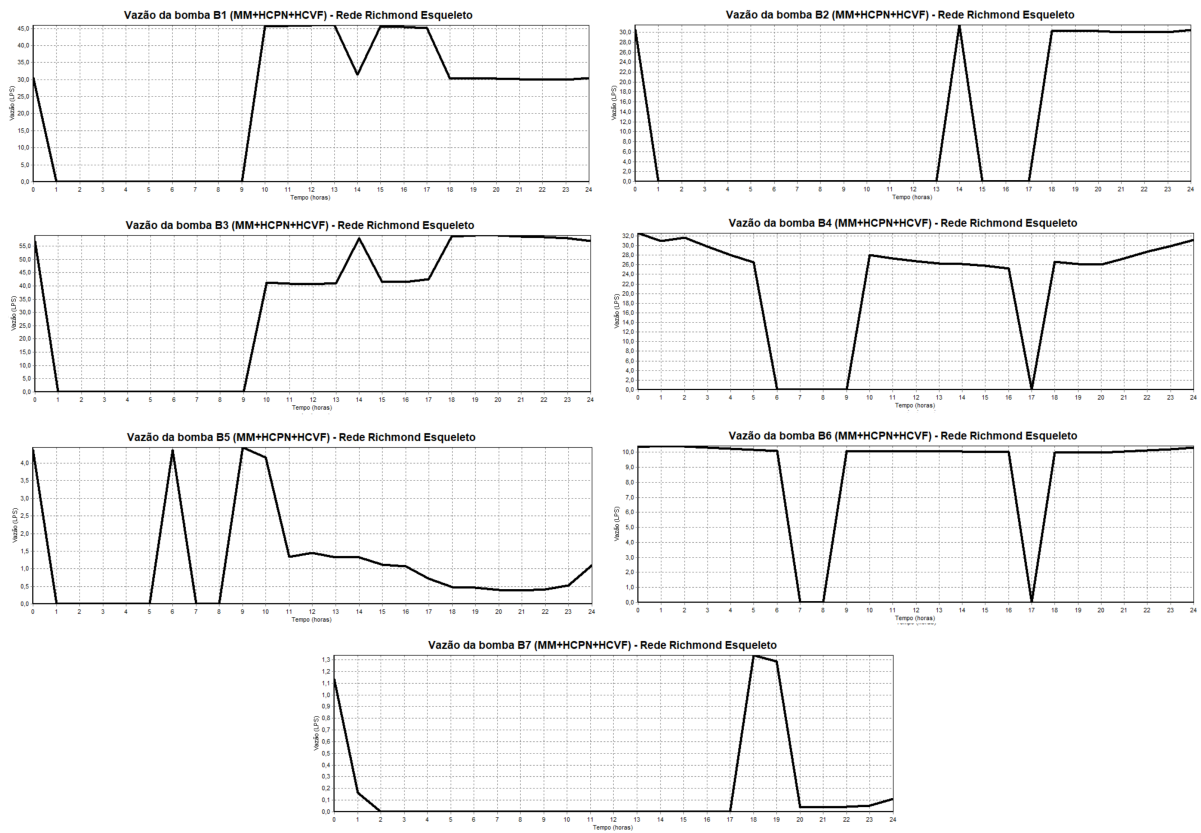


Figura 4.39 – Vazão das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto.

O sistema mantém todas as bombas ligadas nos últimos períodos do horizonte de planejamento de forma a cumprir a porcentagem Δ indicada para o volume mínimo dos reservatórios ao final do horizonte de planejamento (Figura 4.36). Porém, para a rede em questão, os últimos períodos correspondem aos períodos fora de ponta, onde a energia é mais barata.

Os reservatórios A, B, D e F passam a armazenar mais água nos últimos períodos do horizonte de planejamento (Figura 4.37), diferente do que havia acontecido sem o uso da HCVF (Figura 4.33). Como estes reservatórios possuem seus níveis iniciais de água altos, o uso da HCVF gera um acréscimo de 69,32% nos custos com energia quando comparada a solução sem o uso da heurística, o que indica que nem sempre é vantajoso manter os estoques de água altos

para o dia seguinte, podendo ser menos onerosa a operação das bombas. Porém, a HCVF cumpre seu papel nos testes com a rede, estocando água para facilitar a operação de um novo horizonte de planejamento.

O último reservatório a atingir o volume mínimo determinado através da HCVF é o reservatório A, sendo o maior responsável pelo aumento nos custos com energia elétrica da solução que utiliza a HCVF em relação a solução sem a heurística. Isto ocorre por conta de sua localização e função na rede, que; apesar de abastecer diretamente apenas alguns nós de demanda; este é a única passagem de água da fonte até os reservatórios C, D, E e F; que são responsáveis por abastecer a maior parte da demanda do sistema. Assim, tem-se que manter o estoque de água alto no reservatório A é uma garantia de atendimento de grande parte do sistema, porém com grandes custos relacionados a energia elétrica. Desse modo, conclui-se que o volume de água dos reservatórios está diretamente relacionado aos custos com energia dos sistemas de abastecimento de água.

Na Figura 4.38 observa-se que a demanda dos primeiros períodos continua sendo abastecida pela água previamente armazenada nos reservatórios, mas que, ao final dos períodos em que ocorrem os picos de demanda, há uma maior captação, chegando ao final do horizonte de planejamento com um maior estoque de água, o que aumenta os custos com energia da rede. Há o aumento da vazão de todas as bombas nos últimos períodos do horizonte de planejamento (Figura 4.39), de modo a atingir os volumes dos reservatórios determinados pela HCVF, o que ocasiona o aumento dos custos com energia pois, quanto maior a vazão através da bomba, mais energia ela irá consumir.

4.3.1.1 Análise dos resultados - Rede Richmond Esqueleto

Trabalhos recentes não utilizam a Rede Richmond Esqueleto descrita pelo arquivo de dados de Exeter (2010). Abdelsalam e Gabbar (2021) apresenta um custo de \$2394,2 para a Rede Richmond Esqueleto, porém com custos e volumes iniciais diferentes dos descritos em Exeter (2010), além de não disponibilizar o arquivo de dados da rede utilizada.

4.3.1.1.1 Rede Richmond Esqueleto 2

Trabalhos como o de Vieira et al. (2020) e Shao et al. (2024) realizaram testes com a Rede Richmond Esqueleto permitindo a alteração do volume inicial da rede. Com isso, os próximos testes para a rede foram realizados com o arquivo de dados extraído da página do Professor Doutor Leandro Callegari Coelho da *Université Laval*, Canadá (COELHO, 2020), que indica ser o arquivo de utilizado no trabalho de Vieira et al. (2020). Este difere do arquivo de Exeter (2010) em relação ao volume inicial dos reservatórios, descritos na Tabela 4.11; e no número de iterações para o EPANET, que é de 200. A título de organização, tal rede será chamada neste trabalho de Rede Richmond Esqueleto 2.

Tabela 4.11 – Volumes inicial dos reservatórios - Rede Richmond Esqueleto 2.

Reservatório	Volume inicial (em m^3)	Volume inicial (em m^3) de Exeter (2010)
A	234,24	321,76
B	71,85	102,06
C	7,18	25,65
D	107,28	51,82
E	50,07	18,68
F	8,87	6,97

As soluções obtidas para o custo diário com energia elétrica para a Rede Richmond Esqueleto 2 foram de \$116,54 e \$166,00 através do MM+HCPN e MM+HCPN+HCVF, respectivamente. [Vieira et al. \(2020\)](#) e [Shao et al. \(2024\)](#) obtiveram custos para a rede de \$105,75 e \$102,15, respectivamente; porém, ambos não apresentam seus resultados para a operação e vazões das bombas, e nem os volumes de seus reservatórios; não sendo possível determinar se suas soluções estão nas mesmas condições que as obtidas através da metodologia proposta neste trabalho. Além disso, assim como para outras redes, [Vieira et al. \(2020\)](#) e [Shao et al. \(2024\)](#) possuem modelos matemáticos de difíceis resoluções e que necessitam de linearizações para a obtenção de uma solução; enquanto o modelo matemático proposto neste trabalho é linear e de simples resolução, em que a solução é encontrada em 2,18 segundos e validada quase que instantaneamente pelo EPANET.

A seguir são apresentadas as soluções obtidas para a Rede Richmond Esqueleto 2 através do MM+HCPN e MM+HCPN+HCVF.

A Figura 4.40 indica os períodos em que as bombas estão ligadas na solução encontrada pelo modelo matemático proposto junto com a HCPN, em que o período 0 corresponde às 7h, início da simulação, para a Rede Richmond Esqueleto 2; a Figura 4.41 apresenta a altura da água nos reservatórios, em metros, a cada período; a Figura 4.42 apresenta o balanço de vazão da rede (em litros/segundo); e a Figura 4.43 apresenta as vazões das bombas ao longo do horizonte de planejamento (em litros/segundo).

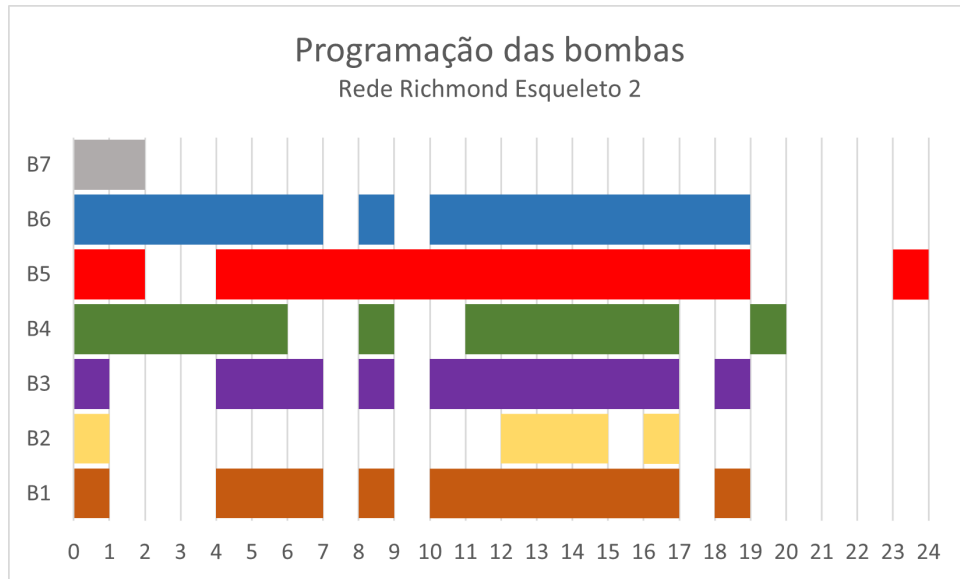


Figura 4.40 – Programação das bombas - Rede Richmond Esqueleto 2.

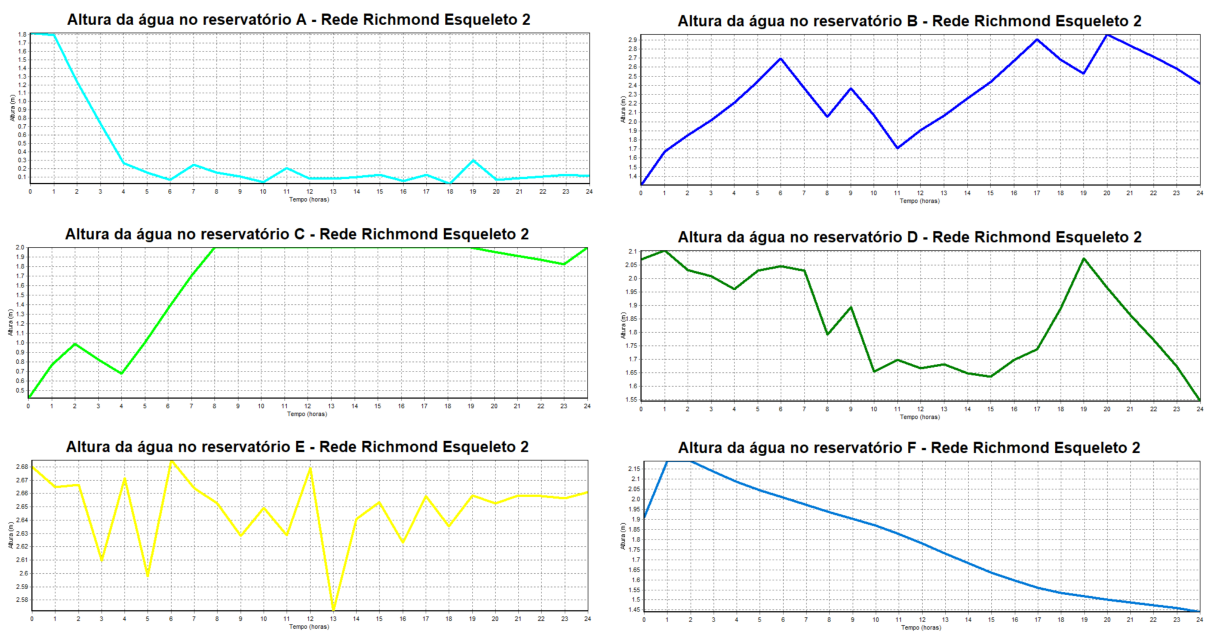


Figura 4.41 – Altura da água nos reservatórios - Rede Richmond Esqueleto 2.

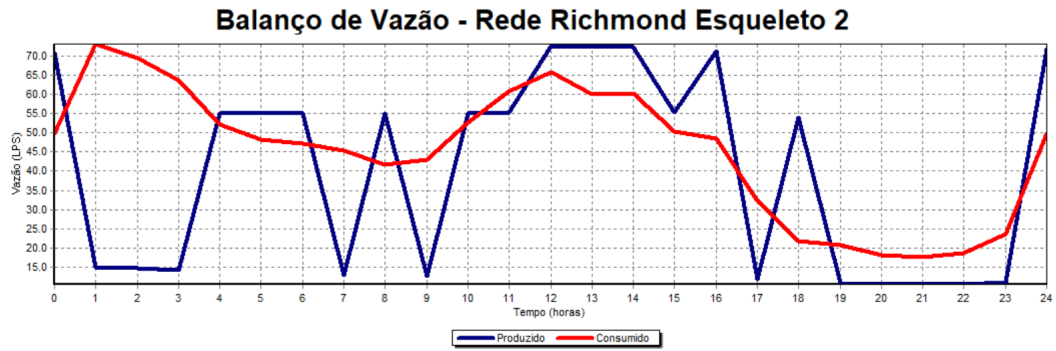


Figura 4.42 – Balanço de vazão - Rede Richmond Esqueleto 2.

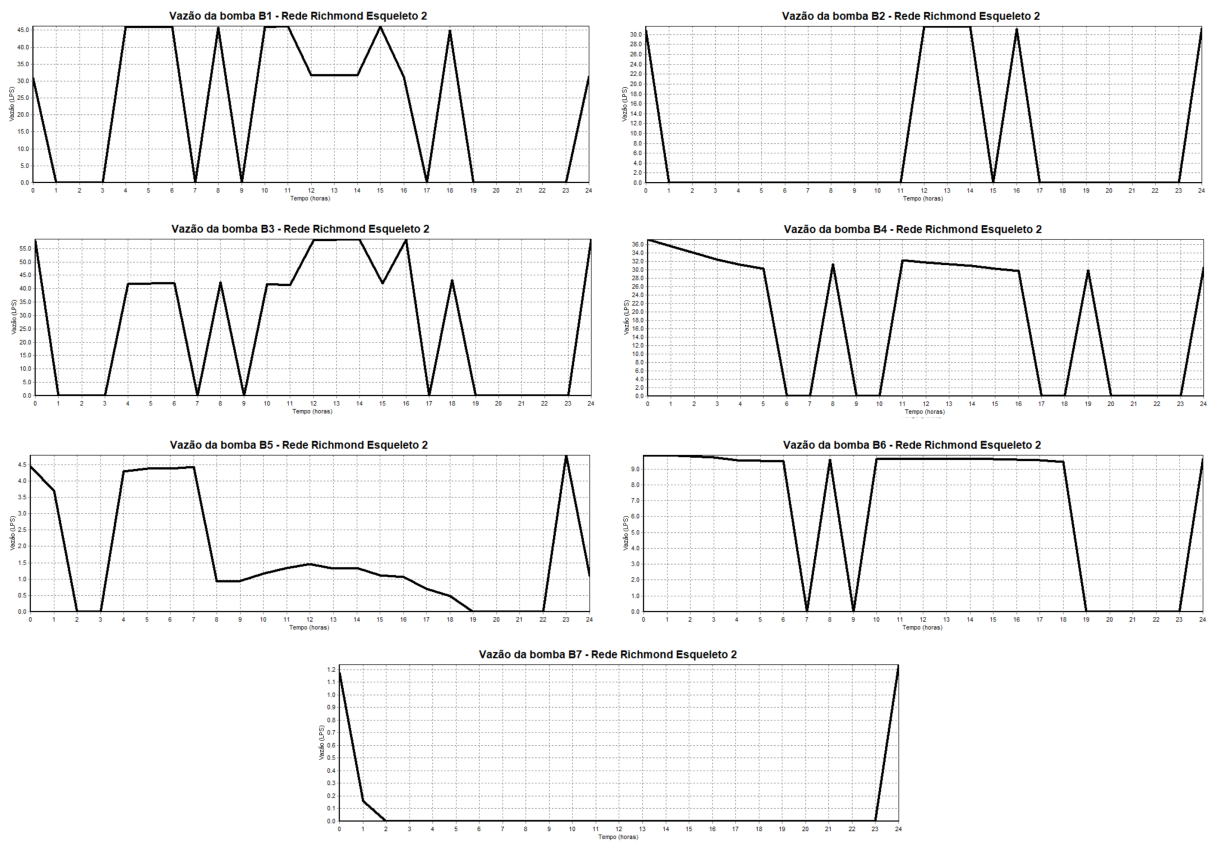


Figura 4.43 – Vazão das bombas - Rede Richmond Esqueleto 2.

Na Figura 4.40, nota-se que o sistema mantém as bombas ligadas por vários períodos de ponta seguidos (período 0 ao 17), de modo a abastecer a alta demanda dos nós consumidores nestes, atendendo aos requisitos de pressão da rede e o volume dos reservatórios. O maior número de períodos em que as bombas estão ligadas no início do horizonte de planejamento em relação as soluções encontradas para a Rede Richmond Esqueleto ocorre pelos níveis iniciais de água nos reservatórios serem menores para a Rede Richmond Esqueleto 2. Assim, não é possível atender as demandas nestes períodos apenas com a água previamente estocada sem que haja problemas com a pressão, havendo uma maior captação de água nestes períodos (Figura 4.42) em comparação com as soluções que não utilizam a HCVF.

Na Figura 4.41 observa-se que a maioria dos reservatórios reduzem seus níveis de água ao final do horizonte de planejamento, em concordância com a operação das bombas, que reduzem sua operação nos últimos períodos do horizonte de planejamento, em que a demanda é menor.

Assim como para a Rede Richmond Esqueleto, na Esqueleto 2 as maiores vazões estão associadas as bombas B1 e B3, de captação de transferências, respectivamente; e as bombas que se encontram próximas as extremidades da rede, B5 e B7, possuem menor vazão por serem responsáveis por enviar água para poucos nós de demanda (Figura 4.43).

A seguir são apresentados os resultados para a Rede Richmond Esqueleto 2 ao utilizar a HCVF, com $\Delta = 0,9$.

As Figuras 4.44, 4.45, 4.46 e 4.47 indicam os períodos em que as bombas estão ligadas, a altura da água nos reservatórios, o balanço de vazão da rede e a vazão das bombas na solução encontrada através do MM+HCPN+HCVF.

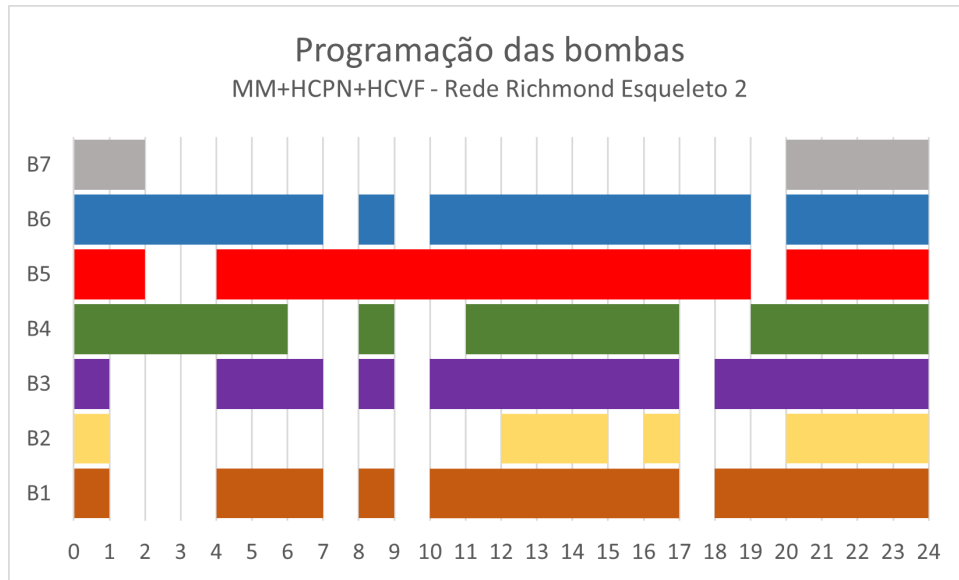


Figura 4.44 – Programação das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto 2.

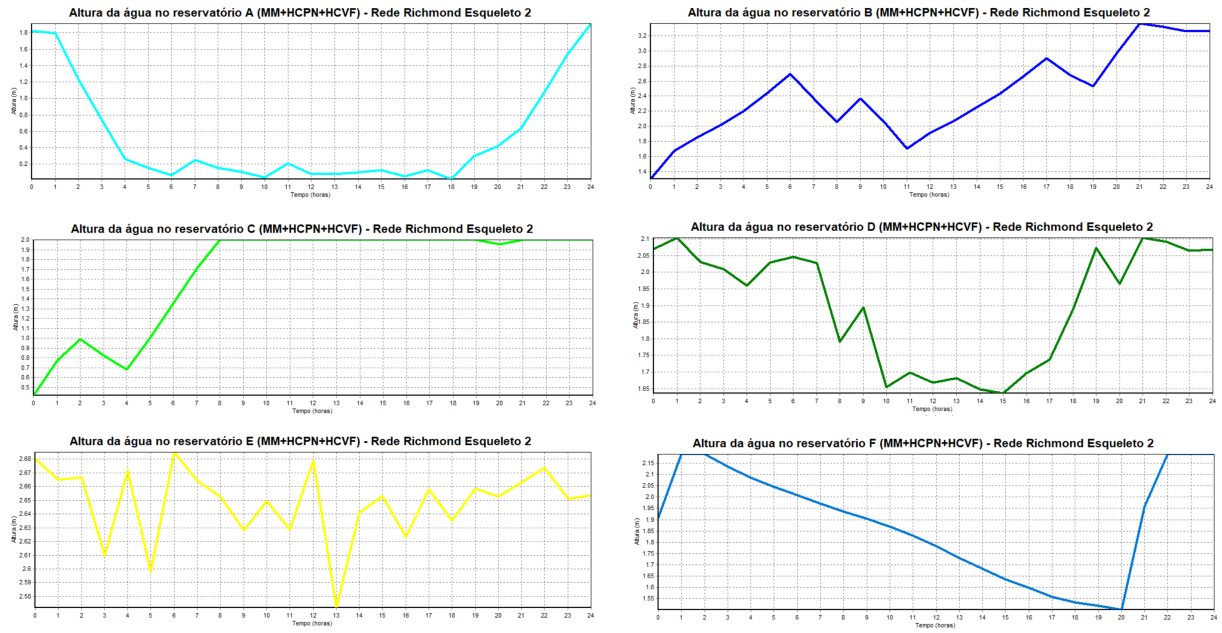


Figura 4.45 – Altura da água nos reservatórios (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto 2.

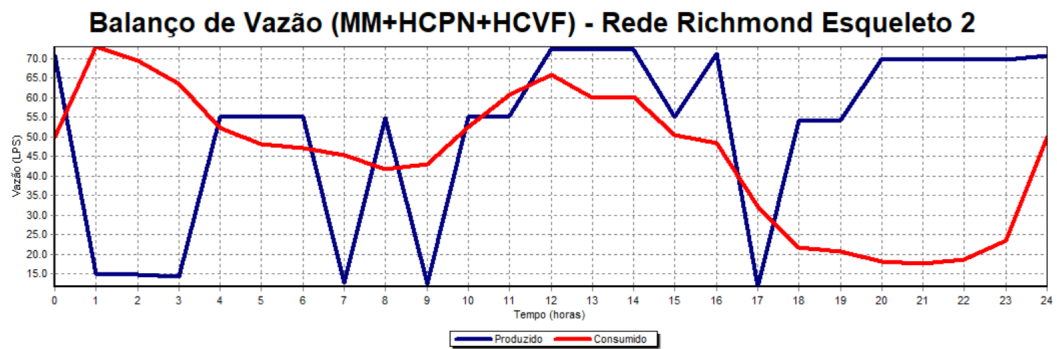


Figura 4.46 – Balanço de vazão (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto 2.

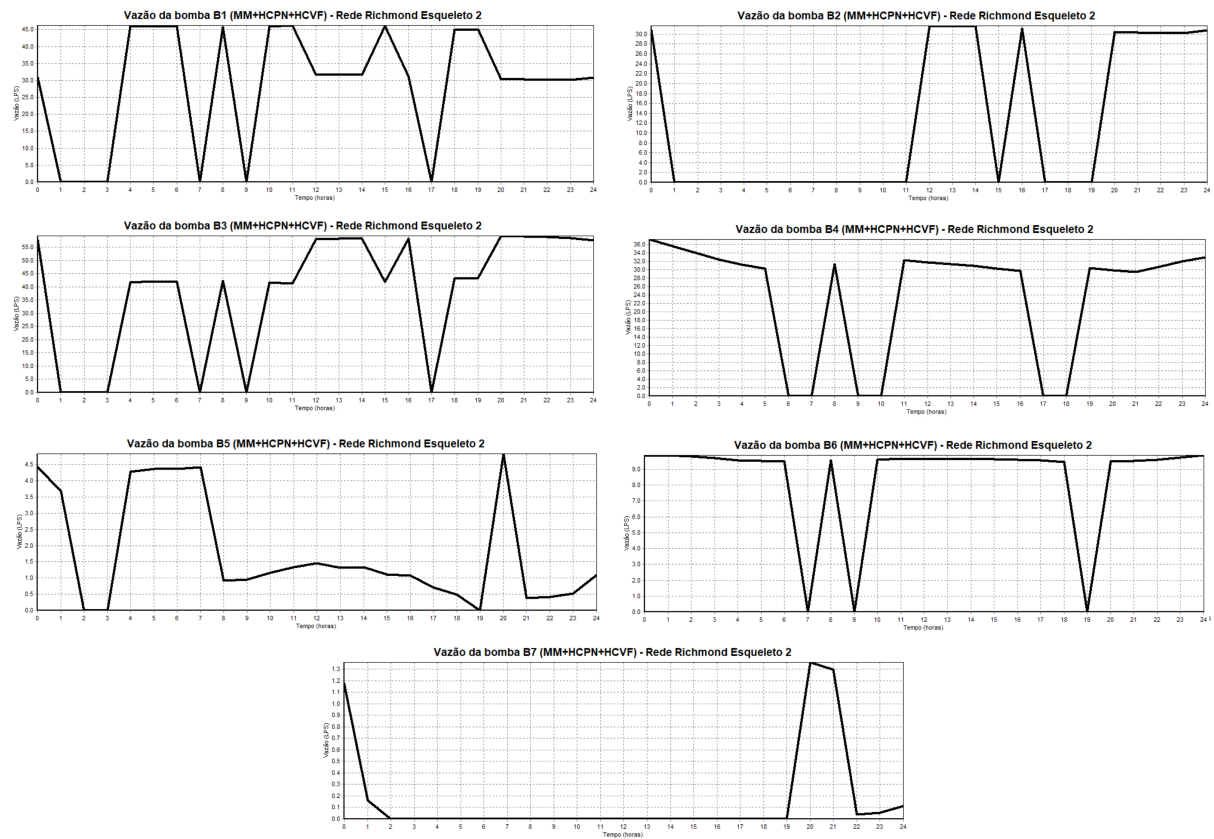


Figura 4.47 – Vazão das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond Esqueleto 2.

Na Figura 4.44 é possível observar o acionamento das bombas nos últimos períodos do horizonte de planejamento, de modo a realizar o armazenamento água nos reservatórios (Figura 4.45), ocasionando um maior custo com energia elétrica em relação a solução sem o uso da HCVF (cerca de 42,44%). Ainda assim, tal aumento é menor do que o encontrado na Rede Richmond Esqueleto pois, com os volumes iniciais mais baixos, a quantidade de água que deve ser armazenada ao final do último período também é menor, exigindo uma menor vazão das bombas (Figura 4.47) quando compara a solução de MM+HCPN+HCVF da Rede Richmond Esqueleto 2 para Richmond Esqueleto.

Já a Figura 4.46 indica um aumento na quantidade de água captada nos últimos períodos, havendo mais água do que o necessário para a demanda e os requisitos de pressão do sistema, sendo armazenada de forma a facilitar o abastecimento de um próximo horizonte de planejamento; e na Figura 4.47 observa-se o aumento da vazão de todas as bombas nos últimos períodos do horizonte de planejamento, de modo a atingir os volumes dos reservatórios determinados pela HCVF, o que ocasiona o aumento dos custos com energia.

Assim como para a Rede Richmond Esqueleto, na Rede Richmond Esqueleto 2 o último reservatório a atingir o volume mínimo determinado é o reservatório A, sendo o maior responsável pelo aumento nos custos com energia elétrica da solução que utiliza a HCVF em relação a solução sem esta heurística.

4.3.2 Rede Richmond

A Rede Richmond adota uma simulação de 24h, iniciando às 7h da manhã e finalizando às 7h da manhã do dia seguinte. Os períodos de ponta, onde a energia elétrica é mais cara, estão compreendidos entre às 7h e às 24h; e os períodos fora de ponta, compreendidos entre às 0h e às 7h, cujas tarifas são descritas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Tarifas de energia a cada hora para cada bomba - Rede Richmond.

Bomba	Tarifa nos períodos de ponta	Tarifa nos períodos fora de ponta
1 e 2	0,067945	0,024093
3	0,075350	0,024100
4	0,123400	0,024567
5	0,098660	0,024600
6	0,111950	0,024600
7	0,119400	0,024400

O rendimento de bombeamento global da rede é de 75%. Com isso, tem-se as vazões máximas por hora para os arcos que possuem bombas utilizadas no modelo matemático descritas na Tabela 4.13. Para os demais arcos, $(i, j) \in V \cup G$, a vazão máxima possui uma variação de $0,01 \text{ m}^3/h$ à $8465,34 \text{ m}^3/h$, de acordo com seu diâmetro.

Tabela 4.13 – Vazão máxima de cada bomba - Rede Richmond.

Bomba	Vazão máxima (em m^3/h)
1	144
2	162
3	245
4	260
5	17
6	40
7	20

Os volumes iniciais, mínimos e máximos para cada um dos reservatórios são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Volumes inicial, mínimo e máximo dos reservatórios - Rede Richmond.

Reservatório	Volume inicial (em m^3)	Volume mínimo (em m^3)	Volume máximo (em m^3)
A	401,55	108,43	433,73
B	171,97	46,56	186,26
C	31,47	8,55	34,21
D	100,54	27,33	109,35
E	46,15	12,56	50,26
F	9,10	2,54	10,17

A Rede de Richmond possui 13 padrões de consumo distintos, indicando a diferença de consumos entre os nós de junção, apresentados na Figura 4.48 para 24h, das 0h às 24h. Além

O custo energético diário para a Rede Richmond retornado pelo EPANET foi de \$26,46 através da solução encontrada para o liga/desliga das bombas pelo modelo matemático proposto. Porém, tal solução não é validada pelo EPANET, pois gera a ocorrência de pressões negativas, sendo necessário o uso da HCPN. Assim, a solução em que não há ocorrência de pressões irregulares, retorna um custo de \$33,93 através do EPANET. A solução é encontrada pelo modelo matemático em 71,6 segundos e validada quase que instantaneamente pelo EPANET.

A Figura 4.49 indica os períodos em que as bombas estão ligadas na solução encontrada pelo modelo matemático proposto junto com a HCPN, em que o período 0 corresponde às 7h, início da simulação. Nota-se nesta figura que as bombas permanecem ligadas por poucos períodos ao longo do horizonte de planejamento. Isto corre pois volume inicial de água dos reservatórios são próximos de seus volumes máximos, sendo possível abastecer grande parte da demanda e atender as exigências de pressão do sistema com a água previamente estocada.

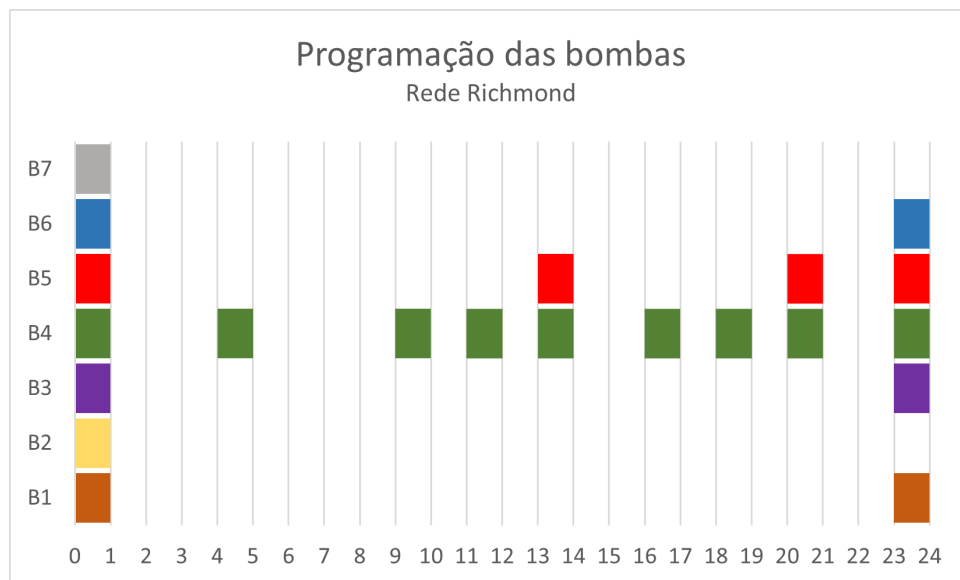


Figura 4.49 – Programação das bombas - Rede Richmond.

A Figura 4.50 apresenta a altura da água nos reservatórios, em metros, a cada período. Observa-se que reservatórios tendem a esvaziar ao longo do horizonte de planejamento, em concordância com a baixa operação das bombas.

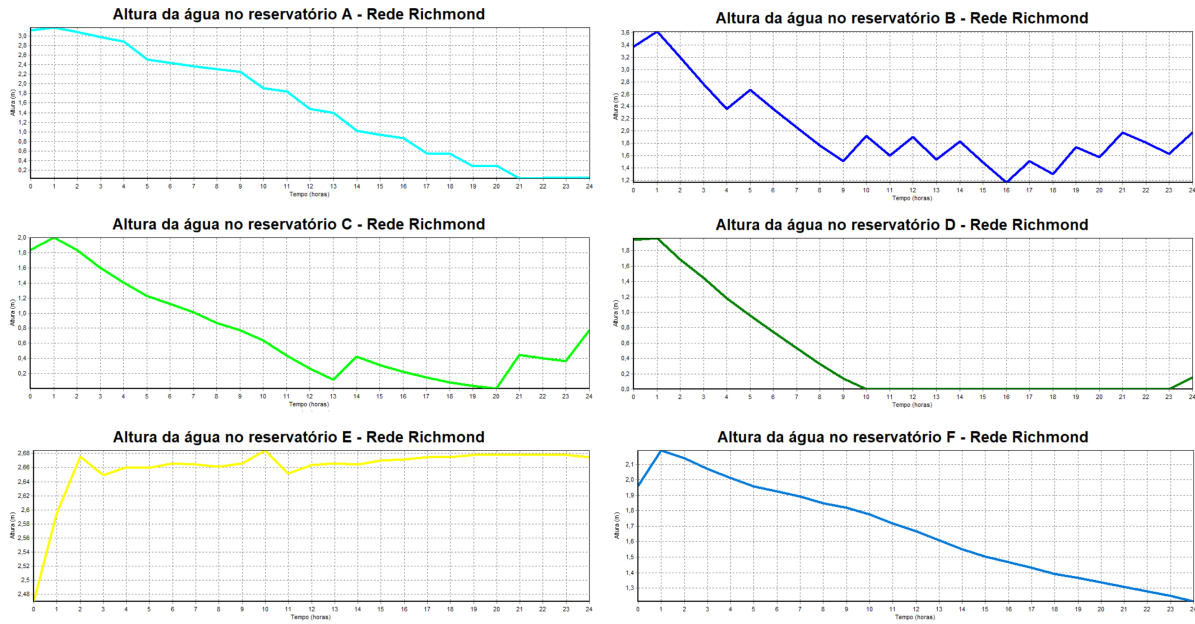


Figura 4.50 – Altura da água nos reservatórios - Rede Richmond.

A Figura 4.51 apresenta o balanço de vazão da rede (em litros/segundo), onde em grande parte do horizonte de planejamento não há captação de água pelo sistema, pois a demanda é abastecida pelo volumes iniciais dos reservatórios.

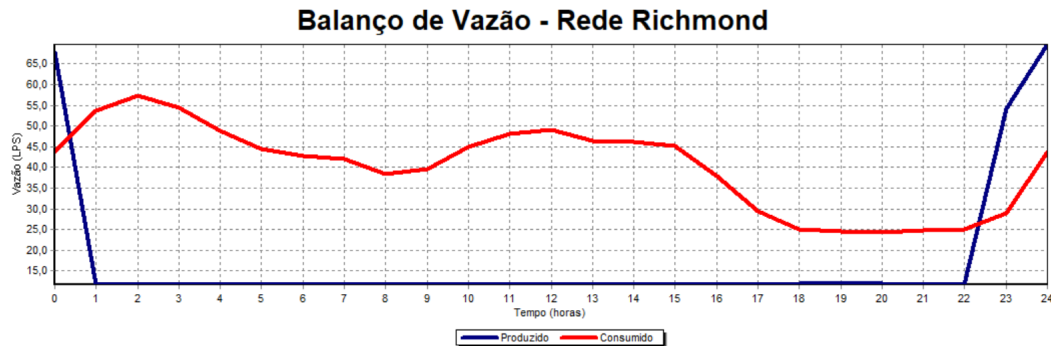


Figura 4.51 – Balanço de vazão - Rede Richmond.

A Figura 4.52 apresenta a vazão das bombas (em litros/segundo) ao longo do horizonte de planejamento, em que observa-se uma maior vazão associada a bomba B4, com vários picos ao longo dos períodos. Tal bomba se encontra no centro da rede, entre os pontos de captação e as demandas, sendo responsável por movimentar grandes volumes de água, abastecendo nós que possuem demanda e reservatórios.

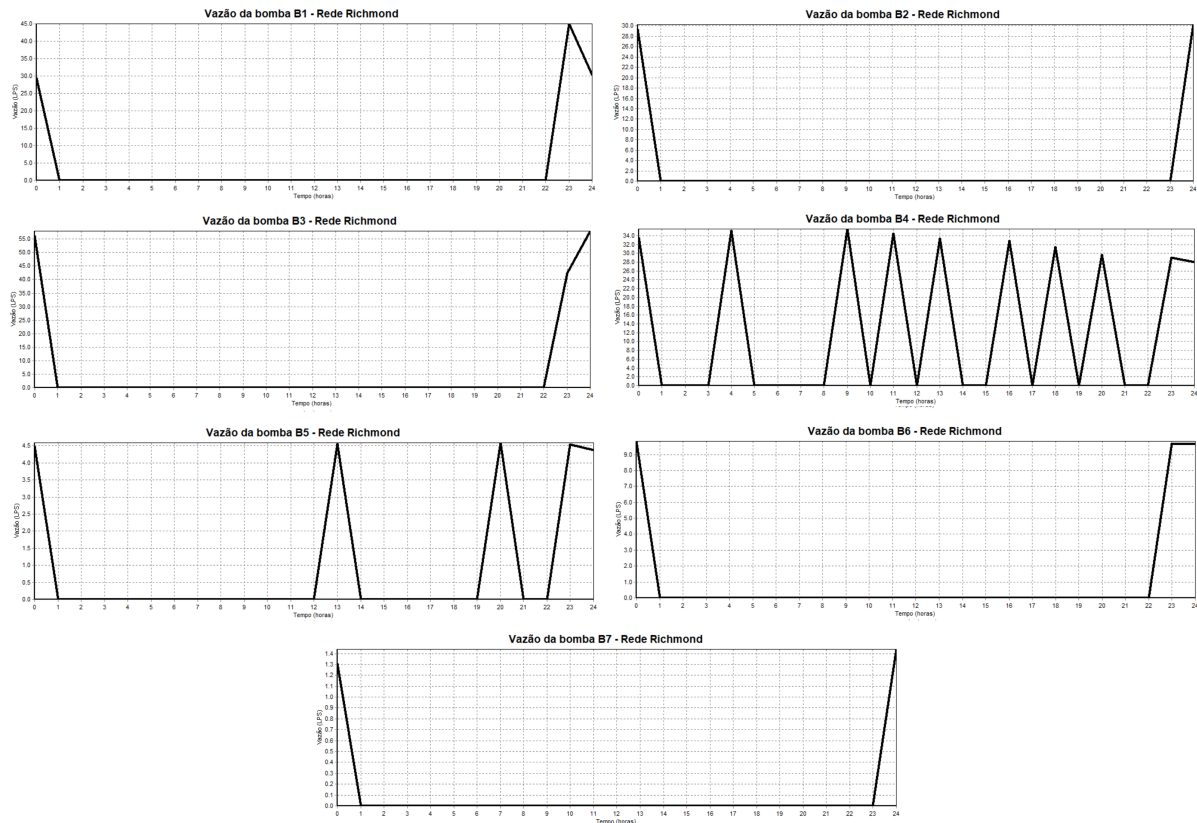


Figura 4.52 – Vazão das bombas - Rede Richmond.

A seguir são apresentados os resultados para a Rede Richmond ao utilizar a HCVF, com $\Delta = 0,9$.

Ao atingir o volume mínimo determinado para o último período através da HCVF, o EPANET gera advertências de falta de altura manométrica na bomba 4, ou seja, a bomba 4 não consegue fornecer energia suficiente para transportar a água até o ponto designado pelo sistema atendendo os requisitos de vazão e pressão. Com isso, a HCVF continuou a realizar seus acionamentos, com o objetivo de não obter nenhuma mensagem de advertência do EPANET. Ao final, tem-se que não é possível obter uma solução cujos volumes finais dos reservatórios estão próximos aos seus volumes iniciais, pois tem-se que todas as bombas estão ligadas durante todo o horizonte de planejamento e há a ocorrência de advertências pelo EPANET.

Foram, então, realizados novos testes utilizando a HCVF em que $\Delta = 0,85$, ou seja, o volume de cada reservatório no último período deve ser maior ou igual a 85% de seu volume inicial. Assim como no teste anterior, ao atingir o volume mínimo determinado para o último período através da HCVF, o EPANET gera advertências de falta de altura manométrica na bomba 4; e, ao seguir com os acionamentos, tem-se que não é possível obter uma solução cujos volumes finais dos reservatórios estão próximos aos seus volumes iniciais, pois temos que todas as bombas da rede estão ligadas durante todo o horizonte de planejamento e há a ocorrência de advertências pelo EPANET.

Assim, não é possível obter uma solução para a Rede Richmond cujos os volumes

finais dos reservatórios estejam próximos aos seus volumes iniciais sem que haja problemas relacionados a pressão na rede. Isto ocorre pois os volumes iniciais de todos os reservatórios se encontram próximos aos seus volumes máximos (entre 89% e 93% de suas capacidades máximas). As bombas possuem capacidade para atingir os volumes necessários para os reservatórios, porém a rede não comporta tal volume de água, o que gera os problemas com a pressão do sistema.

Podemos concluir que, nem sempre manter os níveis de água altos nos reservatórios é uma solução viável pois, mesmo facilitando o planejamento de um novo horizonte, além de aumentar os custos com energia elétrica para as empresas de abastecimento, o grande volume de água pode ocasionar problemas de pressões na rede, que podem impulsionar vazamentos e danificar equipamentos.

4.3.2.1 Análise dos resultados - Rede Richmond

Zyl, Savic e Walters (2004) apresentam um custo diário com energia elétrica de \$35,296 para Rede Richmond, sendo 3,87% maior do que a solução encontrada através do MM+HCPN, de \$33,93. Porém, Zyl, Savic e Walters (2004) não apresentam seus resultados para a operação e a vazão das bombas, e nem os volumes de seus reservatórios, não sendo possível determinar se sua solução se encontra nas mesmas condições que as soluções encontradas neste trabalho.

4.3.2.1.1 Rede Richmond 2

Vieira et al. (2020) realizaram testes com a Rede Richmond permitindo a alteração do volume inicial da rede. Com isso, os próximos testes para a rede foram realizados com a alteração do arquivo de Exeter (2010) de acordo com arquivo de dados extraído da página do Professor Doutor Leandro Callegari Coelho da *Université Laval*, Canadá (COELHO, 2020), que indica ser o arquivo de utilizado no trabalho de Vieira et al. (2020). Este difere em relação ao volume inicial dos reservatórios, descritos na Tabela 4.15. A título de organização, tal rede será chamada neste trabalho de Rede Richmond 2.

Tabela 4.15 – Volumes inicial dos reservatórios - Rede Richmond 2.

Reservatório	Volume inicial (em m^3)	Volume inicial (em m^3) de Exeter (2010)
A	216,22	401,55
B	168,91	171,97
C	34,21	31,47
D	87,07	100,54
E	49,89	46,15
F	8,13	9,10

As soluções encontradas para a Rede Richmond 2 através do MM+HCPN e do MM+HCPN+HCVF obtiveram custos diários com energia elétrica de \$67,70 e \$120,17, respectivamente. Vieira et al. (2020) obteve um custo diário com energia para a rede de \$86,41; porém,

como não apresenta seus resultados para a operação e vazões das bombas, e nem os volumes de seus reservatórios, não é possível determinar se sua solução se encontra nas mesmas condições das soluções propostas neste trabalho. Ainda assim, podemos descrever a simplicidade do modelo linear proposto em comparação ao proposto por [Vieira et al. \(2020\)](#), sem a necessidade de linearizações e de fácil resolução, em que a solução é encontrada em 52,83 segundos e validade quase que instantaneamente pelo EPANET.

A seguir são apresentadas as soluções obtidas para a Rede Richmond 2 através da MM+HCPN e MM+HCPN+HCVF.

A Figura 4.53 indica os períodos em que as bombas estão ligadas na solução encontrada pelo modelo matemático proposto junto com a HCPN, em que o período 0 corresponde às 7h, início da simulação, para a Rede Richmond 2; a Figura 4.54 apresenta a altura da água nos reservatórios, em metros, a cada período; a Figura 4.55 apresenta o balanço de vazão da rede (em litros/segundo); e a Figura 4.56 apresenta as vazões das bombas ao longo do horizonte de planejamento (em litros/segundo).

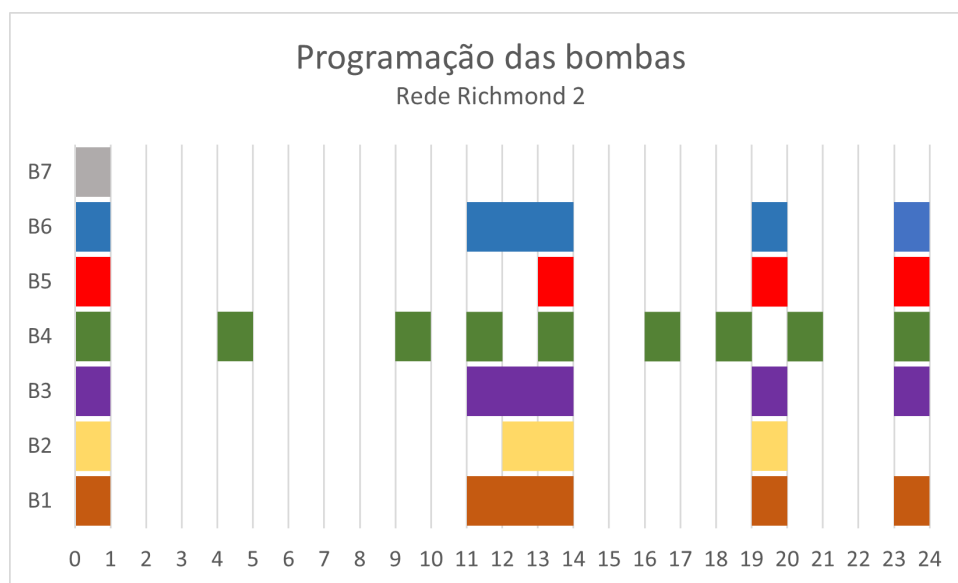


Figura 4.53 – Programação das bombas - Rede Richmond 2.

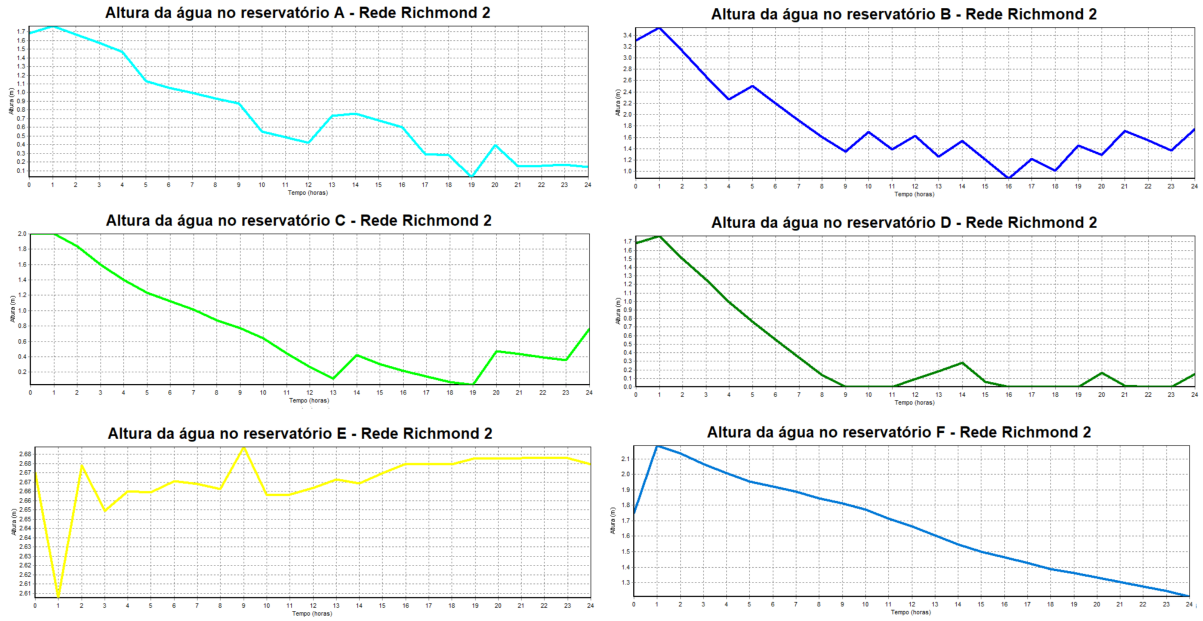


Figura 4.54 – Altura da água nos reservatórios - Rede Richmond 2.

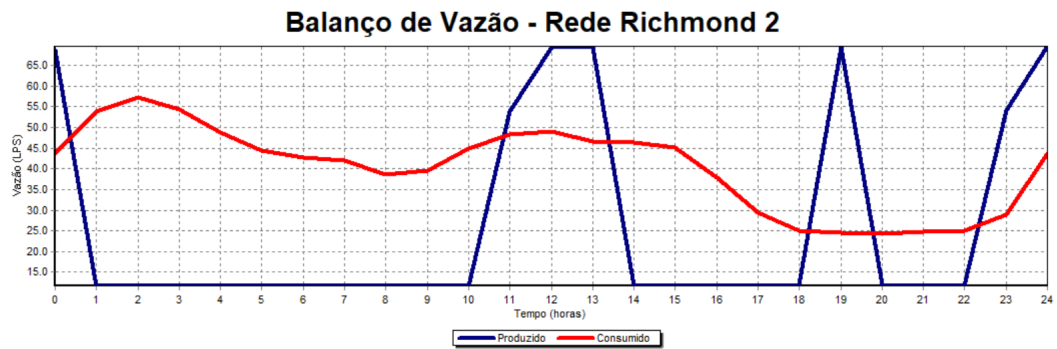


Figura 4.55 – Balanço de vazão - Rede Richmond 2.

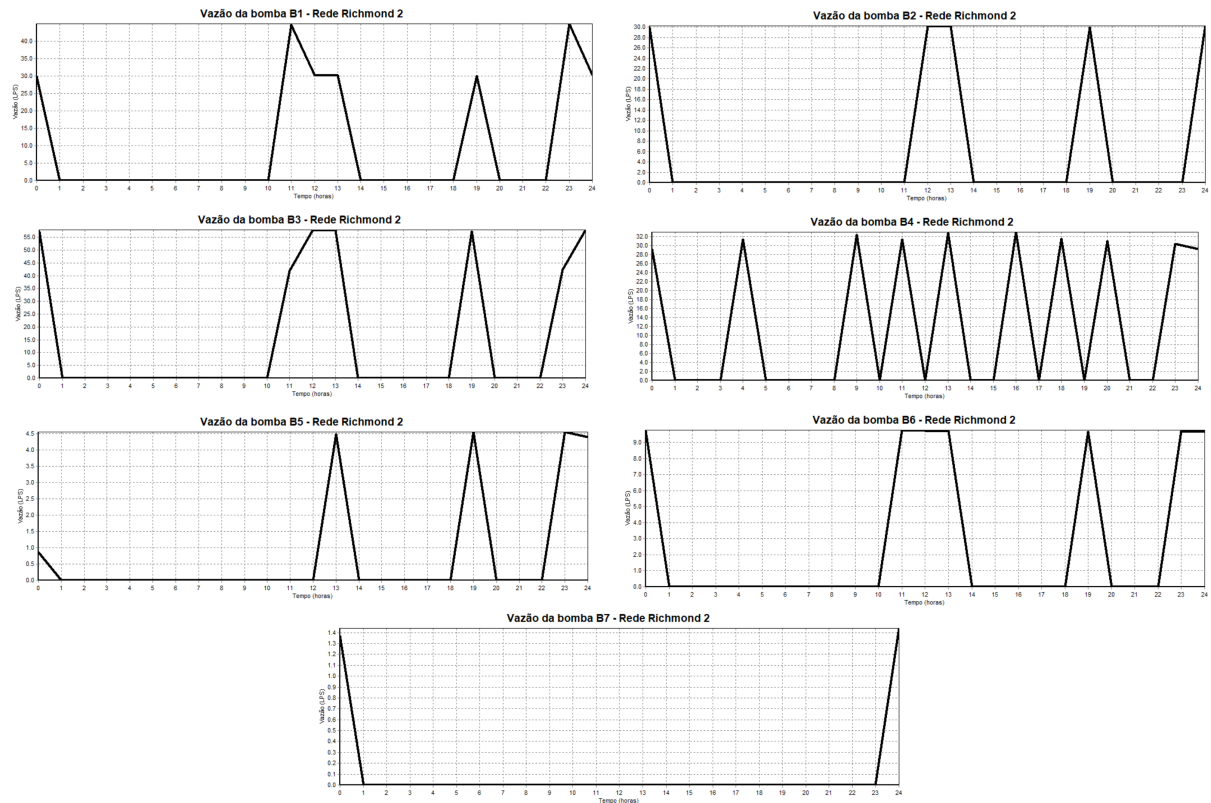


Figura 4.56 – Vazão das bombas - Rede Richmond 2.

Na Figura 4.53, nota-se que o sistema evita manter as bombas ligadas durante os períodos de ponta (período 0 ao 17), mas não deixa de utilizá-las, de modo a abastecer a alta demanda dos nós consumidores nestes, atendendo aos requisitos de pressão e volume dos reservatórios. Além disso, esta difere da solução para a Rede Richmond, havendo um maior número de acionamentos para as bombas 1, 2, 3 e 6; indicando que alterações nos volumes iniciais alteram a operação das bombas.

Na Figura 4.54 observa-se que apenas o reservatório E não reduz seu nível de água ao final do horizonte de planejamento, em concordância com a operação das bombas. Já na Figura 4.55 vê-se picos de captação nos mesmos períodos em que a maioria das bombas estão em funcionamento.

Assim como para a Rede Richmond, a Figura 4.56 apresenta uma maior vazão associada a bomba B4, com vários picos ao longo dos períodos, pois é responsável por movimentar grandes volumes de água, abastecendo nós que possuem demanda e reservatórios.

A seguir são apresentados os resultados para a Rede Richmond 2 ao utilizar a HCVF, com $\Delta = 0,9$.

As Figuras 4.57, 4.58, 4.59 e 4.60 indicam os períodos em que as bombas estão ligadas, a altura da água nos reservatórios, o balanço de vazão da rede e a vazão das bombas na solução encontrada através do MM+HCPN+HCVF.

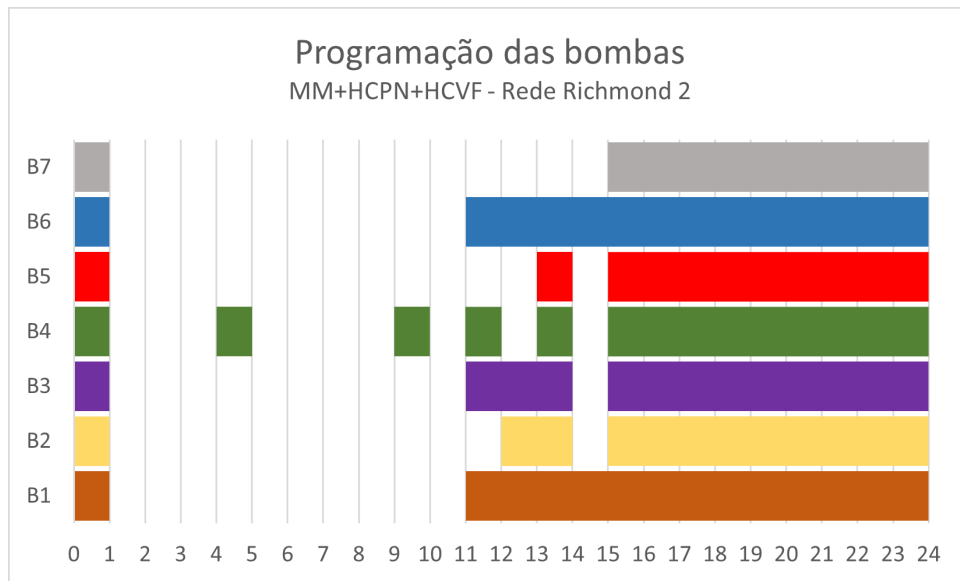


Figura 4.57 – Programação das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond 2.

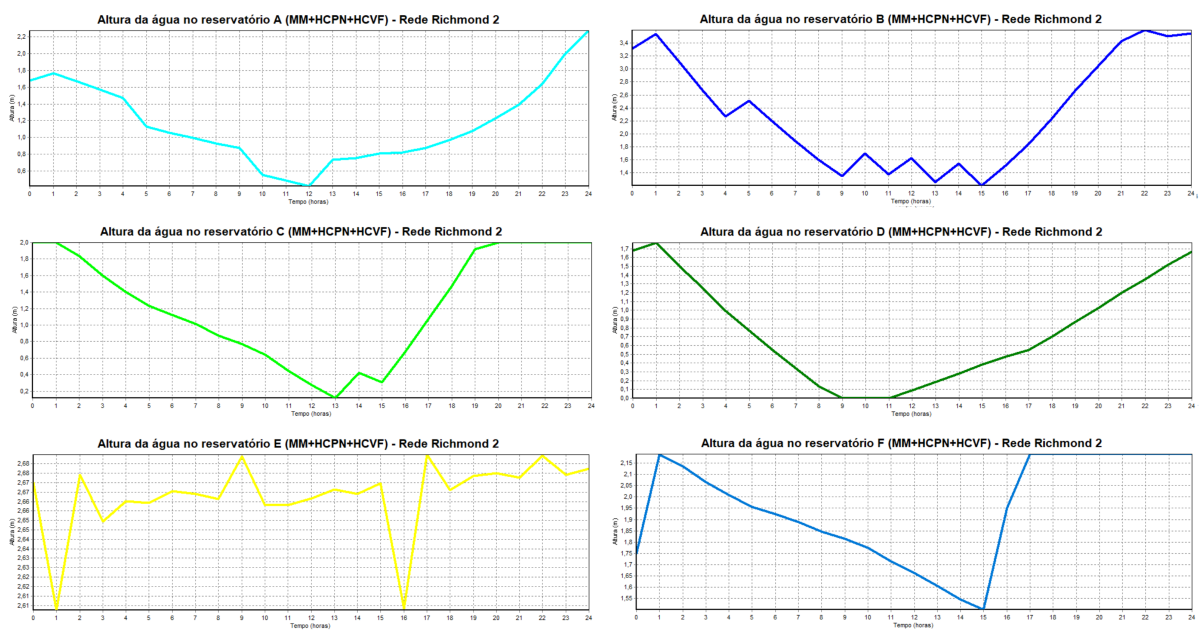


Figura 4.58 – Altura da água nos reservatórios (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond 2.

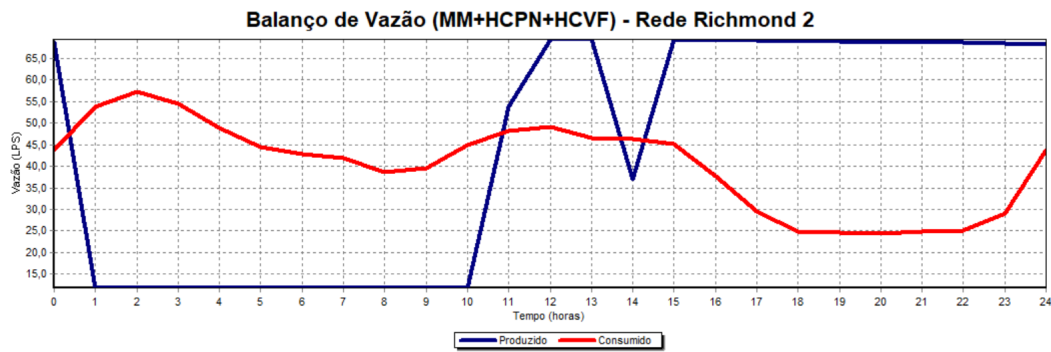


Figura 4.59 – Balanço de vazão (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond 2.

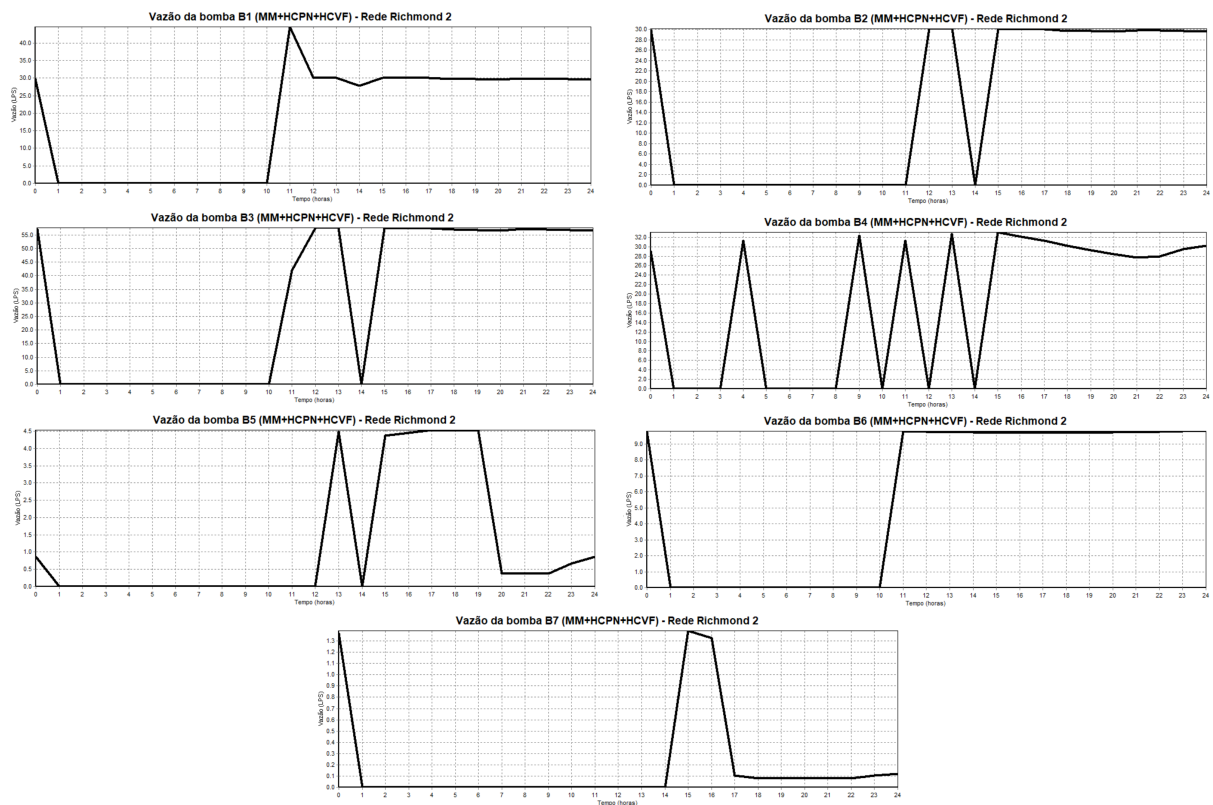


Figura 4.60 – Vazão das bombas (MM+HCPN+HCVF) - Rede Richmond 2.

Observa-se o acionamento das bombas nos últimos períodos do horizonte de planejamento (Figura 4.57), de modo a realizar o armazenamento água nos reservatórios (Figura 4.58), ocasionando um maior custo com energia elétrica em relação a solução sem o uso da HCVF. Ao utilizar a HCVF, o último reservatório a atingir o volume mínimo determinado é o reservatório D, sendo o maior responsável pelo aumento nos custos com energia elétrica na solução com a HCVF em relação a solução que não utiliza a heurística para a Rede Richmond 2. Além disso, esta difere das variações da Rede Richmond Esqueleto, em que o último reservatório a atingir o volume mínimo é o reservatório A, exaltando a diferença hidráulica entre as redes.

A Figura 4.59 indica um aumento na quantidade de água produzida nos últimos períodos, havendo uma diferença maior em relação ao consumo ao final do horizonte de planejamento, e

na Figura 4.60 nota-se o aumento da vazão nos últimos períodos para todas as bombas, de forma a satisfazer as condições dos volumes da HCVF.

Ao concluir a análise sobre os testes numéricos, os resultados obtidos revelam uma abordagem de solução promissora, com resultados consistentes e competitivos em comparação a outras abordagens da literatura. O modelo matemático encontrou soluções de forma simples e rápida, e as heurísticas propostas mostraram-se eficazes para as redes em questão, apresentando um bom desempenho, inclusive em instâncias de maior complexidade.

No próximo capítulo são apresentadas as considerações finais deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um modelo matemático de programação linear inteiro misto para minimizar os custos com energia elétrica resultantes da operação das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água que considera o sistema como uma rede orientada, de modo que seus componentes são definidos como nós e arcos, obtendo, assim, um modelo mais próximo da realidade dos sistemas de abastecimento e viável de aplicação em redes malhadas reais. Tal modelo tem como vantagem tratar-se de um modelo linear de fácil resolução por *solvers* comerciais, cujas soluções são encontradas de forma rápida.

Uma abordagem de solução é proposta através uso do *software* EPANET para simular e validar as soluções obtidas através do modelo matemático. Caso a solução não seja validada, a abordagem faz uso da Heurística de Correção de Pressões Negativas (HCPN), proposta neste trabalho, para corrigir as pressões irregulares e obter uma solução validada pelo EPANET. Além disso, é proposta a Heurística de Correção de Volumes Finais (HCVF), que tem por objetivo aproximar os volumes finais dos reservatórios aos seus volumes iniciais, de modo a facilitar o planejamento de um próximo horizonte.

Testes numéricos realizados a Mini Rede de VanZyl (ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004), a Rede de Florianópolis (VIEIRA et al., 2020), e as Redes Richmond Esqueleto e Richmond (ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004), além de suas variações; e indicam o potencial do modelo de otimização juntamente com a abordagem de solução propostos para os casos em questão, em que foram obtidas soluções competitivas com as da literatura. Também através dos resultados obtidos ressalta-se a importância da disponibilização dos dados das redes, pois os resultados demonstram que pequenas alterações em suas condições iniciais causam grandes diferenças nas soluções obtidas.

Trabalhos futuros podem ser realizados através do aperfeiçoamento das heurísticas HCPN e HCVF, de forma a se obter um menor número de acionamentos das bombas mas gerando soluções com pressões regulares para a rede e com os volumes finais dos reservatórios próximos aos seus volumes iniciais, respectivamente. Também podem ser realizados testes utilizando outros *solvers* livres, já que o utilizado neste trabalho necessita de uma licença, pois a biblioteca do EPANET no Python, a WNTR, pode ser utilizada junto com outros solucionadores.

Além disso, a abordagem de solução proposta pode ser utilizada para outros modelos matemáticos de otimização da programação das bombas, de modo a validar suas soluções; pois, como existem literaturas que não utilizam o EPANET, nestas não há garantia de que a solução encontrada para a operação das bombas atenda aos requisitos hidráulicos da rede, lacuna que pode ser resolvida através da abordagem apresentada neste trabalho por meio da HCPN. Também é possível utilizar a HCVF em soluções da literatura, de forma a obter soluções em que

os volumes finais dos reservatórios estejam próximos aos iniciais, já que essa é uma condição importante para o funcionamento a longo prazo nos sistemas de abastecimento reais.

5.1 Trabalhos Publicados

MIQUELIN, L. M.; SOLER, E. M.. Otimização linear e heurística de correção de pressões negativas para minimizar os custos em sistemas de abastecimento de água. *Caderno de trabalhos completos e resumos do VII ERMAC – Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional*, Bauru/SP, 2024.

MIQUELIN, L. M.; SANTOS, M. O.; FURLAN, M. M.; SOLER, E. M.. Mathematical Model with Pressure Constraints to Minimize Electric Energy Costs in the Operation of Hydraulic Pumps. *IEEE Latin America Transactions*, v.21, p.483-489, 2023.

BELLO, B. R.; MIQUELIN, L. M.; FACCIOLI, A. R.; SOLER, E. M.. Aplicação de uma heurística construtiva no problema de minimização dos custos de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. *Anais do XXX Simpósio de Engenharia de Produção*, Bauru/SP, 2023.

OLIVEIRA, A. M. A.; FACCIOLI, A. R.; MIQUELIN, L. M.; SOLER, E. M.. Análise de um modelo para otimização energética em sistemas de distribuição de água. *Biodiversidade, meio ambiente e desenvolvimento sustentável*, ed.5, p.120-133, 2023.

MIQUELIN, L. M.; SOLER, E. M.. Planejamento operacional das bombas em sistemas de abastecimento de água através de um modelo de otimização de fluxo em redes associado ao software EPANET. *Anais do X Simpósio de Engenharia de Produção*, Rio de Janeiro/RJ, 2022.

BELLO, B. R.; MIQUELIN, L. M.; FACCIOLI, A. R.; SOLER, E. M.. Simulação de um modelo de programação inteira mista e de uma heurística para otimização energética em sistemas de distribuição de água. *Anais do XXIX Simpósio de Engenharia de Produção*, Bauru/SP, 2022.

OLIVEIRA, A. M. A.; MIQUELIN, L. M.; FACCIOLI, A. R.; SOLER, E. M.. Análise de um modelo para otimização energética em sistemas de abastecimento de água utilizando o EPANET. *Anais do XVI Congresso Nacional de Excelência em Gestão*, Online, 2022.

MIQUELIN, L. M.; PARRAS, I. G.; FACCIOLI, A. R.; SOLER, E. M.. Otimização no planejamento da operação de bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água para redução dos custos com energia elétrica. *Revista DAE*, v.70, p.168-184, 2021.

MIQUELIN, L. M.; SOLER, E. M.. Modelo matemático para minimizar os custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água associado ao EPANET. *Anais do XI Seminário da Pós-graduação em Engenharia Elétrica*, Bauru/SP, 2021.

BELLO, B. R.; MIQUELIN, L. M.; FACCIOLI, A. R.; SOLER, E. M.. Resolução e simulação de um modelo matemático para redução dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. *Caderno de resumos da XXXIII Semana da Licenciatura em Matemática*,

Bauru/SP, 2021.

MIQUELIN, L. M.; SOLER, E. M.; SANTOS, M. O.. Modelo de otimização para minimização dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água com restrições de pressão para atendimento da demanda. *Anais do LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, João Pessoa/PB, 2020.

MIQUELIN, L. M.; SOLER, E. M.. Proposta de um modelo matemático para minimizar os custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. *Anais do X Seminário da Pós-graduação em Engenharia Elétrica*, Bauru/SP, 2020.

BELLO, B. R.; FACCIOLI, A. R.; MIQUELIN, L. M.; SOLER, E. M.. Otimização de um sistema de abastecimento de água utilizando a linguagem de programação Julia e o pacote JuMP. *Caderno de resumos da XXXII Semana da Licenciatura em Matemática*, Bauru/SP, 2020.

OLIVEIRA, A. M. A.; MIQUELIN, L. M.; FACCIOLI, A. R.; SOLER, E. M.. Linguagem de programação Julia para a resolução do problema da mistura. *Caderno de resumos da XXXII Semana da Licenciatura em Matemática*, Bauru/SP, 2020.

MIQUELIN, L. M.; SOLER, E. M.; SANTOS, M. O.. Modelo matemático para otimização energética em sistemas de abastecimento de água e restrições de pressão para atendimento da demanda. *Anais do LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Limeira/SP, 2019.

REFERÊNCIAS

ABDELSALAM, A. A.; GABBAR, H. A. Energy saving and management of water pumping networks. *Heliyon*, Elsevier, v. 7, n. 8, p. e07820, 2021. Citado 7 vezes nas páginas 11, 15, 16, 29, 34, 77 e 85.

ALVISI, S.; FRANCHINI, M. A robust approach based on time variable trigger levels for pump control. *Journal of Hydroinformatics*, IWA Publishing, v. 19, n. 6, p. 811–822, 2017. Citado na página 25.

ANEEL. *Resolução Normativa n. 414*. [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

ARENALES, M. et al. *Pesquisa operacional*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 10, 36 e 37.

AYYAGARI, K. S. et al. Energy-efficient optimal water flow considering pump efficiency. In: IEEE. *2021 IEEE Madrid PowerTech*. [S.l.], 2021. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 16, 29 e 34.

BOULDER, C. A user's guide to pikaia 1.0. 1995. Citado na página 31.

BRASIL. *Plano Nacional de Eficiência Energética*. 2011. Acesso em: 28 maio 2020. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/plano-nacional-de-eficiencia-energetica>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 19.

BRASIL. *Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab)*. [S.l.]: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental Brasília, 2013. Citado na página 23.

BRASIL. *Programa Nacional Combate ao Desperdício Água - PNCDA*. 2015. Acesso em: 16 set. 2019. Disponível em: <<http://www.pmss.gov.br/index.php/biblioteca-virtual/programa-nacional-combate-ao-desperdicio-agua-pncda>>. Citado na página 23.

BRASIL. *Balanço Energético Nacional 2020*. 2020. Acesso em: 05 maio 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf>. Citado na página 26.

BRENTAN, B. et al. Optimizing pump operations in water distribution networks: Balancing energy efficiency, water quality and operational constraints. *Journal of Water Process Engineering*, Elsevier, v. 63, p. 105374, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.

BRITO, G. L. R. de; MOTTA, C. A. M. Modelagem e otimização de fluxo em uma rede real conectada. *DESAFIOS-Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins*, v. 3, n. Especial, p. 99–104, 2016. Citado na página 37.

CHAE, K.-J.; KANG, J. Estimating the energy independence of a municipal wastewater treatment plant incorporating green energy resources. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 75, p. 664–672, 2013. Citado na página 19.

CHEN, W. et al. Genetic optimization toward operation of water intake-supply pump stations system. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 279, p. 123573, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 15, 27, 28, 34 e 41.

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. Efficiency achievement in water supply systems—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 30, p. 59–84, 2014. Citado na página 20.

COELHO, L. C. *Drinking water distribution*. 2020. Disponível em: <<https://www.leandro-coelho.com/drinking-water-distribution/>>. Acesso em: 06 set 2024. Citado 3 vezes nas páginas 67, 85 e 97.

COURA, S. d. P. Técnicas de operação em sistemas de bombeamento de água, a conta de energia elétrica no saneamento. *Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água, Brasília/DF*, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 20, 21, 22 e 23.

CUNHA, B. S. d.; SANTOS, S. M. d.; GONZALEZ, B. C. Gestão das perdas de água em sistemas de abastecimento. *Revista DAE*, Sabesp, v. 69, n. 230, p. 67–86, 2021. Citado na página 23.

DADAR, S. et al. Impact of the pumping regime on electricity cost savings in urban water supply system. *Water*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 9, p. 1141, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 16, 28, 29 e 34.

DAI, J. et al. Water-energy nexus: A review of methods and tools for macro-assessment. *Applied energy*, Elsevier, v. 210, p. 393–408, 2018. Citado na página 15.

DARWEESH, M. S. Impact of optimized pump scheduling on water quality in distribution systems. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, American Society of Civil Engineers, v. 11, n. 4, p. 05020004, 2020. Citado na página 15.

DINI, M.; HEMMATI, M.; HASHEMI, S. Optimal operational scheduling of pumps to improve the performance of water distribution networks. *Water Resources Management*, Springer, p. 1–16, 2022. Citado 5 vezes nas páginas 15, 16, 23, 30 e 34.

DINI, M.; TABESH, M. Optimal renovation planning of water distribution networks considering hydraulic and quality reliability indices. *Urban Water Journal*, Taylor & Francis, v. 16, n. 4, p. 249–258, 2019. Citado na página 30.

EGITO, T. Batista do; AZEVEDO, J. R. G. de; BEZERRA, S. d. T. M. Optimization of the operation of water distribution systems with emphasis on the joint optimization of pumps and reservoirs. *Water Supply*, IWA Publishing, v. 23, n. 3, p. 1094–1105, 2023. Citado 5 vezes nas páginas 15, 16, 31, 32 e 34.

ENERGIA, M. de Minas e. *Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW*. 2024. Disponível em: <[EUA, A. de Proteção Ambiental dos. *EPANET - Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems*. 2012. Acesso em: 23 jul. 2022. Disponível em: <<https://www.epa.gov/water-research/epanet>>. Citado na página 24.](https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw#:~:text=Atualmente%20as%20tr%C3%AAs%20maiores%20fontes,Mineral%20(1%2C75%25).>>. Acesso em: 10 dez. 2024. Citado na página 20.</p></div><div data-bbox=)

- EXETER, U. of. *Benchmarks*. 2010. Disponível em: <<https://www.exeter.ac.uk/research/centres/cws/resources/benchmarks/>>. Acesso em: 08 jan 2024. Citado 4 vezes nas páginas 77, 85, 86 e 97.
- FACCIOLI, A. R. Otimização energética em sistemas de abastecimento de água utilizando o epanet. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2021. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 34.
- FERREIRA, R. C. d. et al. *Proposta de Agenda e Roadmap Digital 2021-2040 para o setor de saneamento nas vertentes dos serviços de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário*. 2021. Acesso em: 22 jul. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/proesa/AgendaDigitalnoSaneamentodownload.pdf>>. Citado na página 19.
- FREITAS, V. H. R. de. Análise computacional de otimização em redes de fluxos saturadas pela metodologia do algoritmo de ford e fulkerson. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 37.
- GHADDAR, B. et al. A lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 241, n. 2, p. 490–501, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 15, 30 e 40.
- GIACOMELLO, C.; KAPELAN, Z.; NICOLINI, M. Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 139, n. 2, p. 175–183, 2013. Citado na página 26.
- GOMES, H. P. *Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias*. [S.l.]: Editora Universitária-UFPB, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 10, 18 e 19.
- GONÇALVES, J.; FERREIRA, R. C. d. *Projetos de Eficiência Energética em Saneamento - Guia auxiliar para os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE da ANEEL*. 2019. Acesso em: 12 maio 2020. Disponível em: <https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/proesa/pdf/2019-05-21_Guia_Saneamento_PROPEE_ANEEL_V2.pdf>. Citado na página 19.
- GÜNGÖR-DEMIRCI, G.; LEE, J.; KECK, J. Optimizing pump operations in water distribution systems: energy cost, greenhouse gas emissions and water quality. *Water and Environment Journal*, Wiley Online Library, v. 34, p. 841–848, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 34.
- GUROBI. Gurobi optimizer reference manual, version 9.5. *Gurobi Optimization*, 2022. Disponível em: <<https://www.gurobi.com/documentation/9.5/refman/index.html>>. Citado na página 53.
- HOUSH, M.; SALOMONS, E. Optimal dynamic pump triggers for cost saving and robust water distribution system operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 145, n. 2, p. 04018095, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 34.
- JAMES, K.; CAMPBELL, S.; GODLOVE, C. Watergy: Taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems. *Alliance to Save Energy*, 2002. Citado na página 15.
- JONES, S. C.; SOWBY, R. B. Water system optimization: Aligning energy efficiency, system performance, and water quality. *Journal-American Water Works Association*, Wiley Online Library, v. 106, n. 6, p. 66–71, 2014. Citado na página 15.

KLISE, K. A.; MURRAY, R.; HAXTON, T. An overview of the water network tool for resilience (wntr). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2018. Disponível em: <<https://wntr.readthedocs.io/en/latest/>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 53.

KOWALIK, P.; RZEMIENIAK, M. Binary linear programming as a tool of cost optimization for a water supply operator. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 6, p. 3470, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 34.

KOZŁOWSKI, E. et al. Binary linear programming as a decision-making aid for water intake operators. In: SPRINGER. *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance*. [S.l.], 2017. p. 199–208. Citado na página 28.

LAM, K. L.; KENWAY, S. J.; LANT, P. A. Energy use for water provision in cities. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 143, p. 699–709, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 22 e 23.

LANSEY, K. E.; AWUMAH, K. Optimal pump operations considering pump switches. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 120, n. 1, p. 17–35, 1994. Citado na página 40.

LAROCK, B. E.; JEPPSON, R. W.; WATTERS, G. Z. *Hydraulics of pipeline systems*. [S.l.]: CRC press, 1999. Citado na página 30.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; PRASAD, T. D.; PAECHTER, B. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. *Journal of water resources planning and management*, American Society of Civil Engineers, v. 134, n. 4, p. 337–346, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 62.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M. *Water Distribution Network Instances of the Pump Scheduling Problem*. 2015. Disponível em: <https://lopez-ibanez.eu/ps_instances>. Acesso em: 21 ago 2020. Citado na página 56.

LUNA, T. et al. Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 213, p. 342–356, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 15, 16, 25, 29 e 34.

MALA-JETMAROVA, H.; SULTANOVA, N.; SAVIC, D. Lost in optimisation of water distribution systems? a literature review of system operation. *Environmental modelling & software*, Elsevier, v. 93, p. 209–254, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

MARCHI, A.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Optimization of pump operation using rule-based controls in epanet2: New ettar toolkit and correction of energy computation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 142, n. 7, p. 04016012, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 31.

MARINI, G. et al. A novel approach to avoiding technically unfeasible solutions in the pump scheduling problem. *Water*, MDPI, v. 15, n. 2, p. 286, 2023. Citado 9 vezes nas páginas 10, 31, 34, 62, 63, 64, 65, 66 e 67.

MCKINNEY, W. *Python for data analysis: Data wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2012. Citado na página 53.

MIQUELIN, L. M. *data-water-epanet*. 2024. Disponível em: <<https://github.com/lemiquelin/data-water-epanet>>. Acesso em: 10 dez. 2024. Citado na página 56.

- MIQUELIN, L. M. et al. Mathematical model with pressure constraints to minimize electric energy costs in the operation of hydraulic pumps. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 483–489, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 52.
- NETTO, A.; FERNÁNDEZ, M. F. y. *Manual de hidráulica*. [S.l.]: Editora Blucher, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.
- NETTO, P. O. B. *Grafos: teoria, modelos, algoritmos*. [S.l.]: Editora Blucher, 2003. Citado na página 38.
- PARRAS, I. G. Modelo matemático para a otimização energética em sistemas de abastecimento, considerando zonas de pressão e condições estruturais. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2020. Citado 5 vezes nas páginas 18, 27, 34, 52 e 53.
- RAO, Z.; SALOMONS, E. Development of a real-time, near-optimal control process for water-distribution networks. *Journal of Hydroinformatics*, IWA Publishing, v. 9, n. 1, p. 25–37, 2007. Citado na página 32.
- ROSSMAN, L. et al. *Manual do Usuário: Epanet 2.0 Brasil*. 2009. Acesso em: 03 ago. 2020. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf>. Citado 8 vezes nas páginas 16, 24, 44, 48, 51, 53, 54 e 56.
- SALOMONS, E.; HOUSH, M. Practical real-time optimization for energy efficient water distribution systems operation. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 275, p. 124–148, 2020. Citado na página 15.
- SANTOS, M. O. et al. A mixed integer programming model and solution method for the operation of an integrated water supply system. *International Transactions in Operational Research*, Wiley Online Library, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 30, 34 e 52.
- SAVIĆ, D. A.; BICIK, J.; MORLEY, M. S. A dss generator for multiobjective optimisation of spreadsheet-based models. *Environmental modelling & software*, Elsevier, v. 26, n. 5, p. 551–561, 2011. Citado na página 31.
- SCHMIDT, N. L. Avaliação da medição e verificação de resultados em eficiência energética. 2020. Citado na página 19.
- SHAO, Y. et al. Pump scheduling optimization in water distribution system based on mixed integer linear programming. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 313, n. 3, p. 1140–1151, 2024. Citado 5 vezes nas páginas 32, 34, 62, 85 e 86.
- SHARIF, M. N. et al. Staged energy and water quality optimization for large water distribution systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, Springer, v. 194, n. 3, p. 232, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 34.
- SHARIF, M. N. et al. Risk-based framework for optimizing residual chlorine in large water distribution systems. *Environmental monitoring and assessment*, Springer, v. 189, p. 1–19, 2017. Citado na página 30.
- SHEN, K.; YU, W. Fractional programming for communication systems—part i: Power control and beamforming. *IEEE Transactions on Signal Processing*, IEEE, v. 66, n. 10, p. 2616–2630, 2018. Citado na página 29.

- STOKES, C.; WU, W.; DANDY, G. Battle of the water networks ii: Combining engineering judgement with genetic algorithm optimisation. In: ENGINEERS AUSTRALIA BARTON, ACT. *WDSA 2012: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, 24-27 September 2012 in Adelaide, South Australia*. [S.l.], 2012. p. 77–89. Citado na página 33.
- STOKES, C. S.; MAIER, H. R.; SIMPSON, A. R. Water distribution system pumping operational greenhouse gas emissions minimization by considering time-dependent emissions factors. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 141, n. 7, p. 04014088, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- TOLEDO, F. et al. Logística de distribuição de água em redes urbanas: racionalização energética. *Pesquisa Operacional*, SciELO Brasil, v. 28, p. 75–91, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 41.
- TSUTIYA, M. Abastecimento de água: Departamento de engenharia hidráulica e sanitária da escola politécnica da universidade de são paulo, 643p. *São Paulo*, p. 42, 2006. Citado na página 18.
- VIEIRA, B. S. et al. Optimizing drinking water distribution system operations. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 280, n. 3, p. 1035–1050, 2020. Citado 18 vezes nas páginas 10, 16, 17, 26, 32, 34, 41, 44, 53, 62, 67, 68, 76, 85, 86, 97, 98 e 104.
- WALSKI, T. M. et al. Battle of the network models: Epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 113, n. 2, p. 191–203, 1987. Citado na página 33.
- WALT, S. V. D.; COLBERT, S. C.; VAROQUAUX, G. The numpy array: a structure for efficient numerical computation. *Computing in science & engineering*, IEEE, v. 13, n. 2, p. 22–30, 2011. Citado na página 53.
- WALTERS, G. A. et al. Improved design of “anytown” distribution network using structured messy genetic algorithms. *Urban water*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 23–38, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 33.
- WHITE, F. M. *Mecânica dos fluidos*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 16, 44, 47 e 51.
- WU, W.; SIMPSON, A. R.; MAIER, H. R. Sensitivity of optimal tradeoffs between cost and greenhouse gas emissions for water distribution systems to electricity tariff and generation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 138, n. 2, p. 182–186, 2012. Citado na página 26.
- ZHAO, W.; BEACH, T. H.; REZGUI, Y. A systematic mixed-integer differential evolution approach for water network operational optimization. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society Publishing, v. 474, n. 2217, p. 20170879, 2018. Citado na página 15.
- ZYL, J. E. V. *A methodology for improved operational optimization of water distribution systems*. Tese (Doutorado) — University of Exeter UK, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 30, 32 e 33.
- ZYL, J. E. V.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 130, n. 2, p. 160–170, 2004. Citado 20 vezes nas páginas 10, 11, 17, 26, 31, 32, 33, 53, 56, 58, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 76, 77, 97 e 104.