



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Ciências e Tecnologia
Câmpus de Presidente Prudente

Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada e Computacional

Heurística para redução dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água

Beatriz Ribeiro Bello

Orientadora: Profa. Dra. Edilaine Martins Soler



Presidente Prudente, dezembro de 2024.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada e Computacional

Heurística para redução dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água

Beatriz Ribeiro Bello

Orientadora: Profa. Dra. Edilaine Martins Soler

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada e Computacional da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP para obtenção do título de Mestre em Matemática Aplicada e Computacional.

Presidente Prudente, dezembro de 2024.

B446h Bello, Beatriz Ribeiro
Heurística para redução dos custos com energia elétrica em
sistemas de abastecimento de água / Beatriz Ribeiro Bello. -- Bauru,
2025
102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências, Bauru
Orientadora: Edilaine Martins Soler

1. Matemática aplicada. 2. Otimização matemática. 3.
Abastecimento de água nas cidades. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Heurística para redução dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água

AUTORA: BEATRIZ RIBEIRO BELLO

ORIENTADORA: EDILAINE MARTINS SOLER

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Matemática Aplicada e Computacional , pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. EDILAINE MARTINS SOLER (Participação Virtual)
Departamento de Matematica / Faculdade de Ciencias de Bauru UNESP

A handwritten signature in blue ink that reads "Edilaine M. Soler".

Prof. Dr. MARCOS MANSANO FURLAN (Participação Virtual)
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas / Universidade Federal da Grande Dourados

Profa. Dra. ADRIANA CRISTINA CHERRI NICOLA (Participação Virtual)
Departamento de Matemática / UNESP/Câmpus de Bauru

Presidente Prudente, 06 de dezembro de 2024

Com gratidão, dedico este trabalho a Deus. Devo a Ele tudo o que sou.

Agradecimentos

Agradeço à minha família que sempre me incentivou, apoiou e acreditou em mim. Obrigada por tudo. Vocês são a minha base.

À minha orientadora, professora Edilaine Martins Soler, por todos os momentos de aprendizado, acolhimento, orientação, paciência e ajuda. Muito obrigada.

Ao meu noivo, Giovani, pela parceria e amor. Obrigada por acreditar em mim e tornar os dias mais leves.

Aos meus amigos de pós-graduação, Elias, Fernanda, Letícia e Ana Raquel, por toda ajuda, apoio, conhecimento, incentivo e risadas. Sem vocês não seria possível.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

“Não se pode criar experiência. É preciso passar por ela.”

Albert Camus

Resumo

Os sistemas de distribuição de água são estruturas de extrema importância para a saúde e o bem-estar de uma comunidade. Para exercerem a sua função, contam com diversas estruturas, entre elas, as tubulações. Quando o deslocamento da água, neste percurso, não é possível de ser realizado pela ação da gravidade, é necessário utilizar bombas hidráulicas, ferramentas que requerem grande quantidade de energia elétrica, afetando os gastos dessas empresas. É importante considerar que, no Brasil e em muitos países, os preços a serem pagos pelo uso Os sistemas de distribuição de água são estruturas de extrema importância para a saúde e o bem-estar de uma comunidade. Para exercerem a sua função, contam com diversas estruturas, entre elas, as tubulações. Quando o deslocamento da água, neste percurso, não é possível de ser realizado pela ação da gravidade, é necessário utilizar bombas hidráulicas, ferramentas que requerem grande quantidade de energia elétrica, afetando os gastos dessas empresas. É importante considerar que, no Brasil e em muitos países, os preços a serem pagos pelo uso da eletricidade variam ao decorrer dos horários do dia. Neste contexto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de otimizar o funcionamento das bombas, minimizando os gastos com energia elétrica e mantendo a qualidade e o transporte da água. Este trabalho propõe uma heurística construtiva para minimizar os custos de eletricidade em sistemas de abastecimento de água com redes de distribuição do tipo malhadas. Testes numéricos comprovam a sua potencialidade.da eletricidade variam ao decorrer dos horários do dia. Neste contexto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de otimizar o funcionamento das bombas, minimizando os gastos com energia elétrica e mantendo a qualidade e o transporte da água. Este trabalho propõe uma heurística construtiva para minimizar os custos de eletricidade em sistemas de abastecimento de água com redes de distribuição do tipo malhadas. Testes numéricos comprovam a sua potencialidade.

Palavras-Chave: *sistemas de abastecimento de água, otimização energética, heurística construtiva, rede de distribuição malhada.*

Abstract

Water distribution systems are extremely important structures for the health and well-being of a community. To perform their function, they rely on several structures, including pipelines. When the movement of water along this route cannot be carried out by gravity, it is necessary to use hydraulic pumps, tools that require a large amount of electrical energy, affecting the costs of these companies. In Brazil and in many countries, the prices to be paid for the use of electricity vary throughout the day. In this context, researchs have been carried out in order to optimize the operation of pumps, minimizing electrical energy costs and maintaining water quality and transportation. This paper proposes a constructive heuristic to minimize electricity costs in water supply systems with mesh-type distribution networks. Numerical tests prove its potential.

Keywords: *water supply systems, energy optimization, constructive heuristics, meshed distribution network.*

Lista de Figuras

2.1	Estrutura de um sistema de abastecimento de água. Fonte: Netto e Martiniano (1998)	27
2.2	Disposição dos reservatórios. Fonte: Júnior (2018)	31
2.3	Redes malhadas e ramificadas. Fonte: Perez (2014)	32
2.4	Estação elevatória de água. Fonte: Netto e Martiniano (1998)	33
6.1	Rede de Van Zyl et al. (2004).	61
6.2	Demandas dos centros de consumo - Rede de Van Zyl et al. (2004) . . .	62
6.3	Programação das bombas - Primeiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)	64
6.4	Nível de água nos tanques - Primeiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)	65
6.5	Programação das bombas - Segundo Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)	67
6.6	Nível de água nos tanques - Segundo Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)	68
6.7	Programação das bombas - Terceiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)	69
6.8	Nível de água nos tanques - Terceiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)	70
6.9	Rede Anytown Modificada	72
6.10	Programação das bombas - Primeiro Cenário com Rede de Anytown Modificada	75

6.11	Nível de água nos tanques - Primeiro Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada	76
6.12	Programação das bombas - Segundo Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada	77
6.13	Nível de água nos tanques - Segundo Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada	78
6.14	Programação das bombas - Terceiro Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada	79
6.15	Nível de água nos tanques - Terceiro Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada	80
6.16	Programação das bombas - Primeiro Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada com tarifas brasileiras	81
6.17	Nível de água nos tanques - Primeiro Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada com tarifas brasileiras	82
6.18	Programação das bombas - Segundo Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada com tarifas brasileiras	83
6.19	Nível de água nos tanques - Segundo Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada com tarifas brasileiras	84
6.20	Programação das bombas - Terceiro Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada com tarifas brasileiras	85
6.21	Nível de água nos tanques - Terceiro Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada com tarifas brasileiras	86

Lista de Tabelas

6.1	Demandas dos centros de consumo - Rede de Van Zyl et al. (2004) . . .	62
6.2	Tarifas de energia elétrica - Rede de Van Zyl et al. (2004)	63
6.3	Características dos tanques - Rede de Van Zyl et al. (2004)	63
6.4	Comparação de resultados - Primeiro Cenário com a Rede de Van Zyl et al. (2004)	66
6.5	Comparação de resultados - Segundo Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)	68
6.6	Comparação de resultados - Terceiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)	71
6.7	Características dos tanques - Rede de Anytown Modificada	73
6.8	Demanda dos centros de consumo (GPM) - Rede de Anytown Modificada	73
6.9	Fatores multiplicativos - Rede de Anytown Modificada	73
6.10	Tarifas de energia elétrica padrão - Rede de Anytown Modificada . . .	74
6.11	Tarifas de energia elétrica brasileiras - Rede de Anytown Modificada . .	74
6.12	Comparação de resultados - Primeiro Cenário com Rede de Anytown Modificada	77
6.13	Comparação de resultados - Segundo Cenário com Rede de Anytown Modificada	79
6.14	Comparação de resultados - Terceiro Cenário com Rede de Anytown Modificada	81
6.15	Comparação de resultados - Primeiro Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras	83
6.16	Comparação de resultados - Segundo Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras	85

6.17	Comparação de resultados - Terceiro Cenário com Rede de Anytown	
	Modificada com tarifas brasileiras	87

Conteúdo

Resumo	7
Abstract	8
Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	12
1 Introdução	18
2 Sistemas de Abastecimento de Água	24
2.1 A história dos sistemas de abastecimento no Brasil e no mundo	24
2.2 A estrutura dos sistemas de abastecimento de água	27
2.2.1 Mananciais	28
2.2.2 Captação	28
2.2.3 Adução	28
2.2.4 Tratamento	29
2.2.5 Reservação	30
2.2.6 Rede de Distribuição	31
2.2.7 Estações Elevatórias ou de Recalque	33
2.3 Tarifas de Energia Elétrica	34
2.4 Descrição do problema	36
3 Revisão Bibliográfica	38
4 Heurística Proposta	42
4.1 Programação para os períodos NCI	43

4.2	Programação para os períodos CR	50
4.3	Programação para os períodos NCF	52
4.4	Captação	54
4.5	Correção de Pressão	56
5	Software de simulação hidráulica EPANET	57
6	Testes Numéricos	60
6.1	Rede de Van Zyl et al. (2004)	60
6.1.1	Primeiro Cenário	63
6.1.2	Segundo Cenário	66
6.1.3	Terceiro Cenário	69
6.2	Rede Anytown (1999)	71
6.2.1	Cenários com tarifas padrão	75
6.2.1.1	Primeiro Cenário	75
6.2.1.2	Segundo Cenário	77
6.2.1.3	Terceiro Cenário	79
6.2.2	Cenários com tarifas brasileiras	81
6.2.2.1	Primeiro Cenário	81
6.2.2.2	Segundo Cenário	83
6.2.2.3	Terceiro Cenário	85
	Considerações Finais	89
	Referências	94
A	Rede de Van Zyl et al. (2004)	94
B	Rede Anytown adaptada por Walters et al. (1999)	100

Introdução

Segundo BRASIL (2023), a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) afirma que de toda a porção de água da superfície terrestre, aproximadamente 97,5% corresponde a água salgada e apenas 2,5%, à água doce, encontrada em geleiras, neves eternas, águas subterrâneas, solos, rios e lagos. Embora ambas compartilhem a mesma composição química, suas características e importâncias são distintas. Enquanto a água doce é essencial para a agricultura, produção de alimentos e hidratação da comunidade e do ecossistema, a água salgada desempenha um papel crucial na manutenção do equilíbrio e da biodiversidade marinha.

Sobre o consumo da água doce, podemos afirmar que, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a hidratação adequada é fundamental para o funcionamento do corpo humano, uma vez que a água desempenha um papel vital na regulação da temperatura corporal, na digestão, na absorção de nutrientes e na eliminação de resíduos. No entanto, para que a água seja consumida pela população e realize suas funções básicas, é necessário que ela atenda aos padrões de qualidade e pureza estabelecidos por órgãos de saúde.

O processo de potabilização, operação que torna a água doce potável, varia de acordo com a fonte de água e as características da região. De acordo com Netto & Martiniano (1998), os métodos de tratamento podem incluir micro-peneiramento,

aeração, coagulação e outros processos que visam eliminar ou reduzir a presença de contaminantes.

Depois de ser tratada e considerada potável, a água é encaminhada para as residências e centros comerciais através das redes de distribuição, formadas por um conjunto de tubulações, conexões, reservatórios e bombas hidráulicas. A união da ETA com essas redes de distribuição compõem o que chamamos de Sistemas de Abastecimento de Água (SAAs), cujas demais unidades serão aprofundadas no Capítulo 2.

Nos países com insuficiência de água doce, torna-se indispensável o processo de dessalinização, que, segundo ECYCLE (2021), consiste na retirada de sais e outros componentes minerais da água salgada, tornando-a possível de ser consumida pelo ser humano. Alguns dos países adeptos deste processo são os de regiões desérticas ou com dificuldades de abastecimento, como os do Oriente Médio e do norte da África. Um dos líderes dessa tecnologia é Israel, onde cerca de 80% da água potável é proveniente do mar.

Apesar dessa técnica de potabilização da água mostrar ser uma boa alternativa para regiões com escassez de água doce, esse processo, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), ainda é considerado tecnologicamente inviável em áreas mais pobres. A dificuldade torna-se maior ainda em cidades distantes do mar, pois o empecilho está no fato de que tanto a dessalinização da água quanto o bombeamento às residências requerem muita energia, tornando o método ainda mais inviável.

Logo, como a dessalinização é pouco viável e a água doce representa apenas uma pequena parte do volume total de água do planeta, torna-se essencial planejar bem os sistemas de abastecimento, garantindo o consumo consciente e evitando desperdícios.

O Brasil, segundo o portal da Empresa Brasil de Comunicação (EBC)¹, é um país abundante em recursos hídricos, representando cerca de 12% do total mundial. Contudo, sua distribuição não é uniforme no território. A região Norte contém 68% dos recursos hídricos, a região Centro-Oeste, 16%, a região Sul, 7%, a região Sudeste, 6% e a região Nordeste, 3%. Há um contraste visível entre a distribuição de água no Brasil e a distribuição populacional. A Região Norte, que detém o maior volume de água doce do país, é a região com menor densidade demográfica, enquanto a Região Sudeste, a mais povoada do país, conta com apenas 6% da disponibilidade de recursos hídricos.

¹Disponível em: <https://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil>

As informações levantadas sobre a distribuição da água nas regiões brasileiras consolidam a importância do bom funcionamento dos sistemas de abastecimento de água. Os reservatórios, por exemplo, devem ser projetados de modo que não haja desperdícios de água potável entre as transferências e/ou demais etapas do sistema. Em geral, é preciso que as operações, nos SAAs, sejam bem calculadas, evitando grandes impactos ambientais.

Neste contexto, podemos levantar outra questão importante: o consumo de energia elétrica, um indicador crucial do desenvolvimento e da qualidade de vida em todo o mundo. Segundo Mateus et al. (2016), à medida que as sociedades se tornam mais urbanizadas e industrializadas, a demanda por eletricidade se intensifica, a fim de alimentar uma variedade de atividades econômicas, tecnológicas e cotidianas.

Segundo o Ministério de Minas e Energia², cerca de 85% da energia elétrica produzida no Brasil vem de fontes renováveis. A maior parte é produzida em usinas hidrelétricas, mas nos últimos anos, a geração de energia eólica, produzida pelo vento, e a solar, proveniente da luz do sol, vem ganhando destaque.

De fato, a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis é considerada mais sustentável quando comparada com fontes de energia não renováveis, como o carvão e o petróleo. No entanto, é fundamental reconhecer que as fontes de energia renovável não estão isentas de impactos ambientais.

Segundo Lloyd et al. (2023), as turbinas, da energia eólica, representam um risco para a fauna, como aves e morcegos; muitos desses animais colidem com as pás das turbinas e vêm a óbito. Outro exemplo semelhante é a energia solar; de acordo com Prana (2023), a produção de painéis solares requer a extração de minerais e metais, como o silício, o lítio e o cobalto, causando danos ambientais à terra onde foi realizada a mineração.

Portanto, diante dos impactos que toda produção de energia elétrica é capaz de causar à fauna e à flora do nosso planeta, a gestão eficiente do consumo da eletricidade nos sistemas de abastecimento de água torna-se uma prioridade. De acordo com ETES Sustentáveis³, 90% do gasto energético de empresas de saneamento básico são destinados

²Disponível em: <https://antigo.mme.gov.br/documents>

³Disponível em: <https://etes-sustentaveis.org/historia-saneamento-brasil>

aos diversos sistemas de bombeamento, estruturas responsáveis pelo deslocamento da água nas tubulações quando a gravidade não é capaz de transportá-la.

Do ponto de vista econômico, essa prática de controle sobre o uso da energia elétrica também possui grandes benefícios; ao implementar tecnologias que visam à eficiência energética, as empresas podem reduzir significativamente suas despesas operacionais. Vale ressaltar que essa redução de custos não implica, necessariamente, em uma diminuição na qualidade dos serviços. Ao contrário disso, a modernização dos processos pode levar a um aumento na eficiência operacional e na confiabilidade do sistema.

É imprescindível que essas tecnologias, cujo objetivo é reduzir os custos com energia elétrica em determinada empresa, levem em consideração o sistema tarifário da eletricidade adotado na região em que se localiza. No Brasil, por exemplo, as tarifas são definidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que organiza os centros consumidores em grupos e modalidades. Os sistemas de abastecimento de água, de acordo com as informações presentes em ANEEL (2021), recebem tarifas diferenciadas de acordo com a hora de utilização no dia.

Sendo assim, escolher os horários de utilização da energia elétrica de forma estratégica pode auxiliar na redução dos custos dos sistemas de abastecimento de água. Neste contexto, está a otimização, um ramo matemático que faz uso de modelos e técnicas matemáticas para determinar a melhor solução dentro das características de um sistema e/ou processo. Grosso modo, otimizar significa tornar ótimo; e ótimo, para os sistemas de abastecimento, pode ser operá-lo com o menor custo possível para a energia elétrica, sem prejudicar a qualidade e o transporte da água potável aos centros de consumo.

Com o tempo, pesquisas nesta área foram desenvolvidas. Através da aplicação de técnicas avançadas de modelagem, as empresas podem identificar oportunidades para aprimorar seus processos operacionais e tomar decisões embasadas em dados, resultando na economia de recursos financeiros e materiais. Na área da engenharia de produção, por exemplo, a otimização desempenha um papel crucial na minimização de desperdícios e no aumento da produtividade.

Os modelos matemáticos que trabalham com a otimização operacional dos sistemas de abastecimento de água, visando a minimização dos custos com energia

elétrica, possuem, quase sempre, um mesmo objetivo: determinar os horários de liga e desliga das bombas hidráulicas do sistema que garanta o menor custo possível com energia elétrica, sem afetar a qualidade e a distribuição da água.

Muitos trabalhos da literatura fazem uso de modelos matemáticos para otimizar o custo com energia elétrica em sistemas de abastecimento. Bons exemplos são as obras de JUNG et al. (2020), Santos et al. (2022) e ZHANG et al. (2015). Para tal, são utilizados pacotes de otimização, ferramentas que, muitas vezes, exigem alto investimento.

Visando obter uma alternativa mais acessível, surgiram pesquisas que propõem o uso das heurísticas como forma de minimizar os gastos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. Polya (1945) define heurísticas como métodos práticos para encontrar soluções aproximadas de problemas complexos, quando a solução exata é inviável. Embora não garantam a solução ótima, elas fornecem caminhos eficientes baseados na experiência ou em regras gerais. Com o tempo, diferentes tipos de heurísticas foram desenvolvidos.

No trabalho de Soler et al. (2016), por exemplo, é utilizada uma heurística construtiva como forma de reduzir os gastos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. Esse tipo de heurística foca em criar soluções passo a passo, construindo gradualmente uma resposta aceitável por meio de regras simples ou estratégias específicas. Embora não garantam a solução ótima, elas conseguem produzir resultados de qualidade de maneira ágil, tornando-as valiosas para a otimização e tomada de decisões em diversas áreas. Os trabalhos de Barán, Lucken e Sotelo (2005) e López-Ibáñez (2008) também propõem o uso das heurísticas como uma alternativa viável na minimização dos custos com energia elétrica.

Neste trabalho, será proposta a heurística construtiva HERA (Heurística para Eficiência e Redução de energia em Abastecimento de água), que visa a redução dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água cuja rede de distribuição é malhada; redes deste tipo serão abordadas adiante. De modo geral, este método tem três objetivos principais: minimizar os custos com eletricidade, otimizar o acionamento das bombas para preservar o equipamento e manter o estoque dos tanques ao final do horizonte de planejamento próximo ao inicial, facilitando futuros replanejamentos.

A princípio, a heurística classifica todos os períodos do horizonte de planejamento em três categorias, de acordo com os preços das tarifas de energia elétrica. Em seguida, cada categoria classificada é operada de acordo com suas características, respeitando o funcionamento da rede malhada. Em sua etapa final, é realizada a implementação dos resultados no software de simulação hidráulica EPANET, visando validar, na prática, as soluções obtidas. Se necessário, recorreremos a uma heurística de correção de pressão, que visa eliminar as pressões negativas detectadas na simulação. Para realização dos testes, são utilizadas as redes de Van Zyl et al. (2004) e a rede Anytown, proposta por Walki (1987) e modificada por Walters et al. (1999).

Este trabalho está organizado como segue: no segundo capítulo, serão abordadas informações relevantes sobre os SAAs, o sistema tarifário da energia elétrica e a descrição do problema; no terceiro capítulo, será feita uma revisão bibliográfica sobre o tema; no quarto capítulo, será abordada a heurística proposta nesta pesquisa; no quinto capítulo, serão apresentadas algumas informações sobre o software EPANET; no sexto capítulo, as redes utilizadas para os testes serão apresentadas, bem como os resultados obtidos.

Sistemas de Abastecimento de Água

2.1 A história dos sistemas de abastecimento no Brasil e no mundo

Os primeiros registros de sistemas de abastecimento de água são do Império Romano, quando foram construídos os primeiros aquedutos, utilizando técnicas de canalização e distribuição de água. Através dessas primeiras construções, fontes públicas, prédios do governo, casas de banho e residências da elite eram abastecidas. Estudos desenvolvidos por Evans (1997) e Malissard (1996) destacaram a importância social, cultural e econômica do abastecimento de água para essas cidades romanas. Apesar de representar um marco importante, as técnicas empregadas ainda eram relativamente rudimentares.

Nos séculos XIX e XX, uma mudança notável ocorreu com a industrialização, trazendo uma valorização crescente da água nos centros urbanos. De acordo com Evans (1997) e Malissard (1996), esse recurso transformou-se em um bem comercial, com aplicações voltadas, principalmente, para a promoção da higiene e saúde nas áreas urbanas; dessa forma, a disponibilidade de água mostrou ser fundamental para conter doenças endêmicas e epidêmicas na população, além de ser essencial para o funcionamento das indústrias. Diante disso, o poder público e o capital particular

passaram a investir na modernização dos sistemas de captação, tratamento e distribuição de água.

Segundo Ruckert (2020), a maior parte desses capitais disponíveis, muitos procedentes do exterior, foi aplicada em setores mais dinâmicos da economia, como ferrovias, mineração, cultivos para exportação e títulos da dívida pública, enquanto o poder público, por sua vez, oferecia incentivos para aqueles que se interessavam pela exploração do abastecimento de água. Assim, estabeleceu-se uma conjuntura propícia para negociações entre o poder público, que enfatizavam a importância do uso da água, e o setor privado, encarregado dos investimentos e da comercialização desse recurso.

Conforme a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), em cada localidade do mundo, foram criados diferentes ritmos de desenvolvimento, influenciados por conjunturas políticas nacionais e/ou internacionais. No Brasil, por exemplo, o surgimento das primeiras obras de saneamento nacionais provocou o início da comercialização dos serviços de saneamento e, em decorrência disso, o surgimento de autarquias e mecanismos de financiamento. Nessa mesma época, foi criada a Fundação Nacional de Saúde (Funasa).

Ainda no contexto brasileiro, há outros marcos históricos importantes sobre a evolução dos sistemas de saneamento básico. De acordo com a CETESB, a primeira obra criada em terras brasileiras é datada de 1561, no período colonial, quando Estácio de Sá, um militar português, mandou construir um poço para abastecer a cidade do Rio de Janeiro. Neste período, as poucas obras de saneamento registradas se resumiam à drenagem de terrenos e instalação de chafarizes.

Segundo a CETESB, a higiene dos colonizadores, nessa época, era sustentada pelos escravos, que se responsabilizavam por pegar água para a Casa Grande e carregar os seus dejetos e de seus senhores para um local afastado. Após a vinda da família real portuguesa, em 1808, a população brasileira foi aumentando e, conseqüentemente, a demanda por água começou a crescer, tornando as obras de saneamento cada vez mais necessárias; os próprios senhores portugueses perceberam que os serviços realizados pelos escravos eram prejudiciais para a saúde da população. Por esse motivo, os serviços de saneamento brasileiros foram concedidos a empresas estrangeiras.

Entre 1857 e 1877, o governo de São Paulo construiu o seu primeiro sistema de abastecimento de água encanada. Em Porto Alegre e no Rio de Janeiro, isso ocorreu em

1861 e 1876, respectivamente. Nessa mesma época, a capital fluminense foi a primeira do mundo a inaugurar uma ETA. No entanto, os serviços estrangeiros mostraram ser de péssima qualidade, forçando o governo brasileiro a estatizar o serviço já no início do século XX. A constituição de 1930 responsabilizava, teoricamente, os municípios pelos serviços de saneamento e abastecimento de água, fato que se mantém até os dias atuais.

Na década seguinte, em 1940, deu-se início a comercialização dos serviços de saneamento, fazendo-se necessário o surgimento de autarquias e mecanismos de financiamento, além da Funasa. Segundo a CETESB, anos depois, já no governo militar, foi criado o Decreto-Lei N° 898, de 29 de setembro de 1969, que autorizou o extinto Banco Nacional de Habitação (BNH) a aplicar recursos próprios e do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS) para financiar as obras de saneamento. Em 1971, foi instituído o Plano Nacional de Saneamento (Plansab), provocando uma imposição de companhias estaduais sobre os serviços municipais e uma separação das instituições que apenas cuidavam da saúde das que planejavam o saneamento.

Em 2007, os municípios, depois de intensa luta, conquistaram a titularidade dos serviços de saneamento básico com a Lei Nacional do Saneamento Básico (LNSB). Atualmente, além do Plansab, que tem como função conduzir as políticas públicas e traçar estratégias para o setor, há outros órgãos importantes na estrutura do saneamento, como a ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), cujo dever é gerenciar os recursos hídricos, e o SNIS (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento), responsável pelas informações sobre saneamento.

Diante de uma rica história, fica evidente a relevância dos sistemas de abastecimento de água para a sociedade. Ao longo do tempo, é perceptível que a essência de sua importância para a comunidade e a complexidade envolvida em sua construção foram sendo transformadas.

Na Seção 2.2, será analisada a estrutura desses sistemas, em partes, e suas respectivas funcionalidades.

2.2 A estrutura dos sistemas de abastecimento de água

Ao observar a trajetória dos sistemas de saneamento no Brasil e no mundo, torna-se evidente a enorme relevância que os sistemas de abastecimento de água tratada detêm para a sociedade. Neste sentido, é essencial que os sistemas sejam bem construídos e funcionem adequadamente, sem prejudicar a saúde e o bem-estar da população. Para alcançar essa meta, foi preciso aprimorar gradualmente os procedimentos relacionados à forma de fornecimento da água ao longo do tempo, à medida que as sociedades progrediram.

Conforme observado por Netto e Martiniano (1998), um SAA engloba um conjunto de estruturas, equipamentos e serviços concebidos para fornecer água potável a uma comunidade, abrangendo usos domésticos, serviços públicos e necessidades industriais. A água destinada a esse sistema deve ser suficiente para suprir a demanda da população e manter uma qualidade excepcional sob perspectivas físicas, químicas e bacteriológicas. Para tornar isso possível, diversas etapas precisam ser percorridas.

De acordo com Netto e Martiniano (1998), as fases essenciais de um sistema de abastecimento de água incluem: manancial, captação, adução, tratamento, reservação, distribuição e, se necessárias, estações elevatórias ou de recalque, conforme representadas na Figura 2.1. Esses elementos serão explorados nas próximas subseções.

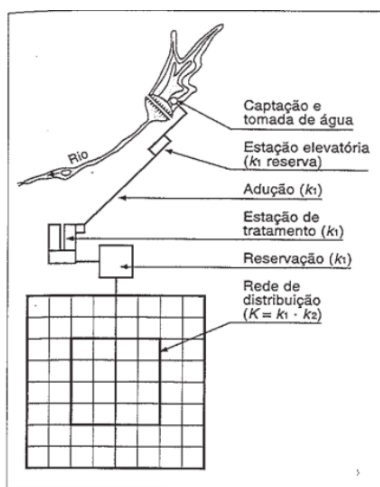


Figura 2.1: Estrutura de um sistema de abastecimento de água. Fonte: Netto e Martiniano (1998)

2.2.1 Mananciais

A fonte de água doce, conhecida como manancial, é a origem da qual se obtêm água para abastecimento. Essas fontes naturais podem ser divididas em duas categorias: superficiais e subterrâneas. Os mananciais superficiais consistem em córregos, rios, lagos e represas, ou seja, recursos hídricos com uma presença visível na superfície terrestre. Os mananciais subterrâneos são aqueles cuja água provém dos espaços no subsolo, podendo emergir na superfície como fontes ou nascentes, ou ser elevada artificialmente por meio de dispositivos como poços rasos, poços profundos ou galerias de infiltração (NETTO; MARTINIANO, 1998).

2.2.2 Captação

A captação de água é o processo pelo qual a água é retirada de uma fonte natural, como rios, lagos, reservatórios, aquíferos subterrâneos ou outras fontes hídricas. Esse processo envolve a coleta e a transferência da água da fonte para um sistema de tratamento e distribuição, a fim de torná-la própria para o consumo humano e outros usos. Segundo Tsutiya (2006), a captação da água varia de acordo com o tipo de manancial. É importante que a obra seja projetada visando o funcionamento ininterrupto desta etapa em qualquer que seja a época do ano, a fim de que a água captada seja suficiente para abastecer a região.

2.2.3 Adução

Segundo Netto e Martiniano (1998), as adutoras, ou sistema de adução, são as canalizações principais destinadas a conduzir água entre as unidades de um sistema de abastecimento que antecedem a rede de distribuição. Em outras palavras, refere-se a toda e qualquer tubulação principal que faça parte do sistema de abastecimento de água e anteceda a rede de distribuição. No caso de existirem derivações de uma adutora, isto é, ramificações que partem da adutora principal, conhecidas também por canalizações secundárias, utilizamos a denominação de subadutoras.

Esses sistemas de tubulação podem ser categorizados com base na qualidade da água que transportam. As adutoras de água bruta carregam a água antes de seu processo de tratamento, enquanto as adutoras de água tratada conduzem a água potável.

Além disso, é possível classificá-las de acordo com a energia empregada para mover a água. Algumas adutoras dependem da gravidade, podendo ser conduzidas por conduto livre ou forçado, enquanto outras utilizam bombeamento - nas estações elevatórias. Existem também aquelas que combinam ambos os métodos, conhecidas como adutoras mistas.

2.2.4 Tratamento

O tratamento da água é um conjunto de processos e técnicas que têm como objetivo remover impurezas, contaminantes, microrganismos e substâncias indesejáveis da água, tornando-a própria para o consumo humano, industrial e agrícola. O tratamento é necessário para garantir a qualidade e a segurança da água que chega às residências, empresas e demais usuários, assegurando a saúde e o bem-estar de uma comunidade.

As etapas e processos que fazem parte do tratamento da água doce são determinados em função dos padrões de potabilidade internacionalmente aceitos. De acordo com Netto e Martiniano (1998), os principais processos de purificação são chamados de: micropeneiramento, aeração, coagulação e floculação, decantação ou sedimentação, filtração, desinfecção, tratamento por contato e controle da corrosão, cada qual com sua importância e finalidade. O micropeneiramento, por exemplo, é um processo que envolve a utilização de uma peneira fina para remover partículas minúsculas da água, como detritos, sedimentos e materiais suspensos.

A etapa da aeração, por sua vez, é um processo no qual o oxigênio é introduzido deliberadamente na água, de modo a aumentar os níveis de saturação de oxigênio dissolvido. Os processos de coagulação e floculação consistem na adição de coagulantes químicos na água, visando a formação de floculos que carregam a sujeira, decantando-se. Na sedimentação, a água é separada das partículas sólidas que se encontram em suspensão, através da ação da gravidade e da diferença de densidade entre a água e a partícula sólida.

Em seguida, vem a filtração, processo que consiste na passagem da água por um meio poroso, como areia ou carvão ativado, onde o material em suspensão e coloidal é retido no meio filtrante. Na desinfecção, por sua vez, é utilizado um agente físico ou químico (desinfetante), cuja finalidade é a destruição de microrganismos patogênicos

presentes na água que possam transmitir doenças através das mesmas. Os produtos normalmente utilizados nesse processo são: cloro (gasoso ou líquido), hipoclorito de sódio e cal clorada. Para adição desses agentes químicos na água são utilizados dosadores.

Na etapa seguinte, denominada tratamento por contato, promove-se o contato da água com um leito material, podendo ser leitos de coque (pedra ou pedrito), para remoção do cloro, ou carvão ativado, para remover o odor e sabor da água. O objetivo desse processo é remover substâncias indesejáveis ainda presentes na água. Por fim, no controle da corrosão, são adicionados à água determinados produtos químicos, como cal, carbonato de sódio, metafosfato ou silicato, que contribuem na minimização do efeito corrosivo.

Essas etapas e processos biológicos, descritos por Netto e Martiniano (1998), permitem que a água doce, retirada no manancial, possa ser potabilizada e, então, consumida pelo ser humano.

2.2.5 Reservação

Neste momento, a água purificada é armazenada em reservatórios, estruturas especialmente projetadas para conservar a água potável até que seja distribuída à comunidade. A disposição e localização dos reservatórios determinam suas categorias, que podem ser classificados como enterrados, semi-enterrados, apoiados ou elevados, conforme demonstrado na Figura 2.2.

Além dessa divisão, os reservatórios também se categorizam como de montante ou de jusante. De acordo com Zhang, Kumar e Chauhan (2023), um reservatório de montante abastece constantemente a rede de distribuição, enquanto o reservatório de jusante fornece ou recebe água da rede de distribuição. Em outros termos, um reservatório é de montante quando está localizado antes da rede de distribuição e é de jusante quando está após a rede.

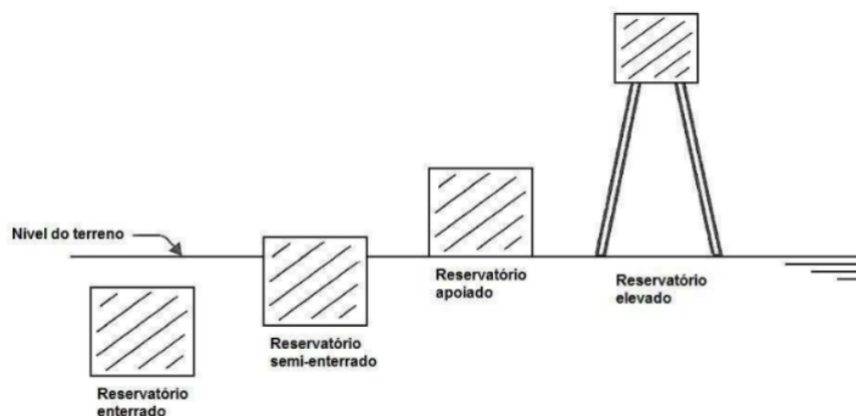


Figura 2.2: Disposição dos reservatórios. Fonte: Júnior (2018)

De maneira geral, os reservatórios devem satisfazer algumas condições fundamentais. A primeira delas diz respeito à flutuação da demanda ao longo do dia, uma vez que a quantidade de água armazenada deve ser capaz de atender às necessidades de cada período, sem o risco de escassez. Também é necessário que os reservatórios mantenham uma reserva de água para ser usada em situações de combate a incêndios. Além disso, essa mesma reserva precisa ser suficiente para lidar com situações emergenciais, como acidentes, manutenções nas instalações, interrupções no fornecimento e outras circunstâncias imprevistas.

2.2.6 Rede de Distribuição

A rede de distribuição, segundo Netto e Martiniano (1998), constitui a parte do sistema encarregada de encaminhar a água aos pontos de utilização (residências, edifícios, indústrias, etc). Essa estrutura engloba uma série de tubulações e componentes especiais dispostos de maneira estratégica para assegurar um fornecimento contínuo, com qualidade e pressão adequadas.

As tubulações da rede podem ser divididas em dois grupos: principais e secundárias. As tubulações principais, de maior diâmetro, fornecem água às tubulações secundárias, enquanto que as secundárias, por sua vez, de menor diâmetro, são responsáveis por levar a água diretamente aos edifícios e outras instalações consumidoras.

As redes, assim como suas tubulações, possuem categorias distintas. Uma rede de distribuição é considerada ramificada quando permite um fluxo unidirecional da

água. No caso de uma rede malhada, a direção do fluxo em cada segmento da rede é determinada pelas diferenças de pressão em suas extremidades. A Figura 2.3 exemplifica essas classificações. As redes do tipo "espinhas de peixe" e "grelha" são exemplos de redes ramificadas.

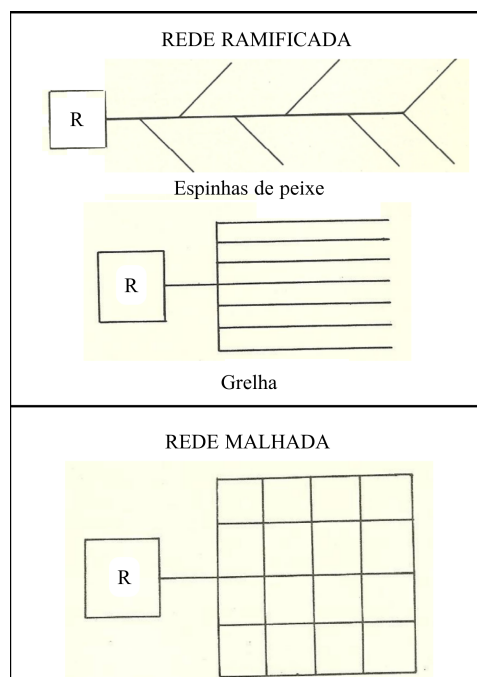


Figura 2.3: Redes malhadas e ramificadas. Fonte: Perez (2014)

Conforme observado por Netto e Martiniano (1998), durante o planejamento de uma rede de distribuição, alguns cuidados operacionais devem ser considerados. É necessário que o sistema funcione durante todo o tempo, com pressão adequada em qualquer ponto da rede, mantendo a qualidade e segurança da água.

A presença de registros e dispositivos de descarga em locais estratégicos da rede também é de grande importância. Isso permite realizar reparos e realizar descargas sempre que necessário. Além disso, é fundamental implementar medidas de proteção nas tubulações para evitar a contaminação interna e para prevenir que as tubulações fiquem submersas em líquidos poluídos.

Vale ressaltar que a rede deve ser planejada para garantir uma boa circulação da água, tolerando-se um número mínimo de pontas secas. Entende-se, por pontas secas, extremidades de tubulações em que há grande probabilidade de acúmulo de material da rede, por haver pouca possibilidade de circulação da água (NOBRE et al., 2012).

Todos esses cuidados devem ser rigorosamente seguidos para garantir a construção de uma rede de distribuição de água eficaz e que transporte água com qualidade.

2.2.7 Estações Elevatórias ou de Recalque

De acordo com Netto e Martiniano (1998), em diversos sistemas de abastecimento de água, é essencial estabelecer estações elevatórias. Isso ocorre tanto para captar águas de fontes superficiais quanto subterrâneas. Em essência, essas estações englobam um conjunto motor-bomba encarregado de elevar ou impulsionar a água até o ponto desejado. A Figura 2.4 ilustra um exemplo de como essas estruturas são implantadas em um sistema de abastecimento de água.

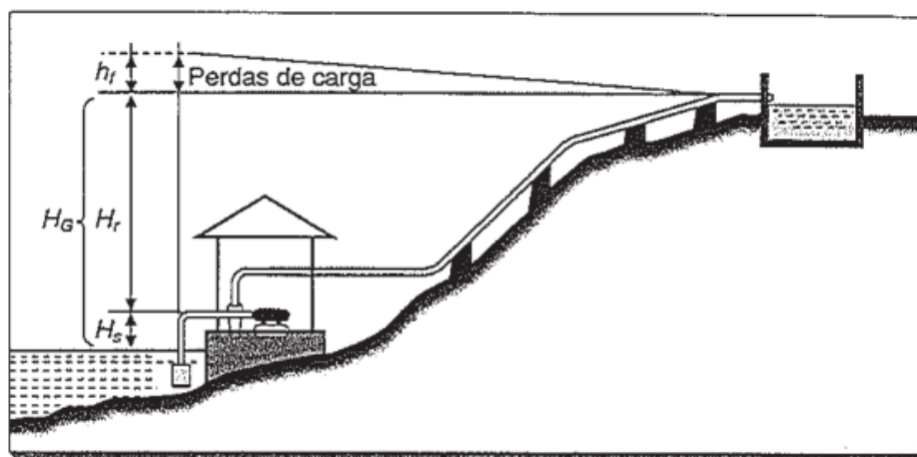


Figura 2.4: Estação elevatória de água. Fonte: Netto e Martiniano (1998)

Conforme Netto e Martiniano (1998), as normas e especificações do Hydraulic Institute estabelecem quatro classes de bombas: centrífugas, rotativas, de êmbolo (ou de pistão) e de poço profundo (tipo turbina). Nos sistemas de saneamento básico em geral, são usadas, majoritariamente, as bombas centrífugas, acionadas por motores elétricos. Esse tipo de bomba é fabricado nos mais variados modelos e classificado segundo vários critérios. Elas podem ser agrupadas de acordo com o movimento e a admissão do líquido, o número e o tipo de rotores, a posição do eixo e a pressão.

O uso das bombas hidráulicas em um SAA, independentemente de sua classe, elevam de forma significativa os custos com energia elétrica. Na Seção 2.3, será abordado

o processo de estabelecimento das tarifas de energia elétrica para os diversos centros de consumo no Brasil.

2.3 Tarifas de Energia Elétrica

A eletricidade demonstra ser um recurso vital para a operação das redes de distribuição de água. Conforme ressaltado por Chae e Kang (2013), a utilização dessa energia equivale de 5% a 30% dos custos operacionais nos sistemas de abastecimento de água, com a maioria desses custos relacionados aos sistemas de bombeamento. Dada a sua significância, é de extrema importância que as empresas de abastecimento possuam a capacidade de acessar energia elétrica de maneira conveniente.

Muitos países têm implementado tarifas dinâmicas de energia elétrica que variam conforme o horário e a demanda, promovendo a eficiência energética e ajudando a equilibrar o uso da rede elétrica. Em regiões como os Estados Unidos e a Europa, algumas dessas tarifas incluem a "Time-of-Use"(TOU), onde os preços são mais elevados durante os horários de pico e menores fora desses períodos, e a "Critical Peak Pricing"(CPP), que impõe tarifas adicionais em dias de alta demanda.

Outros modelos, como a tarifa baseada em preços em tempo real ("Real-Time Pricing- RTP), ajustam os valores de acordo com a oferta e a procura em intervalos de tempo curtos, fornecendo aos consumidores a flexibilidade para economizar ao reduzir o consumo em momentos de pico. Essas práticas têm o objetivo de não apenas reduzir os custos operacionais das empresas, mas também de mitigar o impacto ambiental, uma vez que incentivam o uso eficiente da energia em toda a rede elétrica (IEA, 2021; U.S. Department of Energy, 2020).

No Brasil, a contratação de energia elétrica é regulada pela ANEEL, órgão que, entre suas inúmeras funções, tem o dever de definir a metodologia de cálculo das tarifas que vão ser cobradas nas contas de energia elétrica, por imposição da legislação vigente. Para que o valor seja estipulado, devem ser levados em consideração alguns critérios, entre eles os custos dos encargos setoriais, o preço de compra da energia, gastos com transmissão e distribuição e despesas de uso da rede (ANEEL, 2021).

A fim de tornar esse processo mais prático, as unidades consumidoras, que já são classificadas em residenciais, industriais, comerciais, rurais e de poder público, de acordo

com sua funcionalidade, se dividem em três grupos tarifários, denominadas por Grupo A, Grupo B e Demais Acessantes. Os consumidores do Grupo A caracterizam-se por serem de alta tensão, com fornecimento igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária. O valor da tensão em fornecimento classifica esses consumidores em subgrupos, sendo eles A1, A2, A3 (grupos de alta tensão), A3a, A4 (grupos de média tensão) e AS (para sistemas subterrâneos) (ANEEL, 2021).

O conjunto de tarifas aplicáveis aos consumidores do Grupo A são as tarifas Horária Azul e Verde, nas quais não há um custo fixo. A Horária Azul corresponde a tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia (postos tarifários) e é disponibilizada para todos os subgrupos do Grupo A, sem exceção. A Horária Verde, por sua vez, consiste em tarifas diferenciadas de acordo com as horas de utilização do dia e de uma única tarifa de demanda de potência, sendo disponibilizada apenas aos subgrupos A3a, A4 e AS.

Os consumidores do Grupo B caracterizam-se pela baixa tensão (até 2300 V) e classificam-se em quatro subgrupos, denominados de B1, B2, B3 e B4. Os de classe residencial fazem parte do subgrupo B1, os de classe rural, do subgrupo B2, os de iluminação, do subgrupo B4 e as demais classes, do subgrupo B3. As tarifas aplicáveis a este grupo são chamadas de Convencional Monômnia e Horária Branca. A primeira corresponde a uma tarifa única e fixa, independente do horário de utilização, enquanto a segunda consiste em uma tarifa diferenciada de acordo com os postos tarifários.

No caso de centros consumidores identificados como Demais Acessantes, são empregadas tarifas conhecidas como Distribuição e Geração. A tarifa de Distribuição é definida por uma taxa de demanda de potência por hora, enquanto a tarifa de Geração é marcada por taxas de demanda de potência únicas. Diante de tantos agrupamentos e da forma com que as modalidades funcionam, é importante conhecer e classificar os horários de maior e menor consumo em um dia. É com base nessas classificações que os preços serão aplicados.

A agência utiliza os termos “horário de ponta” e “horário fora de ponta” para os consumidores do Grupo A e os postos tarifários “ponta”, “intermediário” e “fora de ponta” para os consumidores que adotam a Tarifa Branca, do Grupo B. Essa classificação

é definida pela distribuidora, no seu processo de revisão tarifária periódica (a cada 4 ou 5 anos), de acordo com a Resolução Normativa (REN) nº 1.000/2021 e os Procedimentos de Regulação Tarifária (Proret).

Segundo a ANEEL (2021), o horário de ponta corresponde ao período diário de 3 horas consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico, com exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais, o horário intermediário consiste em um período de horas conjugadas ao horário de ponta, podendo variar de 1 hora a 1 hora e 30 minutos antes e depois do horário de ponta, sendo válida somente aos consumidores da Tarifa Branca, e, por fim, o horário fora de ponta corresponde ao período diário composto pelas horas consecutivas e complementares ao horário de ponta e intermediário. Vale lembrar que existem exceções para algumas distribuidoras. Nos fins de semana e feriados nacionais, por exemplo, todas as horas são consideradas fora de ponta.

Sendo assim, o sistema tarifário é considerado um fator fundamental no desenvolvimento de pesquisas relacionadas à redução dos custos com energia elétrica. Na Seção 2.4 será apresentada a descrição do problema deste trabalho.

2.4 Descrição do problema

O gerenciamento de sistemas de abastecimento de água envolve uma série de desafios, entre os quais se destaca a redução dos custos operacionais, especialmente aqueles relacionados ao consumo de energia elétrica. A operação desses sistemas depende, em grande parte, do uso de bombas hidráulicas para movimentar a água e suprir a demanda dos consumidores em diferentes regiões e horários. Como o custo de energia elétrica é variável ao longo do dia (com horários de ponta e fora de ponta), os momentos em que as bombas operam afetam significativamente o total gasto com energia elétrica. Esse cenário impõe a necessidade de estratégias para a programação das bombas que equilibrem a eficiência do sistema com a minimização dos custos com a eletricidade.

Essa tarefa, de programação das bombas do sistema, é particularmente desafiadora devido à variação das tarifas de energia elétrica ao longo do dia. Além disso, o planejamento do acionamento das bombas também deve atender a critérios operacionais

rigorosos, como garantir o atendimento pleno da demanda hídrica e manter os padrões de qualidade da água distribuída.

A qualidade da água, por sua vez, está diretamente relacionada a fatores como tempos de retenção nos reservatórios e pressões adequadas na rede, o que adiciona novas camadas de complexidade ao problema. Essa interação entre diferentes objetivos operacionais dificulta a busca por soluções simples e eficazes.

Todos esses fatores hidráulicos tornam a modelagem e a otimização operacional tarefas desafiadoras. A transferência de água entre os reservatórios e a troca de demanda, termos já mencionados nesta pesquisa, também são essenciais neste momento, pois permitem o abastecimento dos reservatórios, não sendo necessário – na maioria das vezes – o uso da energia elétrica, uma vez que utilizam a ação da gravidade. Vale lembrar que o termo "troca de demanda" se refere a quando um reservatório da rede passa a suprir a demanda de outro reservatório.

Portanto, o problema de planejar o acionamento das bombas em sistemas de abastecimento de água representa um desafio dinâmico. A resolução eficaz exige ferramentas computacionais e heurísticas, capazes de equilibrar os objetivos de eficiência energética e de qualidade operacional, enquanto lidam com a complexidade das interações hidráulicas e as exigências impostas pelos diferentes cenários tarifários ao longo do dia.

Visando resolver este problema, este trabalho propõe uma heurística que determine a programação das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água visando minimizar os gastos com energia elétrica, sem prejudicar a qualidade e o transporte da água aos centros consumidores. No Capítulo 3 será apresentada a revisão bibliográfica deste trabalho.

Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica deste trabalho focou na análise de heurísticas aplicadas à otimização dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. Esses estudos compuseram uma base importante para o desenvolvimento da heurística proposta.

Em **Zyl, Savic e Walters (2004)**, é apresentado um modelo para determinar ações de controle em sistemas de abastecimento com o objetivo de reduzir os custos com energia elétrica, combinando o Algoritmo Genético com a estratégia de busca Hooke-Jeeves (SCHWEFEL, 1981). O primeiro teste foi realizado com uma rede fictícia, mostrando um desempenho 2,8% superior ao Algoritmo Genético puro. No segundo teste, foi usada uma rede real de Richmond, na Inglaterra. Este estudo é particularmente relevante na otimização de redes hidráulicas e na busca de soluções heurísticas em sistemas complexos, com aplicações práticas para o controle operacional, gerenciamento de pressão e operação de bombas.

O estudo de **Barán, Lücken e Sotelo (2005)** propõe, pela primeira vez, a utilização de seis Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos baseados em Decomposição (MOEAs) para resolver um problema de programação de bombas com quatro objetivos. Para garantir a viabilidade das soluções, foi combinada uma heurística a cada algoritmo. Entre os seis algoritmos testados, o SPEA (Algoritmo Evolutivo da Força de Pareto) obteve os melhores resultados. Este trabalho é significativo para a otimização de sistemas hidráulicos, equilibrando custo, confiabilidade e desempenho.

No trabalho de **López-Ibáñez (2008)**, foi aplicada a estrutura Otimização de Colônias de Formigas (ACO) para o agendamento ótimo de bombas. A proposta visa minimizar o custo elétrico, enquanto garante o cumprimento das restrições do sistema. Em vez de utilizar uma função de penalidade para violações, as violações foram classificadas por importância e as soluções ordenadas com base nessa classificação. O método foi testado em uma rede pequena e em uma grande rede do mundo real, destacando-se pela aplicação inovadora de algoritmos bioinspirados em sistemas hidráulicos.

Kurek e Ostfeld (2013) propuseram dois modelos multiobjetivos que consideram a qualidade da água (medida pela quantidade de desinfetante no tanque) e o tempo que a água permanece nos nós. Utilizando o SPEA, uma metaheurística, e simulações no EPANET, os autores testaram esses modelos em um sistema de abastecimento específico. O primeiro modelo apresentou uma curva de Pareto uniformemente espaçada, indicando bom desempenho do algoritmo, enquanto o segundo modelo indicou que a solução com menor custo de energia elétrica determinava velocidades mais lentas para as bombas. Este estudo aborda a eficiência operacional e o gerenciamento sustentável de recursos em sistemas de abastecimento.

Bagirov et al. (2013) propõem uma abordagem inovadora para a operação das bombas em sistemas de distribuição de água, tratando os tempos de ativação e desativação das bombas como variáveis contínuas. Isso permite a aplicação de uma busca por grade simples para gerar soluções viáveis, seguida pela aplicação do algoritmo de otimização baseado na metaheurística de busca Hooke-Jeeves. Testado em duas instâncias – uma rede de teste do EPANET e uma versão adaptada da rede de Zyl et al. (2004) –, o método foi validado com sucesso, contribuindo significativamente para a otimização da energia elétrica em sistemas de abastecimento de água.

No estudo de **Bonvin et al. (2015)**, foi desenvolvido um modelo para otimizar a programação de bombeamento em configurações ramificadas de tubulações, levando em conta as tarifas de energia elétrica, as características das bombas e as restrições da rede. O modelo propôs uma economia de até 10% na fatura de energia, dependendo das características da rede e da estratégia atual. Este trabalho é essencial para a aplicação de técnicas heurísticas na otimização do agendamento de bombeamento em sistemas de água.

Soler et al. (2016) propõem uma heurística construtiva para resolver o problema de operação de bombas em sistemas de abastecimento de água, com o objetivo de reduzir os custos com energia elétrica. O modelo foi comparado com um modelo matemático inteiro misto proposto por Toledo et al. (2008), demonstrando que, embora os custos de energia fossem mais elevados, o tempo de resolução foi consideravelmente menor. Esse estudo se destaca por sua abordagem prática, mostrando que, em cenários com grande demanda de respostas rápidas, a heurística pode ser mais vantajosa, pois oferece soluções eficientes em termos de tempo, mesmo com um custo energético ligeiramente superior. Este estudo foi crucial para o desenvolvimento da heurística utilizada neste trabalho, influenciando diretamente a escolha do método adotado e seu aperfeiçoamento.

Sousa (2021) desenvolveu um modelo multiobjetivo para otimizar a operação de sistemas de distribuição de água, visando a eficiência hidroenergética. Foram considerados três objetivos principais: redução das perdas por vazamento, diminuição do custo de energia elétrica no bombeamento e maximização da confiabilidade do sistema, que são aspectos cruciais para garantir a sustentabilidade e eficiência do sistema hídrico. O modelo foi implementado utilizando algoritmos genéticos e o simulador hidráulico EPANET. A aplicação do modelo a um sistema hipotético permitiu gerar um conjunto ótimo de regras operacionais, que não apenas melhoraram o desempenho do sistema, mas também serviram como base para futuros aprimoramentos em modelos reais.

Santos et al. (2022) apresentam um modelo de programação inteira mista para otimizar a operação de sistemas integrados de abastecimento de água, utilizando uma heurística Relax and Fix. O modelo combina variáveis inteiras e contínuas para representar a operação das bombas e a alocação de água entre diferentes fontes. O principal objetivo é minimizar os custos operacionais, reduzindo o consumo de energia e melhorando a eficiência geral do sistema. Quando aplicado a um estudo de caso real, o modelo demonstrou seu potencial para fornecer soluções viáveis que podem auxiliar nas decisões estratégicas e operacionais, oferecendo uma base sólida para otimizações em larga escala e contribuindo significativamente para a gestão eficiente dos recursos hídricos.

Shu et al. (2022) propõem um modelo para minimizar o consumo de energia em cidades inteligentes. Embora o estudo não se refira diretamente a sistemas de abastecimento de água, ele se destaca pela aplicação de heurísticas, oferecendo uma

abordagem econômica para o desenvolvimento de projetos estruturais inteligentes, com foco na redução do consumo de energia em diferentes áreas urbanas. A utilização de heurísticas, como as técnicas de otimização combinatória, permite que o modelo seja adaptado para resolver problemas complexos de maneira eficiente. Sua relevância é evidente pela aplicação inovadora dessas técnicas, que podem ser potencialmente aplicadas a sistemas de abastecimento de água, considerando a crescente demanda por soluções inteligentes e sustentáveis para a gestão de recursos urbanos.

Marini et al. (2023) propõem um modelo inovador que integra o EPANET 2.0 com um Algoritmo Genético específico, denominado Pikaia, para otimizar a operação de bombas em sistemas de abastecimento de água, com ênfase na redução do custo de energia. O modelo desenvolvido é notável por superar as limitações encontradas em abordagens anteriores, oferecendo soluções mais precisas e eficientes para a operação das bombas, o que é fundamental para reduzir os custos operacionais. A integração de técnicas existentes com a aplicação de metaheurísticas, como o Algoritmo Genético Pikaia, representa uma contribuição significativa para a programação de bombas em redes de distribuição de água, ao otimizar tanto o consumo energético quanto a confiabilidade do sistema, ampliando as possibilidades de melhorias na gestão de recursos hídricos.

Em síntese, os trabalhos revisados fornecem uma base sólida para a aplicação de heurísticas na minimização dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. No Capítulo 4, será apresentada a heurística HERA, a abordagem matemática proposta neste trabalho, que, assim como os estudos apresentados, visa minimizar os gastos com energia elétrica em sistemas de distribuição de água.

Heurística Proposta

Neste capítulo é descrita a heurística HERA (Heurística para Eficiência e Redução de energia em Abastecimento de água) proposta para o planejamento de operação das bombas hidráulicas, visando a redução dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento. Para o seu desenvolvimento, considera-se redes do tipo malhada e um horizonte de planejamento de 24 horas.

O horizonte de planejamento é dividido em três classes de períodos: NCI (não críticos iniciais), CR (críticos) e NCF (não críticos finais). Os períodos NCI correspondem aos intervalos anteriores ao horário de ponta, quando a tarifa é mais baixa. Os períodos CR representam os horários de ponta, nos quais a tarifa é mais elevada. Já os períodos NCF referem-se aos intervalos subsequentes aos períodos críticos, quando a tarifa volta a ser mais baixa.

Para cada classe de períodos – NCI, NCF e CR – é adotada uma estratégia operacional distinta para as bombas, com o objetivo principal de minimizar os custos com energia elétrica na rede. A heurística HERA também considera outros fatores para alcançar esse objetivo. Entre os principais, estão: a redução do número de acionamentos das bombas, de modo a prolongar a vida útil dos equipamentos e evitar desperdício de energia e a manutenção dos níveis de estoque dos reservatórios, garantindo que o volume no final do horizonte de planejamento esteja próximo ao volume no início do horizonte de planejamento.

Para a implementação desta heurística, são necessárias as seguintes informações:

- As demandas de cada tanque, por período;
- Os volumes máximo, mínimo e inicial dos tanques;
- As tarifas de energia elétrica, por período;
- As vazões das bombas de captação e transferência, bem como dos trechos (tubulações) que permitem a entrada de água nos tanques.

Nas seções seguintes, abordaremos, em detalhes, a programação do sistema de abastecimento em cada classe de períodos – NCI, CR e NCF – de maneira hierárquica, nesta respectiva ordem.

Para as seções 4.1, 4.2 e 4.3, os termos "abastecimento" e "entrada de água" no tanque aparecem com bastante frequência. É importante entender que ambas as expressões se referem ao mesmo fato: elevar o nível da água do tanque por meio da captação de água na rede.

É preciso determinar quando o abastecimento deve ocorrer, para cada reservatório, e a quantidade de água que deve ser introduzida nele, para que seja possível realizar a captação de água na rede. Essa informação será detalhada na Seção 4.4.

4.1 Programação para os períodos NCI

A operação do sistema nos períodos não críticos iniciais (NCI) é dividida em duas etapas. Na primeira, calcula-se o estoque de todos os tanques da rede, utilizando a Equação (4.1), que determina o estoque atual do reservatório, considerando o estoque anterior e o desconto da demanda. Caso haja déficit de água em algum período, busca-se inicialmente resolver o problema por meio da troca de demanda (quando um reservatório da rede supre toda a demanda de outro, durante um período completo) ou, quando possível, pela transferência de água entre reservatórios. Se essas alternativas não forem suficientes, recorre-se à entrada de água no reservatório.

$$I_{j,t} = I_{j,t-1} - d_{j,t} \quad (4.1)$$

Para a Equação (4.1), consideramos:

$I_{j,t}$: o estoque de água do tanque j no período t ;

$d_{j,t}$: a demanda total que o tanque j deve abastecer no período t .

É fundamental observar que, se já ocorreu a entrada de água em um período anterior (t_q) e for necessário abastecer o reservatório novamente em um período posterior (t_p), é preferível realizar a entrada de água imediatamente após o período t_q (ou seja, em t_{q+1}). Esse ajuste é feito sempre que possível, buscando otimizar a operação e reduzir custos.

Procedimento - Operação NCI - 1ª etapa

Calcular os estoques dos períodos NCI conforme a Equação (4.1)

Se algum estoque ($I_{j,t}$) está abaixo do nível mínimo

Se este reservatório j , ao deixar de suprir alguns de seus centros de consumo no período t , atingir o volume mínimo e se algum outro reservatório k da rede puder abastecer estes respectivos centros de consumo

É realizada a **troca de demanda**

Senão

Se o reservatório j pode receber água de algum outro reservatório k da rede

e se o reservatório j pode atingir o volume mínimo com essa transferência de água

É realizada a **transferência de água entre reservatórios**

Senão

Se em algum período anterior a t (t_q) já foi realizado o abastecimento do reservatório j

Se neste período t_q o abastecimento foi realizado de forma parcial

É realizado o **abastecimento no período t**

Senão

É realizado o **abastecimento no período posterior à t_{q+1}**

Senão

É realizado o **abastecimento no período t**

Senão

Nada é realizado

Após a conclusão da primeira etapa, segue-se para a segunda. Nesta fase, calcula-se o estoque dos tanques durante os horários de ponta (períodos CR), utilizando, novamente, a Equação (4.1), sem qualquer tipo de abastecimento no tanque. Desta análise, surgem três possibilidades:

1. Em nenhum período CR o estoque de água está abaixo do limite mínimo;
2. Apenas o último período CR está com estoque de água no tanque abaixo do desejado;

3. Em mais de um período CR o estoque de água está abaixo do limite mínimo.

Para a primeira possibilidade, nenhum ajuste operacional é realizado e seguimos para a operação do sistema durante os períodos críticos. Para a segunda possibilidade, devemos, primeiramente, tentar solucionar o problema com a troca de demanda e/ou a transferência de água entre os tanques. Se não for possível, calcula-se a quantidade de água necessária para que o tanque encerre o horário de ponta com, pelo menos, seu volume mínimo. Com base nesse valor, obtido pela Equação (4.2), pode-se definir em quantos períodos NCI será necessária a entrada de água no reservatório. Essa quantidade é expressa na Equação (4.3).

$$\theta_{1j} = H_j^{min} - I_{j,w_1} \quad (4.2)$$

$$p_{1j} = \frac{(\theta_{1j})}{Ve_j} \quad (4.3)$$

Para as Equações (4.2) e (4.3), consideramos:

θ_{1j} : quantidade de água necessária para que o tanque encerre o horário de ponta o volume mínimo.

H_j^{min} : o volume mínimo do tanque j ;

w_1 : o último período CR ;

p_{1j} : quantidade de períodos em que deve ser realizada a entrada de água no tanque j .

Ve_j : a vazão de entrada de água no tanque j .

Caso ocorra a terceira possibilidade, calculamos a quantidade de água necessária para que o tanque encerre o horário de ponta com, pelo menos, seu volume mínimo, assim como ocorre na segunda. A diferença está no fato de que, nesta terceira possibilidade, não há tentativas em resolver o problema com a troca de demanda e/ou transferência de água. Como são vários períodos que sofrem com a falta de água, essa estratégia não solucionaria o problema.

É importante ressaltar que esse processo tem como objetivo evitar a necessidade de ligar as bombas durante o horário de ponta, quando a tarifa de energia elétrica é mais elevada. Com base nos valores obtidos nas Equações (4.2) e (4.3), podem ser

adotadas três estratégias: Estratégia da Captação Antecipada Mínima (AM), Estratégia do Estoque Máximo (EM) ou Estratégia da Captação Ampliada (CA).

Se o valor calculado na Equação (4.3) for menor ou igual à quantidade de períodos NCI disponíveis, é viável implementar a Estratégia AM. No entanto, se as condições do tanque impedirem a aplicação dessa estratégia, passaremos para a Estratégia EM. Por outro lado, se o valor for superior à quantidade de períodos NCI disponíveis, devemos optar diretamente pela Estratégia EM. Caso as condições do tanque também não permitam a implementação da Estratégia EM, em ambas as situações, a última alternativa será adotar a Estratégia CA.

A seguir descreveremos detalhadamente de cada uma dessas estratégias. A Estratégia da Captação Antecipada Mínima (AM) consiste em permitir a entrada da quantidade de água necessária, através da captação, para que o estoque no último período crítico atinja seu volume mínimo. Para isso, a entrada de água será realizada nos últimos períodos NCI cujos estoques ainda não foram abastecidos, conforme o valor obtido na Equação (4.3). Caso essa operação não possa ser realizada devido ao estoque ultrapassar o volume máximo em algum período, recorreremos à Estratégia EM.

A Estratégia do Estoque Máximo (EM), por sua vez, consiste em realizar a entrada de água nos tanques, durante os horários NCI de modo que o estoque no último período NCI alcance o seu volume máximo. Embora essa estratégia nem sempre elimine a necessidade de acionamento da bomba durante o horário de ponta, ela pode contribuir significativamente para a redução do tempo de captação no período crítico.

Para implementá-la, é necessário calcular o volume de água que falta no estoque do último período NCI para que chegue ao volume máximo; para isso, utilizamos a Equação (4.4). Em seguida, aplica-se a Equação (4.5) para determinar a quantidade de períodos não críticos iniciais em que a entrada de água deve ser realizada, através da captação. Após esses cálculos, o abastecimento deve ser realizado na quantidade de períodos obtida, priorizando os últimos horários NCI disponíveis.

$$\theta_{2j} = H_j^{max} - I_{j,w_2} \quad (4.4)$$

$$p_{2j} = (\theta_{2j})/V e_j \quad (4.5)$$

Para as Equações (4.4) e (4.5), consideramos:

θ_{2j} : volume de água que falta no estoque do tanque j no último período NCI para que chegue ao volume máximo;

H_j^{max} : volume máximo do tanque j ;

w_2 : o último período NCI;

p_{2j} : quantidade de períodos NCI em que deve ser realizada a entrada de água no tanque j ;

V_{ej} : a vazão de entrada de água no tanque j .

Neste momento, é importante destacar um aspecto relevante. Ao adotar a Estratégia EM, pode ocorrer que, durante sua execução, alguns reservatórios, em alguns períodos, não consigam permitir a entrada de água total, devido à ultrapassagem do volume máximo. Nesse cenário, antes de encerrar a aplicação da Estratégia EM e avançar para a Estratégia CA, é fundamental verificar se essa limitação se aplica a apenas 1 ou 2 períodos ou a mais de 2 períodos.

Se a incapacidade de captação se restringir a 1 ou 2 períodos, é aconselhável concluir a Estratégia EM, mesmo que isso comprometa o seu propósito de alcançar um volume final NCI máximo e, em seguida, analisar qual das duas estratégias (EM ou CA) proporcionará um volume final NCI maior. Essa análise é essencial, pois, mesmo em um caso excepcional, a escolha entre as estratégias pode influenciar significativamente a eficiência da captação e a operação do sistema. Caso a limitação de captação ocorra em mais de 2 períodos, cancelamos a Estratégia EM e seguimos para a aplicação da Estratégia CA.

Por fim, abordaremos a Estratégia CA, que consiste em realizar a entrada de água no reservatório em todos os períodos NCI. Para evitar que, nesta estratégia, o abastecimento seja feito de forma fracionada, estabelecemos algumas condições. Todas as operações realizadas na primeira parte da operação NCI são canceladas, e o abastecimento do reservatório é iniciado quando for possível realizá-lo por completo, ou seja, quando a água puder entrar durante todo o período.

Se, em algum período futuro, não puder ser realizada a entrada de água em sua totalidade, devido à ultrapassagem do volume máximo e, no período anterior, o abastecimento tiver sido feito em todo o período, será permitida a entrada parcial, que consiste na entrada de água apenas em parte do período. Por outro lado, se não for

possível realizar o abastecimento completo e, no período anterior, já tiver sido feita a entrada parcial, o novo abastecimento deve ser evitado.

Nessa situação, a entrada de água, por captação, só poderá ser realizado novamente quando for viável realizar a entrada de água completa, abrangendo todo o período. O procedimento descrito abaixo traz uma síntese desta segunda etapa da operação do sistema nos horários NCI.

Independentemente da abordagem adotada durante essa segunda fase – seja pela Estratégia AM, EM ou CA – cada uma contribuiu para otimizar a captação de água e minimizar os custos associados. Com os estoques devidamente ajustados, avançamos para a próxima etapa: a operação do sistema durante os horários críticos, nos quais a eficiência se torna ainda mais crucial.

Procedimento - Operação NCI - 2ª etapa

Calcular os estoques dos períodos CR conforme a Equação (4.1)

Se o último estoque crítico ($I_{j,c}$) está abaixo do nível mínimo

Se há outros estoques abaixo do nível mínimo

Calcular p_{j1} utilizando a Equação (4.3)

Se p_{j1} é menor ou igual a quantidade de períodos *NCI* disponíveis para a captação

Aplica-se a estratégia A

Se o acionamento precisar ser interrompido em algum período

Calcular p_{j2} utilizando a Equação (4.5)

Se p_{j2} é menor ou igual a quantidade de períodos *NCI* disponíveis para a captação

Aplica-se a estratégia EM

Se o acionamento precisar ser interrompido em mais de 2 períodos

Aplica-se a estratégia CA

Se o acionamento precisar ser interrompido em 2 ou menos períodos

É realizada uma comparação entre a estratégia EM e a estratégia CA e escolhe-se aquela cujo estoque *NCI* final for maior

Senão

Aplica-se a estratégia CA

Senão

Calcular p_{j2} utilizando a Equação (4.5)

Se p_{j2} é menor ou igual a quantidade de períodos *NCI* disponíveis para a captação

Aplica-se a estratégia EM

Se o acionamento precisar ser interrompido em mais de 2 períodos

Aplica-se a estratégia CA

Se o acionamento precisar ser interrompido em 2 ou menos períodos

É realizada uma comparação entre a estratégia EM e a estratégia CA e escolhe-se aquela cujo estoque *NCI* final for maior

Senão

Aplica-se a estratégia CA

Senão

Se este reservatório j , ao deixar de suprir alguns de seus centros de consumo no período c , atingir o volume mínimo

e se algum outro reservatório k da rede puder abastecer estes respectivos centros de consumo

É realizada a troca de demanda

Senão

Se o reservatório j pode receber água de algum outro reservatório k da rede

e se o reservatório j pode atingir o volume mínimo com essa transferência de água

É realizada a transferência de água entre reservatórios

Senão

Calcular p_{j1} utilizando a Equação (4.3)

Se p_{j1} é menor ou igual a quantidade de períodos *NCI* disponíveis para a captação

Aplica-se a estratégia A

Se o acionamento precisar ser interrompido em algum período

Calcular p_{j2} utilizando a Equação (4.5)

Se p_{j2} é menor ou igual a quantidade de períodos *NCI* disponíveis para a captação

Aplica-se a estratégia EM

Se o acionamento precisar ser interrompido em mais de 2 períodos

Aplica-se a estratégia CA

Se o acionamento precisar ser interrompido em 2 ou menos períodos

É realizada uma comparação entre a estratégia EM e a estratégia CA e escolhe-se aquela cujo estoque *NCI* final for maior

Senão

Aplica-se a estratégia CA

Senão

Calcular p_{j2} utilizando a Equação (4.5)

Se p_{j2} é menor ou igual a quantidade de períodos *NCI* disponíveis para a captação

Aplica-se a estratégia EM

Se o acionamento precisar ser interrompido em mais de 2 períodos

Aplica-se a estratégia CA

Se o acionamento precisar ser interrompido em 2 ou menos períodos

É realizada uma comparação entre a estratégia EM e a estratégia CA e escolhe-se aquela cujo estoque *NCI* final for maior

Senão

Aplica-se a estratégia CA

Senão

Nada acontece

4.2 Programação para os períodos CR

Neste momento, a prioridade é evitar o acionamento das bombas, ou limitar esse acionamento ao menor tempo possível. Inicialmente, todos os estoques dos reservatórios são calculados nos horários críticos (CR), sem qualquer entrada de água. Para isso, utilizamos a Equação (4.1), já apresentada anteriormente.

Após realizar esses cálculos, verifica-se se o último estoque crítico apresenta volume abaixo do limite mínimo. Desta análise, três situações podem ocorrer:

1. Nenhum dos estoques nos períodos críticos, incluindo o último, está abaixo do volume mínimo;
2. Apenas o último estoque no período crítico está abaixo do volume mínimo;
3. Além do último, outros estoques nos períodos críticos também apresentam volume abaixo do limite mínimo.

Na primeira situação, nenhum procedimento é necessário, representando a melhor solução possível. Na segunda situação, em que apenas o estoque no último período crítico está abaixo do volume mínimo, tenta-se, inicialmente, solucionar o problema por meio da troca de demanda ou transferência de água. Se isso não for viável, torna-se necessário realizar a entrada de água pelo menor tempo possível.

Na terceira situação, em que outros estoques nos períodos críticos, além do último, apresentam volume abaixo do limite mínimo, devemos recorrer, imediatamente, à entrada de água no reservatório. Essa operação, no entanto, segue algumas regras. Para que a entrada de água não fique fracionada, devemos, inicialmente, calcular a quantidade de água que falta no reservatório neste último período crítico. Para isso, utilizamos as Equações (4.6) e (4.7).

$$\theta_{3j} = H_j^{min} - I_{j,w_3} \quad (4.6)$$

$$p_{3j} = (\theta_{3j})/Ve_j \quad (4.7)$$

Para as Equações (4.6) e (4.7), consideramos:

θ_{3j} : quantidade de água que falta no tanque j no último período crítico para que ele atinja o volume mínimo;

H_j^{min} : o volume mínimo do tanque j ;

w_3 : o último período CR ;

p_{3j} : quantidade de períodos críticos em que deve ser realizada a entrada de água no tanque j , por captação;

Ve_j : a vazão de entrada de água no tanque j .

Após determinar o valor de p_{j3} , opta-se por iniciar a entrada de água a partir dos últimos períodos críticos ou do primeiro período em que o estoque de água ficou abaixo do limite mínimo. A escolha da estratégia irá depender das características do reservatório. Outro aspecto importante dessa etapa é a necessidade frequente de interromper a entrada de água no reservatório devido à ultrapassagem do volume máximo. Nesses casos, a entrada de água no reservatório é feita de forma parcial, ou seja, não durante todo o período.

No entanto, essa situação pode ocorrer repetidamente, resultando em um ciclo de liga e desliga em curtos intervalos de tempo, o que torna a solução inviável. Para evitar esse problema, é estabelecida uma regra geral: quando um reservatório não pode receber água por um período completo, verifica-se se, no período anterior, a entrada de água foi parcial. Se foi, a entrada de água não é realizado no período seguinte. A água só deve ser introduzida no reservatório quando puder entrar de forma contínua, sem interrupções. Esse processo é repetido até que o estoque no último período CR atinja exatamente o seu limite mínimo. O procedimento apresentado a seguir traz uma síntese dessa operação.

Procedimento - Operação CR

Calcular os estoques dos períodos CR conforme a Equação (4.1)

Se o último estoque crítico ($I_{j,c}$) está abaixo do nível mínimo

Se há outros estoques abaixo do nível mínimo

Calcular p_{j3} utilizando a Equação (4.7)

Permitir a entrada de água por p_3 períodos, iniciando no primeiro período cujo estoque de água é inferior ao limite mínimo

Senão

Se este reservatório j , ao deixar de suprir alguns de seus centros de consumo no período final, atingir o volume mínimo

e se algum outro reservatório k da rede puder abastecer estes respectivos centros de consumo

É realizada a **troca de demanda**

Senão

Se o reservatório j pode receber água de algum outro reservatório k da rede

e se o reservatório j pode atingir o volume mínimo com essa transferência de água

É realizada a **transferência de água entre reservatórios**

Senão

Permitir a entrada de água por p_3 períodos, selecionando os últimos horários críticos

Senão

Nada é realizado

Vale ressaltar que essa operação segue esse formato apenas quando as redes de abastecimento utilizam um horizonte de planejamento composto por períodos não críticos iniciais (NCI), críticos (CR) e não críticos finais (NCF). Em casos especiais, quando o horizonte de planejamento é formado apenas por períodos NCI e CR, a operação proposta precisa ser adaptada, uma vez que o estoque no final do horizonte de planejamento é um período crítico e deve atender à condição de concluir a operação com estoques próximos ao estoque inicial.

4.3 Programação para os períodos NCF

Neste momento da programação, o objetivo é assegurar que o estoque final esteja dentro do intervalo desejado, ou seja, próximo ao estoque inicial. Para isso, os estoques são calculados utilizando a Equação (4.8). Em seguida, verifica-se o estoque final: o seu volume deve ser igual ou superior ao limite mínimo e atender à condição expressa na restrição (4.9). Se for, não são realizadas ações nesta operação.

$$I_{j,t} = I_{j,t-1} - d_{j,t} \quad (4.8)$$

$$(1 - \beta) \cdot H_j^{ini} \leq I_{j,w_4} \leq (1 + \beta) \cdot H_j^{ini} \quad (4.9)$$

Para a Equação (4.8) e a restrição (4.9), consideramos:

$I_{j,t}$: o estoque de água do tanque j no período t ;

$d_{j,t}$: a demanda total que o tanque j deve abastecer no período t .

H_j^{ini} : o volume inicial do tanque j ;

w_4 : o último período NCF;

β : a porcentagem de variação do estoque no final do horizonte de planejamento em relação ao estoque inicial.

Caso a escassez de água ocorra apenas no último período, busca-se solucionar o problema por meio da troca de demanda ou transferência de água. Se essas alternativas forem inviáveis, procede-se com a entrada de água apenas na quantidade de períodos necessária para atingir o volume adequado, da restrição (4.9). Para isso, utilizam-se as Equações (4.10) e (4.11). O abastecimento deve ocorrer nos últimos períodos não críticos iniciais. Nesse momento da operação, não há risco de que essa entrada de água ultrapasse o volume máximo.

$$\theta_{4j} = L_{min_j} - I_{j,w_4} \quad (4.10)$$

$$p_{4j} = \frac{(\theta_{4j})}{Ve_j} \quad (4.11)$$

Para as Equações (4.10) e (4.11), consideramos:

θ_{4j} : quantidade de água que falta no tanque j no último período NCF;

L_{min_j} : o volume mínimo de água que o estoque final pode possuir;

w_4 : o último período NCF;

p_{4j} : quantidade de períodos em que deve ser realizada a entrada de água no tanque j , por captação;

Ve_j : a vazão de entrada de água no tanque j .

No terceiro e último caso, quando não apenas o último período não atende às condições necessárias, mas também existem outros estoques abaixo do limite mínimo, procede-se diretamente para o abastecimento de água, isto é, a entrada de água no reservatório. Para isso, utilizam-se as Equações (4.10) e (4.11). A diferença está no fato de que a entrada de água nos reservatórios deve ser iniciada no primeiro período NCF em que o volume esteja abaixo do limite mínimo. Nesse momento da operação,

também não há riscos de que essa entrada de água ultrapasse o volume máximo. No procedimento apresentado a seguir está uma síntese dessa operação.

Procedimento - Operação NCF

Calcular os estoques dos períodos NCF conforme a Equação (4.1)

Se o estoque (I_{j,w_4}) está abaixo do nível mínimo

Se outros estoques anteriores estão abaixo do nível mínimo

Calcular p_{j4} utilizando a Equação (4.11)

É realizada a **entrada de água nos reservatórios**, dando início no primeiro período cujo estoque está abaixo do nível mínimo

Senão

Se este reservatório j , ao deixar de suprir alguns de seus centros de consumo no período w_4 , atingir o volume mínimo

e se algum outro reservatório k da rede puder abastecer estes respectivos centros de consumo

É realizada a **troca de demanda**

Senão

Se o reservatório j pode receber água de algum outro reservatório k da rede

e se o reservatório j pode atingir o volume mínimo com essa transferência de água

É realizada a **transferência de água entre reservatórios**

Senão

Calcular p_{j4} utilizando a Equação (4.11)

É realizada a **entrada de água nos reservatórios**, optando pelos últimos períodos não críticos iniciais.

Senão

Nada é realizado

E assim, com a finalização da operação não crítica final, podemos partir para a etapa seguinte: a operação das bombas de captação. Até este momento, todas as entradas de água nos reservatórios, seja por transferência ou pela captação da rede, já estão definidas.

4.4 Captação

Nem todos os reservatórios recebem água com a ajuda de bombas hidráulicas. Em muitas redes de distribuição de água, o abastecimento é feito por gravidade. Podemos citar, como exemplos, as redes Van Zyl et al. (2004) e AnyTown (1999), utilizadas para os testes numéricos. A rede de Van Zyl et al. (2004) possui dois reservatórios, apenas um deles recebe água com a ajuda de uma bomba. Na rede de AnyTown, nenhum reservatório é interligado a bombas.

Diante dessa situação, podemos concluir que nem toda entrada de água nos tanques - determinada nas operações anteriores - implica no acionamento de alguma bomba. Algumas das operações determinadas acima são utilizadas apenas para calcular a quantidade de água necessária no reservatório, e não para determinar o liga e desliga de algum equipamento.

O mais importante, desta etapa, é trabalharmos com as bombas de captação, pois são elas que permitem a entrada de água na rede, e - posteriormente - nos reservatórios.

É essencial priorizar a captação de água nos períodos não críticos iniciais, momento no qual a tarifa é mais barata. O primeiro passo desta operação consiste em calcular todo o volume de água necessário (que deverá entrar na rede), para todos os reservatórios, em cada classe de períodos (NCI, CR ou NCF).

A água necessária para os períodos NCI e CR deve ser captada durante os horários NCI. Se não for possível captar toda a água nesses horários, a maior quantidade possível será captada, de forma a minimizar a necessidade de captação durante os horários críticos (CR). O volume restante será captado nos períodos críticos, iniciando no primeiro período em que a entrada de água for necessária em algum reservatório.

A captação da quantidade de água necessária para os períodos não críticos finais (NCF) deve ocorrer durante os próprios períodos NCF, preferencialmente nos primeiros horários disponíveis. Como a água captada pode permanecer em trânsito pelas tubulações antes de atingir os reservatórios, não há impedimento em realizar a captação antes do momento exato em que o reservatório receberá a água.

Com a operação de captação pronta e a de outras possíveis bombas hidráulicas da rede, é realizada a simulação dos resultados no software EPANET. O programa analisa se a solução é viável. Se obtida uma simulação bem sucedida, a heurística é finalizada. Caso sejam obtidos problemas com pressões negativas, é realizado o procedimento de correção de pressão, que será explicada na próxima seção. No procedimento abaixo está apresentado uma síntese dessa operação de captação.

Procedimento - Captação

Q_1 é o volume de água que deve entrar nos reservatórios da rede durante o período *NCI*

Q_2 é o volume de água que deve entrar nos reservatórios da rede durante o período *CR*

Q_3 é o volume de água que deve entrar nos reservatórios da rede durante o período *NCF*

q_1 é o máximo de volume a ser captado no horário *NCI*

Se $q_1 \geq (Q_1 + Q_2)$

 Captar $(Q_1 + Q_2)$ durante o horário *NCI*, optando pelos primeiros períodos.

 Não realizar a captação no horário *CR*

 Captar Q_3 durante o horário *NCF*, optando pelos primeiros períodos

Senão

 Acionar as bombas de captação durante todo o horário *NCI*

 Captar $(Q_1 + Q_2 - q_1)$ durante o horário *CR*, iniciando no primeiro período onde ocorre a entrada de água em algum reservatório

 Captar Q_3 durante o horário *NCF*, optando pelos primeiros períodos

4.5 Correção de Pressão

Esse procedimento consiste em acionar pelo menos uma bomba de captação no horário que apresentou problema. Este acionamento, no entanto, é feito de modo estratégico. Imagine que as bombas de captação estão ligadas durante os períodos x ao y , e o problema da pressão negativa ocorreu no horário $x - 1$. O método irá reprogramar os controles para que a bomba de captação permaneça ligada do horário $x - 1$ até o horário y .

Caso o problema ocorra no período $y + 1$, o procedimento irá reprogramar os controles para que a bomba seja acionada de x a $y + 1$. E ainda, caso o período com problema de pressão negativa não seja nenhum dos dois ($x - 1$ ou $y + 1$), o método irá acionar a bomba apenas durante aquele período em específico. Abaixo está uma síntese dessa operação.

Essa estratégia tende a solucionar, rapidamente, os possíveis problemas. Caso não resolva, aplicamos essa operação a mais uma bomba de captação, e assim sucessivamente, até que o problema seja resolvido e seja obtida uma simulação bem sucedida no software de simulação hidráulica EPANET.

Procedimento - Correção de Pressão

Se houver pressão negativa no período t ($t = hh : mm$)

Se ocorreu captação completa no período $t - 1$

Estender a captação até o período t

Se ocorreu captação completa no período $t + 1$

Adiantar a captação, iniciando no período t_4

Senão

Acionar a bomba durante o período t (do horário $hh : mm$ até fim do período)

Senão

Nada é aplicado

Na próxima seção abordaremos a utilização do software EPANET, uma ferramenta muito usada para simulações hidráulicas. Ela será fundamental para a validação dos resultados obtidos neste trabalho.

Software de simulação hidráulica

EPANET

O EPANET é um software amplamente utilizado para simulações hidráulicas e de qualidade da água em sistemas de abastecimento. Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), ele permite modelar o comportamento de redes de distribuição, analisando fatores como fluxos, pressões e concentrações de substâncias transportadas na água. Sua versatilidade e precisão o tornaram uma ferramenta indispensável para pesquisadores, engenheiros e planejadores que atuam no setor de saneamento.

Uma das principais contribuições do EPANET é a capacidade de avaliar o desempenho de sistemas complexos em diferentes condições operacionais. Ele simula como bombas, válvulas e reservatórios interagem com as tubulações e os nós da rede, fornecendo dados detalhados sobre o funcionamento hidráulico. Isso é fundamental para garantir a confiabilidade e a eficiência de um sistema de abastecimento na prática.

No contexto da redução de custos com energia elétrica, o EPANET se destaca como um aliado estratégico. Ele permite testar diferentes estratégias de operação, como ligar e desligar bombas em horários específicos, e verificar os impactos dessas decisões na distribuição de água e nos níveis de pressão dos reservatórios. Com isso, os gestores

podem identificar soluções que otimizem o consumo de energia sem comprometer o atendimento à demanda.

A simulação das estratégias de "liga e desliga" das bombas é um exemplo prático da aplicação do EPANET. Por meio do software, é possível prever se os períodos de operação programados serão suficientes para atender às necessidades do sistema. Além disso, ele auxilia na identificação de possíveis falhas, como quedas excessivas de pressão ou incapacidade de atender ao consumo em determinados horários.

Outro ponto importante é a facilidade com que o EPANET permite a análise de cenários. Alterando variáveis como horários de funcionamento das bombas, condições de demanda e níveis iniciais nos reservatórios, os usuários podem avaliar a viabilidade de diversas estratégias operacionais. Essa flexibilidade é essencial para identificar a melhor solução, especialmente em sistemas que precisam operar sob diferentes condições de tarifa de energia elétrica.

Além de sua aplicação na operação, o EPANET também contribui para o planejamento de longo prazo. Ao permitir simulações detalhadas, ele ajuda a prever o comportamento da rede em diferentes horizontes de planejamento, considerando o crescimento populacional, mudanças no padrão de consumo e outros fatores. Isso garante que as soluções implementadas hoje sejam sustentáveis no futuro.

Em resumo, o EPANET é mais do que uma ferramenta de simulação: é um componente estratégico na gestão de sistemas de abastecimento de água. Sua capacidade de avaliar a viabilidade de soluções como o controle do funcionamento de bombas proporciona economia de recursos, melhoria na operação e maior segurança no atendimento à população.

A heurística HERA, desenvolvida nesta pesquisa, foi implementada em linguagem Python para otimizar os custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. Como sabemos, o seu principal objetivo é definir estratégias de operação para as bombas, buscando minimizar os custos de energia, respeitando as restrições operacionais da rede.

A integração da programação da heurística com o software EPANET foi essencial, uma vez que o EPANET permite simular redes hidráulicas de abastecimento, fornecendo resultados precisos sobre pressões, vazões e níveis em reservatórios ao longo do tempo. Para realizar essa integração, foi criado um código em Python que utiliza as soluções

propostas pela heurística HERA como base para a programação horária das bombas no EPANET. Esse código insere automaticamente os resultados da heurística no modelo hidráulico, substituindo os padrões de operação anteriores por novos padrões otimizados, que são inseridos por meio dos controles simples. Em seguida, é realizada a simulação hidráulica.

O código verifica se a simulação no EPANET foi bem-sucedida, isto é, se todas as restrições hidráulicas foram atendidas sem violação de pressões mínimas ou máximas. Caso a solução proposta não seja factível, o código permite identificar os pontos de falha e realizar o procedimento de Correção de Pressão, visando corrigir as falhas com pressões negativas.

De modo geral, a integração entre a heurística HERA e o EPANET, por meio da programação em Python, possibilita um processo automatizado, eficiente e robusto para a operação otimizada de sistemas de abastecimento de água.

No capítulo seguinte, serão apresentados os testes numéricos realizados com duas redes utilizadas na literatura. As soluções obtidas através da heurística proposta foram simuladas no software.

Testes Numéricos

A heurística desenvolvida foi implementada na linguagem de programação Python, utilizando o ambiente Google Collaboratory com suas configurações padrão. Para a realização dos testes numéricos, foram selecionadas duas redes de abastecimento da literatura: a rede proposta por Van Zyl et al. (2004) e a rede Anytown modificada, conforme descrito por Walters et al. (1999). Também foi utilizado o software de simulação hidráulica EPANET. Todos os experimentos numéricos foram executadas em um notebook Dell com 16 GB de RAM, operando sob o sistema Windows 11 Pro.

Nos experimentos com a rede de Van Zyl et al. (2004), foram analisados três cenários distintos de demanda. No primeiro cenário, adotou-se os valores de demanda originais. No segundo cenário, foi aplicado um incremento de 5% na demanda dos pontos de consumo, em todos os períodos. No terceiro cenário, o aumento da demanda foi de 10%. De forma análoga, nos testes realizados com a rede Anytown modificada, de Walters et al. (1999), foram considerados os mesmos três cenários de demanda, mas agora utilizamos dois sistemas tarifários diferentes: o padrão da rede e o sistema de tarifas brasileiro.

6.1 Rede de Van Zyl et al. (2004)

A rede descrita por Van Zyl et al. (2004) é composta por um manancial, duas bombas de captação, dois reservatórios (um dos quais interligado a uma bomba hidráulica).

variáveis, o que motivou a utilização de valores médios das vazões ao longo do horizonte de planejamento, extraídos do arquivo de simulação do EPANET.

Os valores adotados foram: $400,46 m^3/h$ para a entrada de água no Tanque A e $497,23 m^3/h$ para a bomba de transferência (Pump 3B), que alimenta o Tanque B. Para as bombas de captação (Pump 1A e 2B), idênticas entre si, foi utilizada uma vazão média de $390,85 m^3/h$ para cada bomba.

As demandas dos centros de consumo CB e CA, associados aos reservatórios B e A, respectivamente, estão apresentadas na Figura Z e na Tabela 6.1, expressas em m^3/h . Os demais nós da rede não possuem consumo.

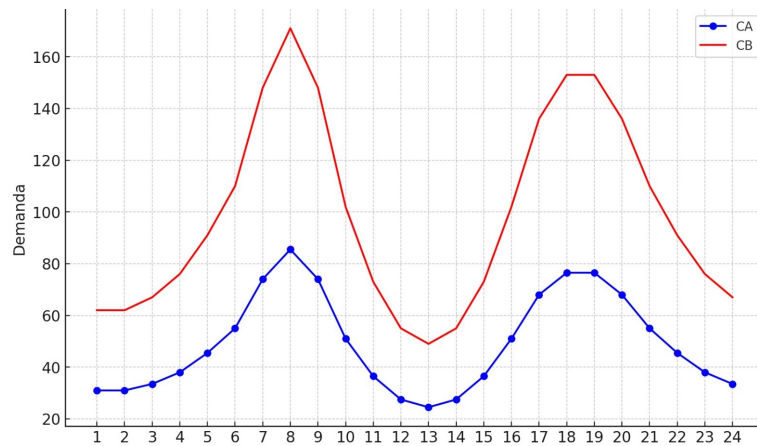


Figura 6.2: Demandas dos centros de consumo - Rede de Van Zyl et al. (2004)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CA	31	31	33.5	38	45.5	55	74	85.5	74	51	36.5	27.5
CB	62	62	67	76	91	110	148	171	148	102	73	55
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
CA	24.5	27.5	36.5	51	68	76.5	76.5	68	55	45.5	38	33.5
CB	49	55	73	102	136	153	153	136	110	91	76	67

Tabela 6.1: Demandas dos centros de consumo - Rede de Van Zyl et al. (2004)

As tarifas de energia elétrica para cada período do horizonte de planejamento estão listadas na Tabela 6.2, expressas em unidades monetárias (u.m.). É importante destacar que, enquanto a rede original de Van Zyl et al. (2004) considera um horizonte de simulação das 07h às 07h do dia seguinte, neste trabalho, optou-se por adotar o intervalo das 0h às 24h. Os períodos fora do horário de ponta estão compreendidos

entre 0h e 7h, quando a tarifa de energia elétrica é de 0,0244 unidades monetárias. O período de ponta, compreendido entre 7h e 24h, apresenta uma tarifa de 0,1194 unidades monetárias.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0244	0.0244	0.0244	0.0244	0.0244	0.0244	0.0244	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194

Tabela 6.2: Tarifas de energia elétrica - Rede de Van Zyl et al. (2004)

Os volumes máximo, mínimo e inicial dos reservatórios, expressos em metros cúbicos (m^3) estão apresentados na Tabela 6.3.

Tanques	Diâmetro	Volume mínimo	Volume máximo	Volume inicial
A	25 m	0 m^3	2.453, 12 m^3	2.207, 81 m^3
B	20 m	0 m^3	3.140, 00 m^3	2.983, 00 m^3

Tabela 6.3: Características dos tanques - Rede de Van Zyl et al. (2004)

Como os trechos assinalados com asterisco permitem o fluxo de água em ambas as direções, um tanque pode atender à demanda de outro e o Tanque A tem a capacidade de transferir água para o Tanque B, na ausência de captação durante o período. Essa característica é considerada na heurística; sempre que houver escassez de água nos reservatórios, a primeira alternativa será recorrer à troca de demandas ou à transferência de água entre os reservatórios, uma vez que essas opções são mais econômicas em comparação com a captação.

Após a implementação da heurística HERA, as soluções obtidas foram incorporadas ao software EPANET, em que foram submetidas a uma simulação hidráulica para avaliação de desempenho. Esse teste visa verificar a eficácia das soluções em uma rede real, garantindo a factibilidade de aspectos e restrições hidráulicas referentes aos sistemas de abastecimento. Nas seções seguintes, serão apresentados e discutidos em detalhes os resultados obtidos para os três cenários analisados.

6.1.1 Primeiro Cenário

Neste primeiro cenário de testes, não foram realizadas alterações nos dados de demanda originais. A simulação no EPANET foi realizada com sucesso, evidenciando a

viabilidade da abordagem adotada. As Figuras 6.2 ilustram os períodos de operação das bombas (Pump 1A, 2B e 3B, em ordem), as transferências de água entre os reservatórios e as trocas de demanda. Quanto à troca de demanda, é apresentado apenas o gráfico 'Tanque A suprindo a demanda do Tanque B', uma vez que o Tanque B não abastece o Tanque A em nenhum momento.

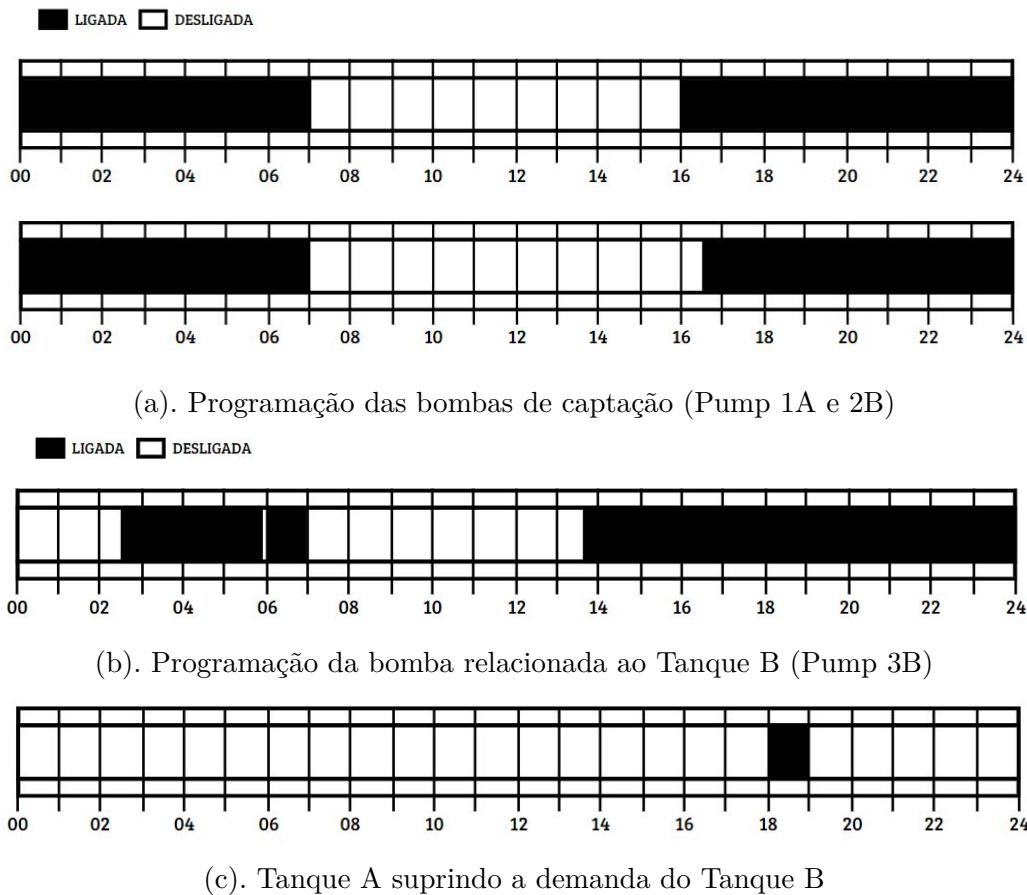
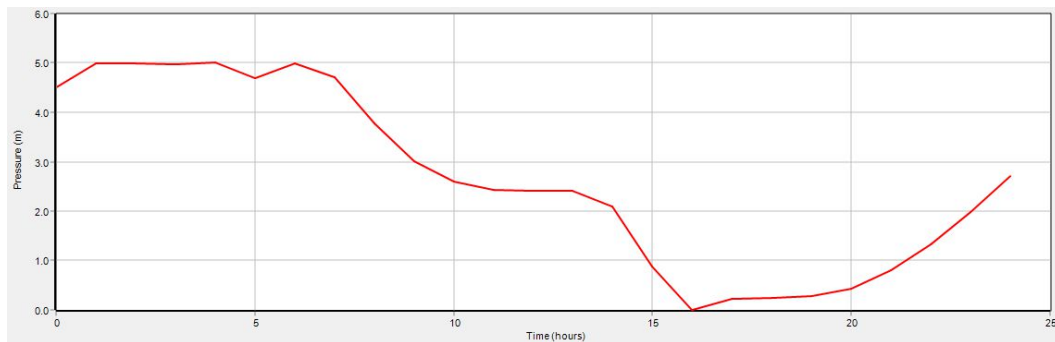


Figura 6.3: Programação das bombas - Primeiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)

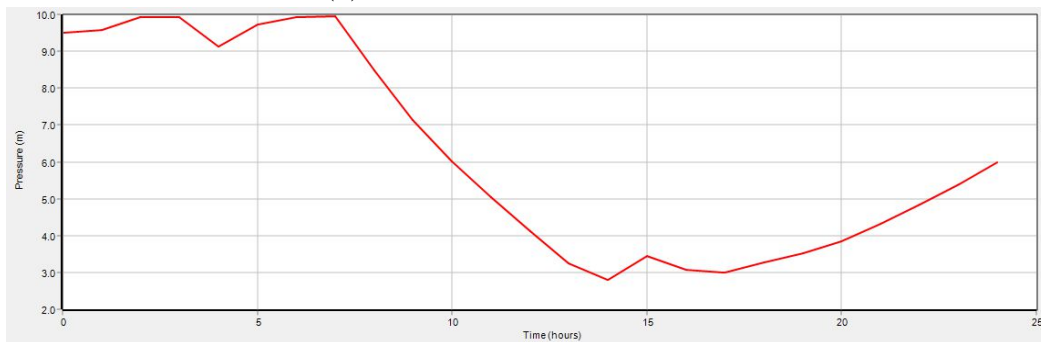
Após a simulação no EPANET, a qual foi bem sucedida, foi possível observar alguns aspectos da rede. Ao longo dos períodos, os níveis dos reservatórios foram mantidos dentro das especificações, exceto no último horário. A condição de que o estoque dos reservatórios no último horário tenha uma diferença de 20% em relação ao volume inicial não foi atendida após a simulação do EPANET. Isso ocorreu devido a fatores hidráulicos que não estão contemplados na heurística. Os volumes finais dos reservatórios A e B foram, aproximadamente, 40% e 36% inferiores ao volume inicial,

respectivamente. A Figura 6.3 ilustra os níveis de água nos tanques ao longo do horizonte de planejamento, expressos em metros.

Podemos perceber que, em nenhum período do horizonte de planejamento, os estoques ultrapassam o nível máximo ou ficam inferiores ao nível mínimo dos reservatórios. O Tanque A tem como nível mínimo e máximo os valores de 0 m e 5 m, respectivamente. Para o Tanque B são utilizados os valores de 0 m para o nível mínimo e 10 m para o nível máximo. .



(a). Nível de água no Tanque A



(b). Nível de água no Tanque B

Figura 6.4: Nível de água nos tanques - Primeiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)

De acordo com o relatório gerado pelo EPANET, o custo total com energia elétrica, determinado pela heurística, foi de 351,99 unidades monetárias. A Tabela 6.4 compara esse resultado com a simulação padrão do EPANET e com outras abordagens disponíveis na literatura. Nota-se que a heurística HERA obteve uma solução satisfatória.

	Heurística HERA	López-Ibáñez et al. (2008)	Marini (2023)	Simulação do EPANET
Valor (u.m.)	351,99	326,50	341,09	456,15

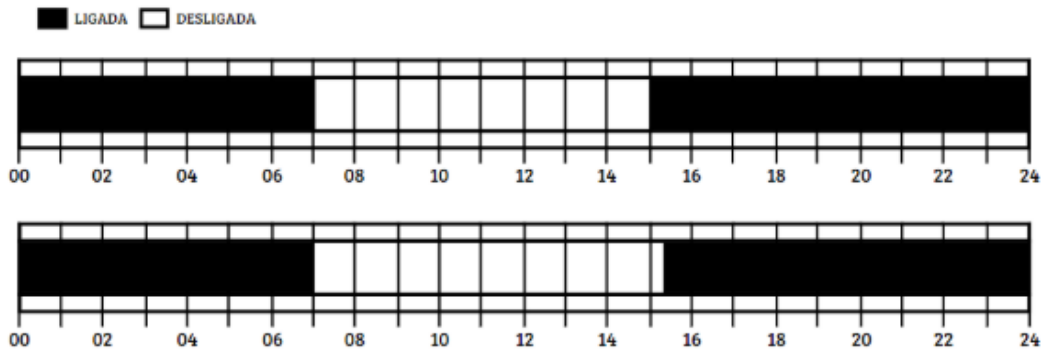
Tabela 6.4: Comparação de resultados - Primeiro Cenário com a Rede de Van Zyl et al. (2004)

Conforme era esperado, os métodos exatos obtêm soluções de custo melhores em comparação às obtidas pela heurística. No entanto, a proximidade dos custos indica que a heurística HERA apresenta um potencial significativo. No próximo cenário, a demanda receberá um aumento de 5%.

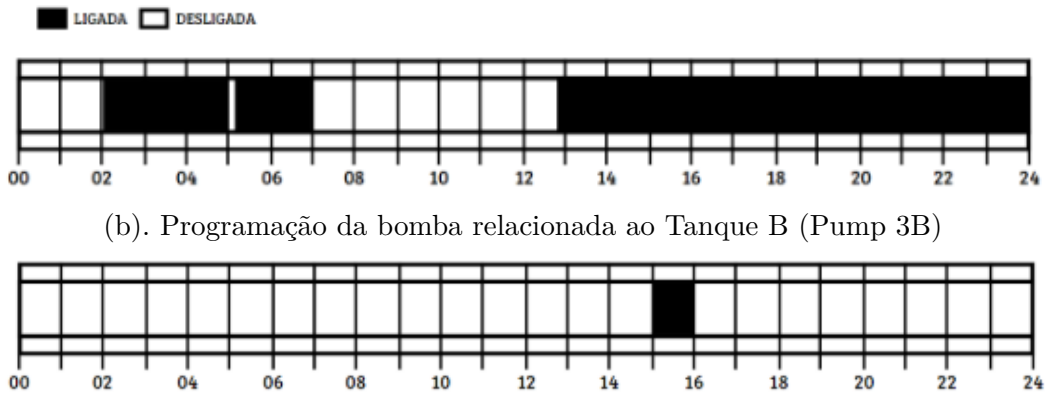
6.1.2 Segundo Cenário

Neste segundo cenário de testes, a demanda dos centros de consumo foi elevada em 5%. Os resultados obtidos com a aplicação da heurística foram integrados no EPANET por meio de controles simples. Para manter a coerência nos testes, a base de demanda dos centros de consumo foi ajustada. O centro CB, cuja demanda inicial era de $360 \text{ m}^3/\text{h}$, foi ajustado para $378 \text{ m}^3/\text{h}$, refletindo o aumento de 5%. O centro CA, que originalmente tinha uma demanda de $180 \text{ m}^3/\text{h}$, passou para $189 \text{ m}^3/\text{h}$ após o ajuste.

A simulação no EPANET foi bem sucedida. As Figuras 6.4 apresentam a programação de liga e desliga das bombas (Pump 1A, 2B e 3B, em ordem), as transferências de água entre os reservatórios e as trocas de demanda. Em relação à troca de demanda, observa-se a mesma situação do primeiro cenário: apenas o gráfico 'Tanque A suprindo a demanda do Tanque B' é exibido, pois o Tanque B não abastece o Tanque A em nenhum momento.



(a). Programação das bombas de captação (Pump 1A e 2B)



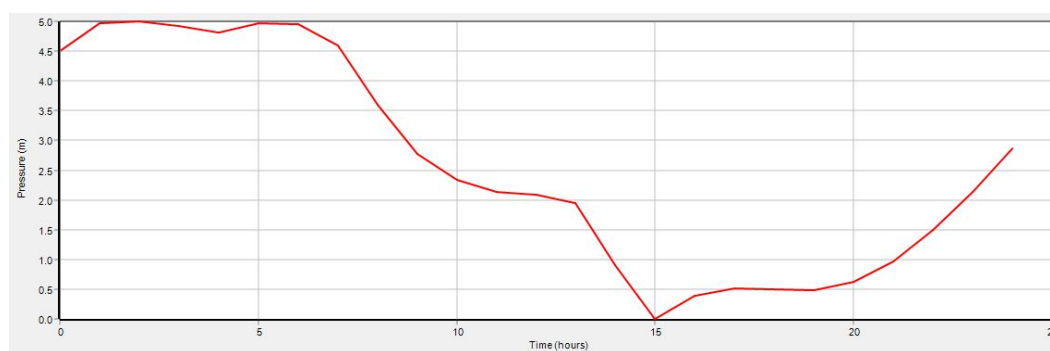
(b). Programação da bomba relacionada ao Tanque B (Pump 3B)

(c). Tanque A suprimindo a demanda do Tanque B

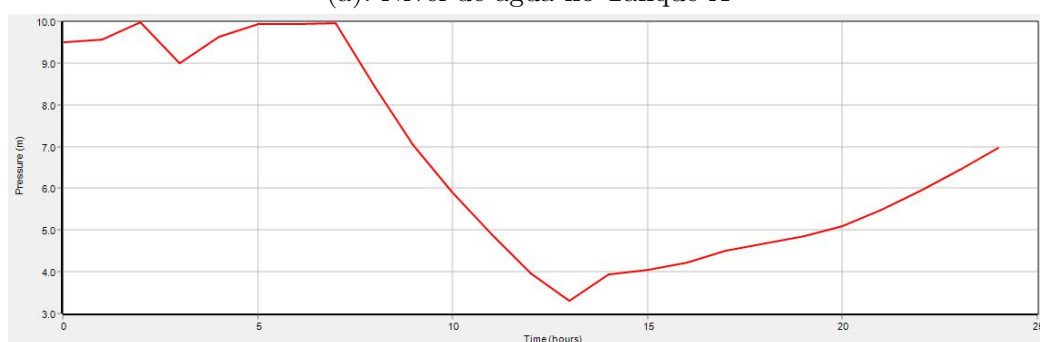
Figura 6.5: Programação das bombas - Segundo Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)

Após a simulação no EPANET, que foi bem sucedida, foi possível identificar características da rede semelhantes às observadas no primeiro cenário. Os volumes finais dos reservatórios A e B não cumpriram a condição da heurística de se manterem 20% próximos do volume inicial. Eles apresentaram reduções de aproximadamente 36% e 26%, respectivamente, em relação ao volume inicial. A Figura 6.5 apresenta os níveis de água nos tanques ao longo do horizonte de planejamento, expressos em metros.

Podemos perceber que, assim como ocorreu no primeiro teste, em nenhum período do horizonte de planejamento, os estoques ultrapassam o nível máximo ou ficam inferiores ao nível mínimo dos reservatórios. O Tanque A tem como nível mínimo e máximo os valores de 0 m e 5 m, respectivamente. Para o Tanque B são utilizados os valores de 0 m para o nível mínimo e 10 m para o nível máximo.



(a). Nível de água no Tanque A



(b). Nível de água no Tanque B

Figura 6.6: Nível de água nos tanques - Segundo Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)

De acordo com o relatório gerado pelo EPANET, o custo total com energia elétrica, determinado pela heurística, foi de 389,22 unidades monetárias. A Tabela 6.5 compara esse valor com a simulação padrão EPANET para as mesmas condições operacionais. Nota-se, mais uma vez, que a heurística apresentou uma solução satisfatória.

	Heurística HERA	Simulação do EPANET
Valor (u.m.)	389,22	451,69

Tabela 6.5: Comparação de resultados - Segundo Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)

Na próxima seção, será realizada a análise do terceiro cenário, que incorpora um aumento de 10% na demanda dos centros de consumo.

6.1.3 Terceiro Cenário

Neste terceiro e último cenário de testes, a demanda dos centros de consumo foi ampliada em 10%. Para garantir a consistência nos experimentos, ajustou-se a base de demanda dos centros de consumo. O centro CB, cuja demanda inicial era de $360 \text{ m}^3/h$, foi modificado para $396 \text{ m}^3/h$, refletindo o aumento de 10%. Da mesma forma, o centro CA, que inicialmente possuía uma demanda de $180 \text{ m}^3/h$, teve seu valor ajustado para $198 \text{ m}^3/h$.

A simulação no EPANET foi realizada com sucesso. As Figuras 6.6 ilustram a programação das bombas (Pump 1A, 2B e 3B, em ordem), as transferências de água entre os reservatórios e as trocas de demandas. Quanto à troca de demanda, apenas o gráfico 'Tanque A suprindo a demanda do Tanque B' é exibido, pois o Tanque B não abastece o Tanque A.

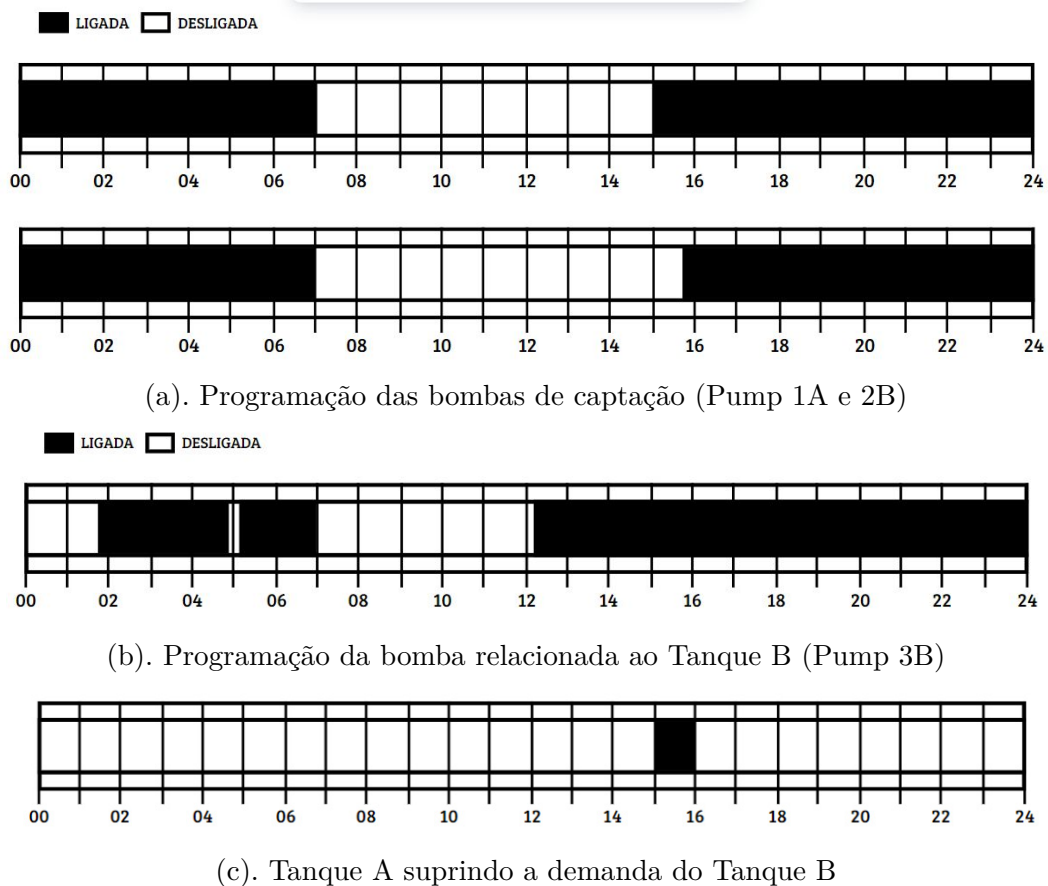
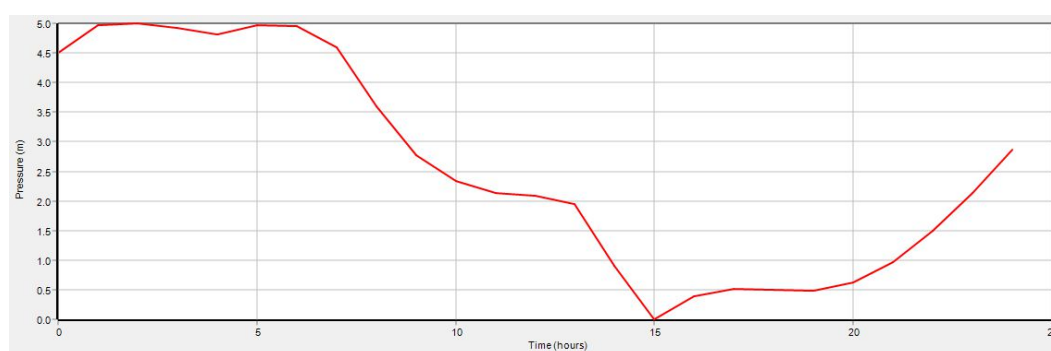


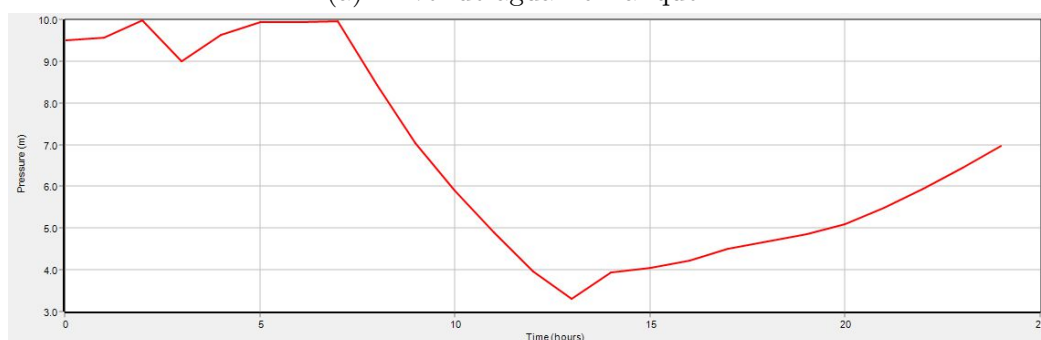
Figura 6.7: Programação das bombas - Terceiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)

Após a simulação no EPANET, que foi concluída com sucesso, observou-se que as características da rede se mantiveram semelhantes às dos primeiros dois cenários. Os volumes finais dos reservatórios A e B não cumpriram a condição da heurística de estarem 20% próximos do volume inicial. Eles apresentaram reduções de cerca de 36% e 26%, respectivamente, em relação aos volumes iniciais. A Figura 6.7 apresenta os níveis de água nos tanques ao longo do horizonte de planejamento, expressos em metros.

É possível observar que, assim como ocorreu no primeiro e no segundo teste, em nenhum período do horizonte de planejamento, os estoques ultrapassam o nível máximo ou ficam inferiores ao nível mínimo dos reservatórios. O Tanque A tem como nível mínimo e máximo os valores de 0 m e 5 m, respectivamente. Para o Tanque B são utilizados os valores de 0 m para o nível mínimo e 10 m para o nível máximo.



(a). Nível de água no Tanque A



(b). Nível de água no Tanque B

Figura 6.8: Nível de água nos tanques - Terceiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)

Conforme indicado no relatório do EPANET, o custo total com energia elétrica, obtido pela heurística, foi de 386,39 unidades monetárias. A Tabela 6.6 compara esse valor com a simulação padrão do EPANET, para as mesmas condições operacionais. Percebe-se que a heurística HERA mostrou-se, mais uma vez, satisfatória.

	Heurística HERA	Simulação do EPANET
Valor (u.m.)	386,39	478,98

Tabela 6.6: Comparação de resultados - Terceiro Cenário com Rede de Van Zyl et al. (2004)

Através destes três cenários, vale observar que o custo de energia, quando a demanda é aumentada em 5% (no segundo cenário), é ligeiramente superior ao custo de energia observado neste terceiro cenário, onde a demanda foi ampliada em 10%. Esse fenômeno deve-se às manipulações hidráulicas realizadas pelo EPANET durante a simulação, que estão além do controle da heurística.

Quando uma bomba permanece ligada por períodos prolongados, há ajustes em variáveis como potência e vazão hidráulica, o que, em algumas situações, pode resultar em uma minimização dos custos com energia elétrica. Esse comportamento ocorre porque o sistema hidráulico, ao operar de maneira mais estável, tende a consumir menos energia. Esse fator justifica o custo de eletricidade ser inferior no terceiro cenário, mesmo com o aumento de 10% na demanda.

Com base nos três cenários analisados na rede de Van Zyl et al. (2004), podemos concluir que a heurística demonstrou ter potencial. Além de apresentar custos mais baixos em comparação com a simulação padrão do EPANET, os resultados obtidos pela heurística HERA não geraram nenhuma advertência durante a simulação, eliminando a necessidade de aplicar heurísticas de correção de pressão.

6.2 Rede Anytown (1999)

Os testes subsequentes utilizarão a rede de abastecimento Anytown modificada, proposta por Walters et al. (1999). Trata-se de uma variação da rede hipotética Anytown originalmente proposta por Walski et al. (1987). A rede contém dezenove nós de consumo, tubulações, três bombas de captação idênticas e três reservatórios, oferecendo uma visão simplificada do funcionamento de uma rede de abastecimento real. A Figura 6.8 ilustra a rede citada.

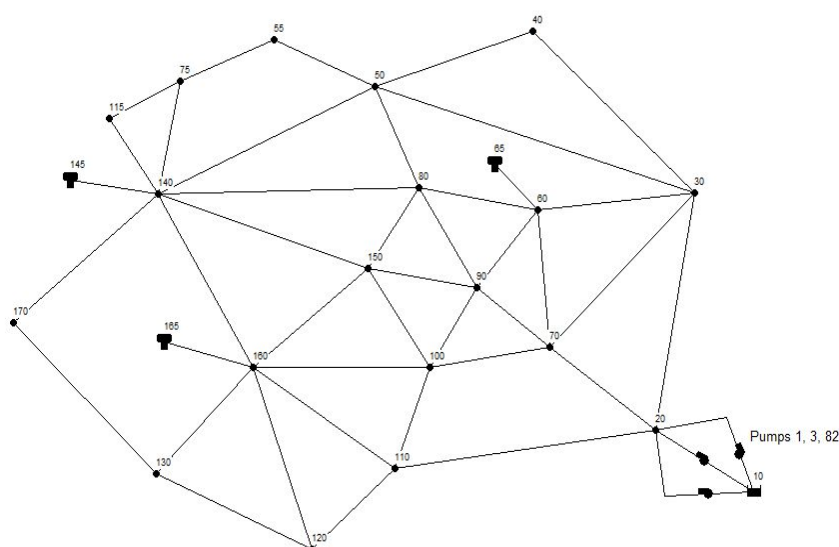


Figura 6.9: Rede Anytown Modificada

O horizonte de planejamento adotado para a simulação foi de 24 horas, subdividido em 24 períodos de 1 hora. As informações relativas à cota, diâmetro, comprimento e rugosidade das tubulações estão detalhadas no Apêndice B. Esses dados foram extraídos diretamente do arquivo da rede utilizado no software EPANET, e estão também documentados em Walters et al. (1999).

Para a implementação da heurística, são considerados os parâmetros já mencionados: vazões das bombas e dos trechos de entrada nos reservatórios, demanda dos centros de consumo, tarifas ao longo do período, e volumes máximo, mínimo e inicial dos reservatórios. A demanda e as tarifas de energia seguem conforme Walters et al. (1999).

Na rede modelada no EPANET, assim como no artigo de Walters et al. (1999), as vazões - das bombas e dos trechos - são variáveis, determinadas por curvas características que relacionam vazão com altura manométrica. Contudo, para o desenvolvimento da heurística, não foi possível considerar as vazões como variáveis, o que motivou a utilização de valores médios das vazões ao longo do horizonte de planejamento, extraídos do arquivo de simulação do EPANET.

Os valores adotados foram: 282.867,00 gal/h para a entrada de água no Tanque 65, 152.531,40 gal/h para a entrada de água no Tanque 165 e 257.604,60 gal/h para

a entrada de água no Tanque 145. Para as bombas de captação (1, 3 e 82), idênticas entre si, foi utilizada uma vazão média de 175.468,2 gal/h para cada bomba.

Os volumes mínimos considerados foram de 50.000 galões para os tanques 65 e 165, e de 400.000 galões para o tanque 145. Quanto aos volumes máximos, adicionou-se 30% aos valores indicados por Walters et al. (1999): 325.000 galões para os tanques 65 e 165, e 1.820.000 galões para o tanque 265. Essa adição visa compensar o volume de água nas tubulações, que, por estar diretamente ligado ao nível dos tanques, pode ser considerado um armazenamento secundário. Essas informações estão apresentados na Tabela 6.7.

Tanques	Volume mínimo	Volume máximo	Volume inicial
65	50.000 <i>gal</i>	325.000 <i>gal</i>	50.000 <i>gal</i>
165	50.000 <i>gal</i>	325.000 <i>gal</i>	50.000 <i>gal</i>
145	400.000 <i>gal</i>	1.820.000 <i>gal</i>	400.000 <i>gal</i>

Tabela 6.7: Características dos tanques - Rede de Anytown Modificada

As demandas dos centros de consumo estão apresentadas na Tabela 6.8, expressas em GPM (galões por minuto). A Tabela 6.9 mostra os fatores multiplicadores correspondentes a cada demanda, de acordo com os períodos considerados. Para a implementação da heurística, os valores da Tabela 6.8 são multiplicados por 60, convertendo as demandas em vazão por hora, já que o horizonte de planejamento abrange 24 períodos de 1 hora cada.

Nós	20	30	40	50	55	60	70	75	80	90	100	110	115	120	130	140	150	160	170
Demanda	500	200	200	200	-	500	500	-	500	1000	500	500	-	200	200	200	200	800	200

Tabela 6.8: Demanda dos centros de consumo (GPM) - Rede de Anytown Modificada

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1	1	1	0.9	0.9	0.9

Tabela 6.9: Fatores multiplicativos - Rede de Anytown Modificada

Para esta rede, foram adotados dois sistemas de tarifas: o padrão (detalhado na Tabela 6.10, em unidades monetárias) e outro baseado nas tarifas brasileiras. Para o cenário brasileiro, utilizou-se a modalidade horo-sazonal verde, a mais comum no grupo

A4, que abrange a maioria dos sistemas de abastecimento de água. Os valores tarifários considerados foram de R\$ 0,49162/kWh no horário de ponta (das 18h às 21h) e R\$ 0,31148/kWh fora do horário de ponta (nos demais períodos), conforme dados da CPFL Paulista. Eles estão detalhados na Tabela 6.11.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	0.8	0.8	0.8	0.2	0.2	0.2

Tabela 6.10: Tarifas de energia elétrica padrão - Rede de Anytown Modificada

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.49	0.49	0.49	0.31	0.31	0.31

Tabela 6.11: Tarifas de energia elétrica brasileiras - Rede de Anytown Modificada

Uma característica importante da rede é que, teoricamente, todos os reservatórios têm capacidade de abastecer todos os centros de consumo, pois suas cotas estão acima das cotas desses centros. No entanto, para o desenvolvimento da heurística, torna-se necessário definir, de maneira padronizada, quais nós cada reservatório deverá atender. Assim, o reservatório 65 será responsável por abastecer os nós 20, 30, 60, 70 e 90. O reservatório 165 ficará encarregado dos nós 120, 130, 160 e 170. Já o reservatório 145 atenderá os nós restantes: 40, 50, 55, 75, 80, 100, 110, 115, 140 e 150.

Apesar dessa padronização, pode ocorrer que um reservatório precise abastecer um nó que não está originalmente atribuído a ele, auxiliando outro reservatório que esteja com nível de água insuficiente. Essa flexibilidade é extremamente benéfica para a redução dos custos com energia elétrica, pois possibilitar essa "troca de demanda" não gera custos adicionais para a rede, ao contrário do que aconteceria com uma nova captação de água.

Após a implementação da heurística, as soluções obtidas foram simuladas no software EPANET e submetidas a uma simulação hidráulica para avaliação de desempenho. Esse teste tem como objetivo verificar a eficácia das soluções em uma rede real. Nas próximas seções, os resultados obtidos para os seis cenários analisados serão apresentados e discutidos, abrangendo três cenários para cada tipo de sistema tarifário.

6.2.1 Cenários com tarifas padrão

6.2.1.1 Primeiro Cenário

Neste primeiro cenário de testes, foram utilizadas as demandas originais. Os resultados obtidos com a heurística HERA foram implementados no EPANET, utilizando controles simples. Na simulação inicial foi gerado um problema com pressão negativa. No entanto, com o auxílio do procedimento de correção de pressão, o problema foi facilmente resolvido e, assim, obtida uma simulação bem sucedida. Na Figura 6.9 está apresentada a operação das bombas de captação (1, 3 e 82, nesta ordem) ao decorrer do horizonte de planejamento.

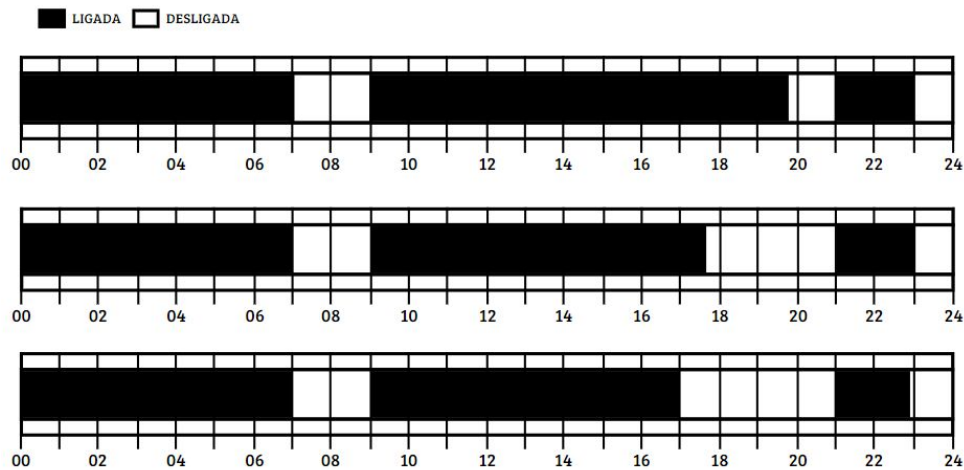
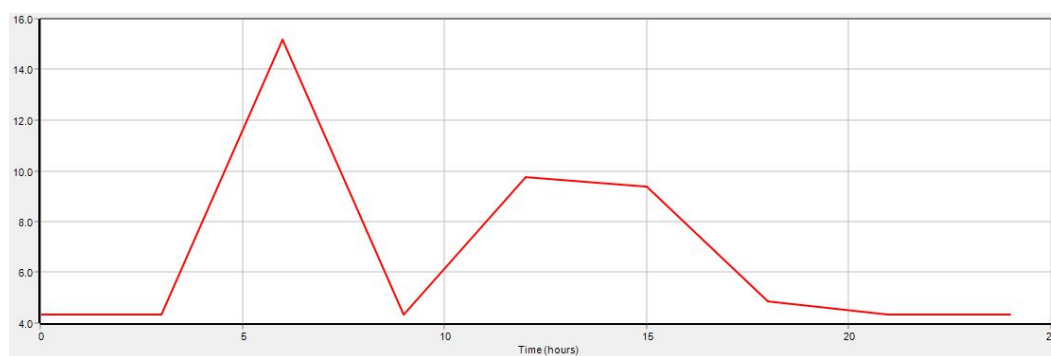
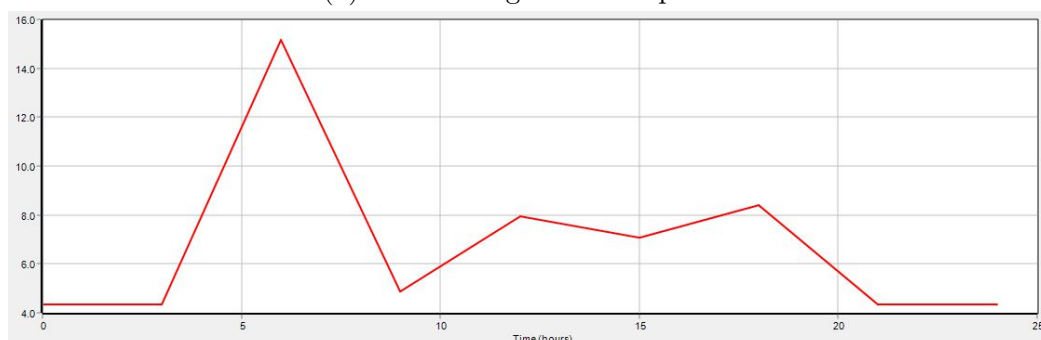


Figura 6.10: Programação das bombas - Primeiro Cenário com Rede de Anytown Modificada

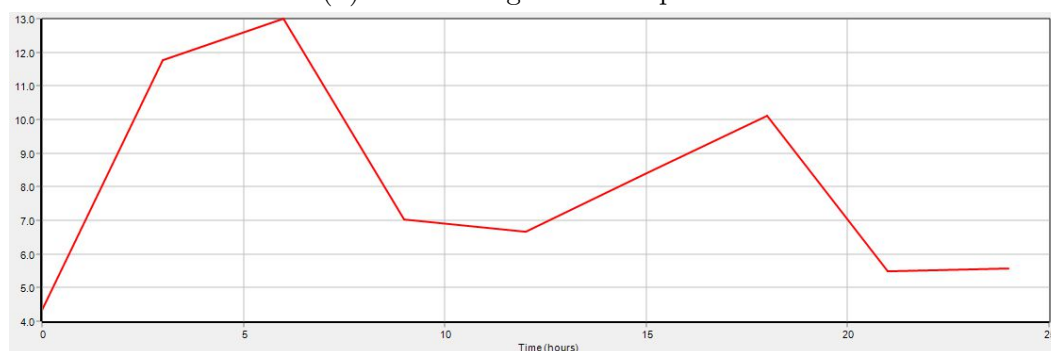
Após a simulação no EPANET, foi possível identificar alguns aspectos importantes da rede. A condição da heurística de manter o estoque final próximo ao estoque inicial será sempre atendida, uma vez que, nesta rede, o estoque inicial é equivalente ao estoque mínimo. Portanto, o volume do estoque final será, necessariamente, igual ou superior ao estoque inicial. A Figura 6.11 ilustra os níveis de água nos tanques ao longo do horizonte de planejamento, expressos em metros.



(a). Nível de água no Tanque 65



(b). Nível de água no Tanque 165



(c). Nível de água no Tanque 145

Figura 6.11: Nível de água nos tanques - Primeiro Cenário com Rede de Anytown Modificada

De acordo com o relatório gerado pelo EPANET, o custo total com energia elétrica, obtido pela heurística, foi de 3271.08 unidades monetárias. Ao comparar esse resultado com a simulação padrão do EPANET e com outras abordagens descritas na literatura, percebe-se que a heurística HERA mostrou-se satisfatória. A Tabela 6.12 oferece uma comparação desses resultados.

	Heurística HERA	Costa (2016)	Simulação do EPANET	Batista do Egito (2023)
Valor (u.m.)	3271,08	3578,66	3965,22	3253,47

Tabela 6.12: Comparação de resultados - Primeiro Cenário com Rede de Anytown Modificada

Na próxima seção, será abordada a análise do segundo cenário, no qual haverá um incremento de 5% na demanda dos centros de consumo.

6.2.1.2 Segundo Cenário

Neste segundo cenário de testes, a demanda dos nós foi aumentada em 5%. Os resultados obtidos com a heurística HERA foram implementados no EPANET, utilizando controles simples. Na simulação inicial foi gerado um problema com pressão negativa. No entanto, com o auxílio do procedimento de correção de pressão, o problema foi facilmente resolvido e assim, obtida uma simulação bem sucedida. Na Figura 6.11 estão as soluções obtidas para a operação das bombas 1, 3 e 82, respectivamente.

Assim como ocorreu no primeiro teste, a condição da heurística de manter o estoque final próximo ao estoque inicial será sempre atendida, uma vez que o estoque inicial é equivalente ao estoque mínimo. A Figura 6.12 ilustra os níveis de água nos tanques ao longo do horizonte de planejamento, expressos em metros.

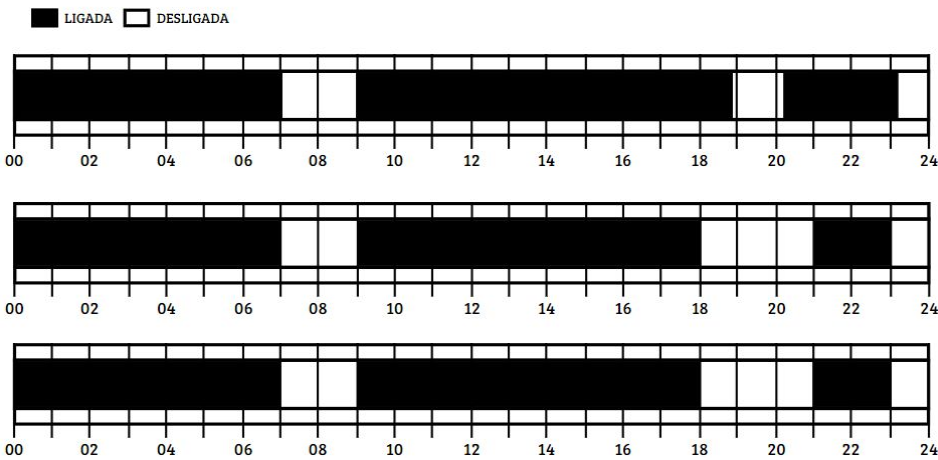
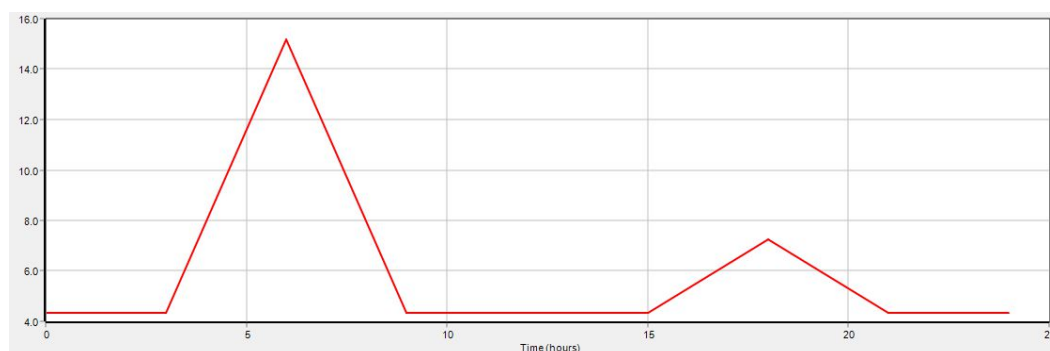
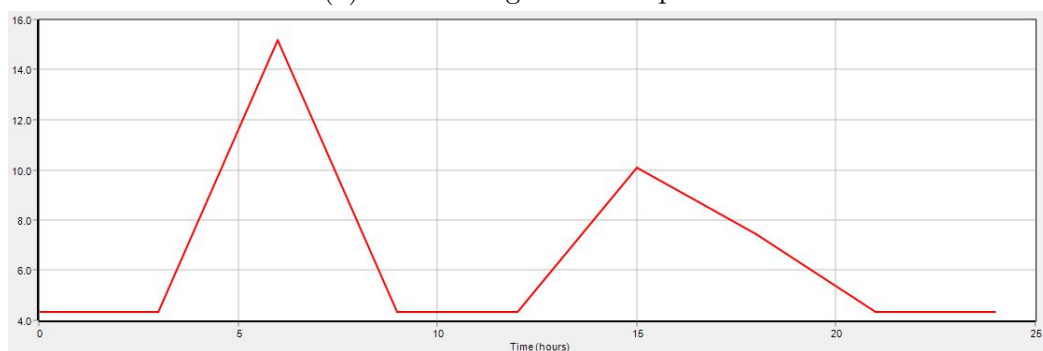


Figura 6.12: Programação das bombas - Segundo Cenário com Rede de Anytown Modificada

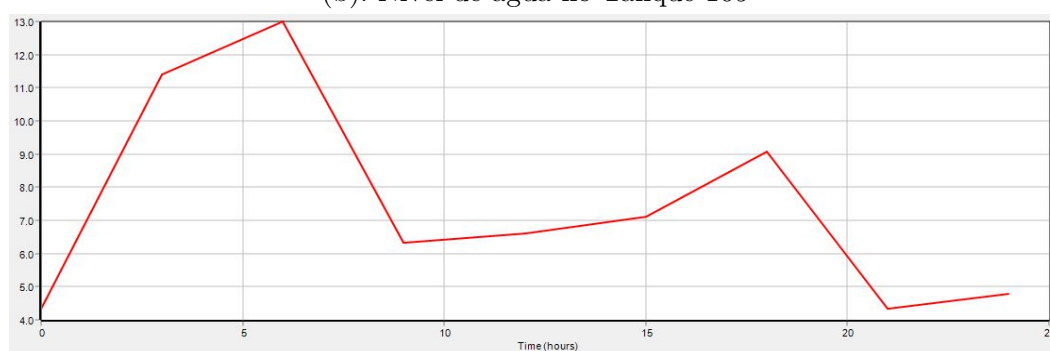
De acordo com o relatório gerado pelo EPANET, o custo total com energia elétrica, obtido pela heurística, foi de 3416.36 unidades monetárias. Ao comparar esse resultado com a simulação padrão do EPANET, percebe-se que a heurística HERA mostrou-se, mais uma vez, bastante eficiente na gestão dos recursos hídricos. A Tabela 6.13 oferece uma comparação desses resultados.



(a). Nível de água no Tanque 65



(b). Nível de água no Tanque 165



(c). Nível de água no Tanque 145

Figura 6.13: Nível de água nos tanques - Segundo Cenário com Rede de Anytown Modificada

	Heurística HERA	Simulação do EPANET
Valor (u.m.)	3416,36	4037,73

Tabela 6.13: Comparação de resultados - Segundo Cenário com Rede de Anytown Modificada

Na próxima seção, será abordada a análise do terceiro cenário, onde haverá um aumento de 10% na demanda dos centros de consumo.

6.2.1.3 Terceiro Cenário

Neste terceiro cenário, a demanda dos nós foi aumentada em 10%. Os resultados obtidos foram implementados no EPANET, utilizando controles simples. Diferente do primeiro e segundo cenário, a simulação inicial já foi bem sucedida, não sendo necessário o uso do procedimento de correção de pressão. Na Figura 6.13 estão as soluções obtidas para a operação das bombas.

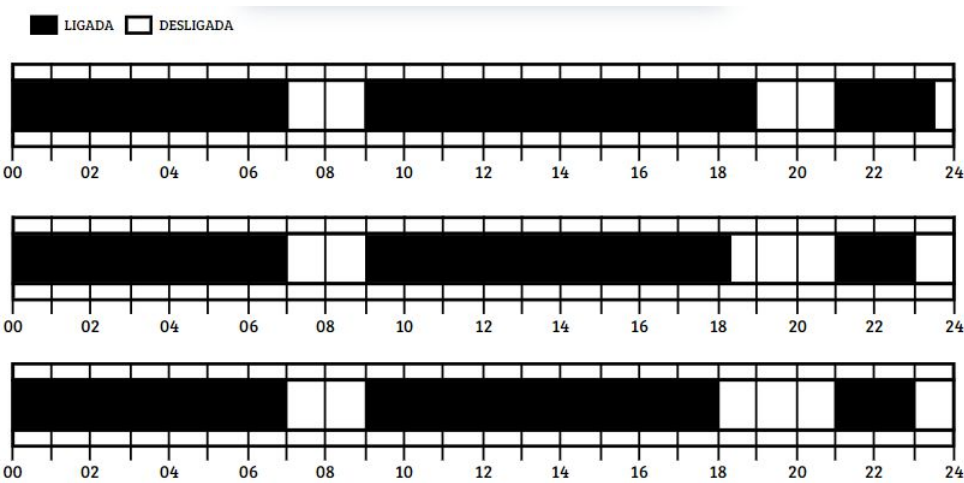
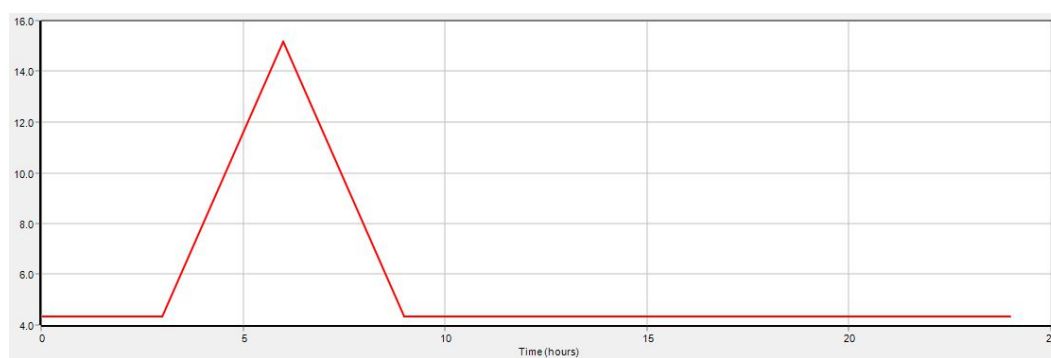
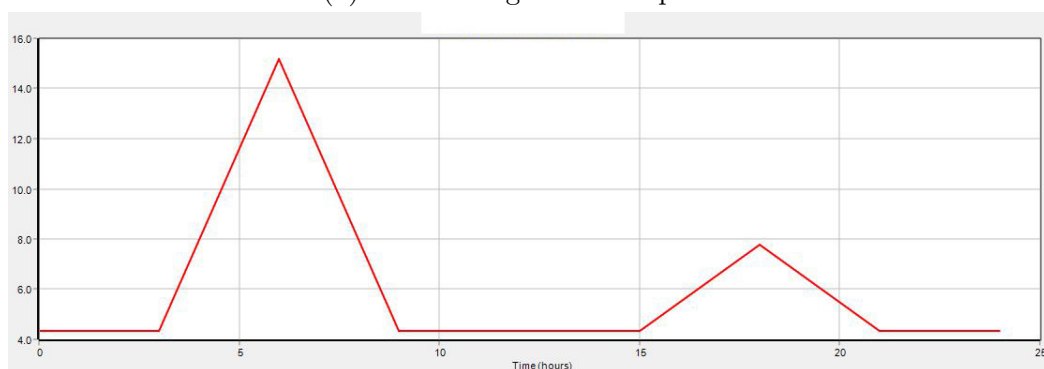


Figura 6.14: Programação das bombas - Terceiro Cenário com Rede de Anytown Modificada

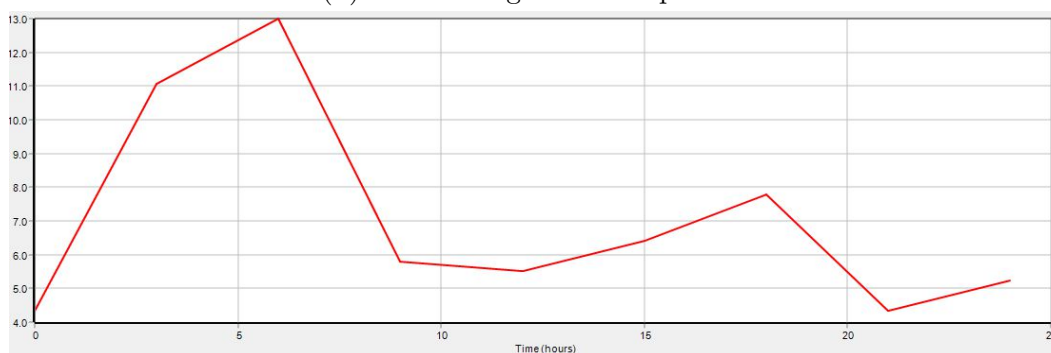
Assim como nos testes anteriores, a condição da heurística de manter o estoque final próximo ao estoque inicial será sempre atendida. A Figura 6.14 ilustra os níveis de água nos tanques ao longo do horizonte de planejamento, expressos em metros.



(a). Nível de água no Tanque 65



(b). Nível de água no Tanque 165



(c). Nível de água no Tanque 145

Figura 6.15: Nível de água nos tanques - Terceiro Cenário com Rede de Anytown Modificada

De acordo com o relatório gerado pelo EPANET, o custo total com energia elétrica foi de 3457.66 unidades monetárias. A Tabela 6.14 oferece uma comparação do resultado obtido pela heurística com o resultado obtido na simulação padrão do EPANET.

	Heurística HERA	Simulação do EPANET
Valor (u.m.)	3457,66	4156,13

Tabela 6.14: Comparação de resultados - Terceiro Cenário com Rede de Anytown Modificada

6.2.2 Cenários com tarifas brasileiras

6.2.2.1 Primeiro Cenário

Neste primeiro cenário de testes, foram utilizadas as demandas originais. Os resultados obtidos com a heurística HERA foram implementados no EPANET. Na simulação inicial foi gerado um problema com pressão negativa. No entanto, com o auxílio da heurística de correção de pressão, o problema foi facilmente resolvido com o acionamento da bomba 1 no período 20 (das 19h às 20h). Assim, foi obtida uma simulação bem sucedida. Na Figura 6.15 estão as operações das bombas de captação (1, 3 e 82, nesta ordem) ao decorrer do horizonte de planejamento.

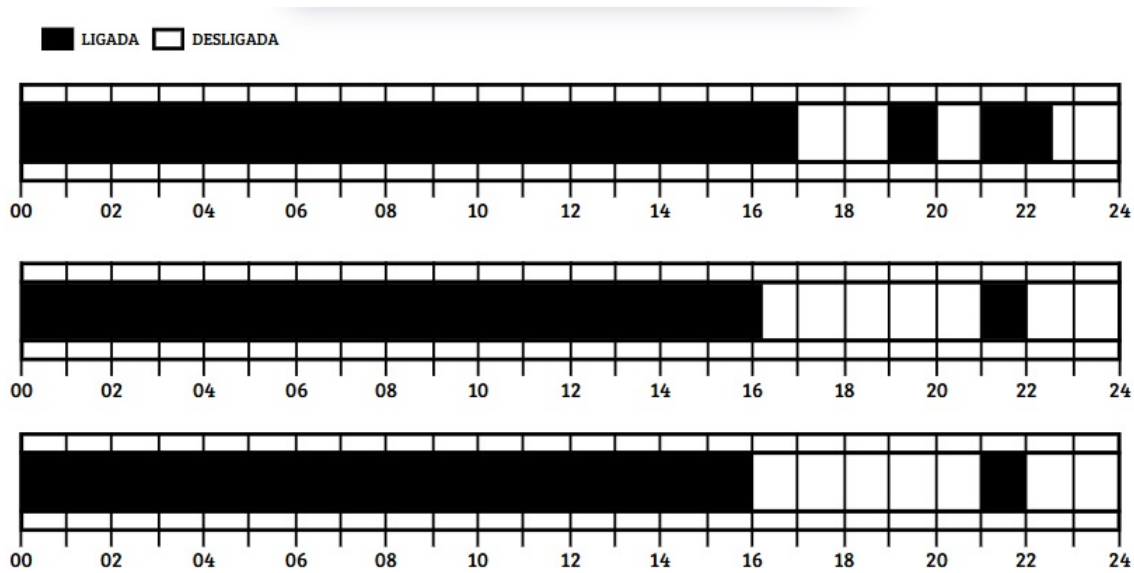
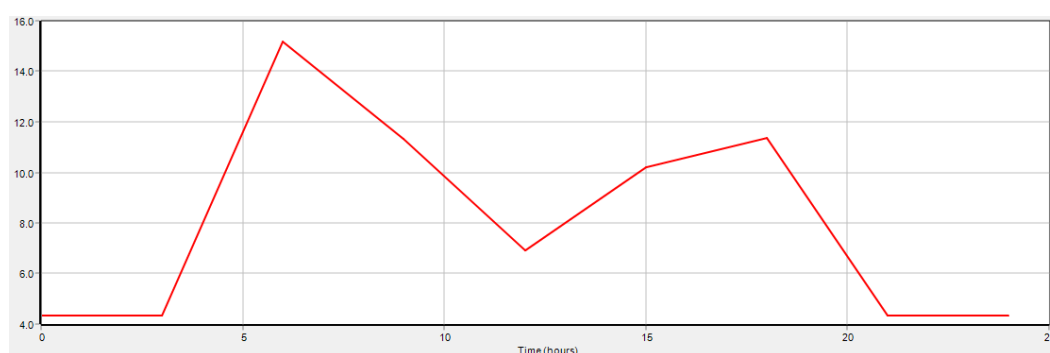


Figura 6.16: Programação das bombas - Primeiro Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras

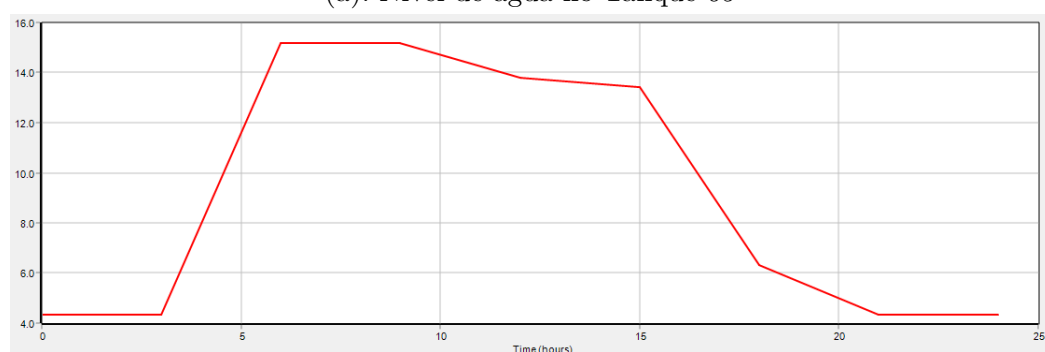
A Figura 6.16 ilustra os níveis de água nos tanques ao longo do horizonte de planejamento, expressos em metros. Podemos observar, mais uma vez, que os estoques

no último período do horizonte de planejamento sempre serão iguais ou maiores do que o estoque no início do horizonte de planejamento.

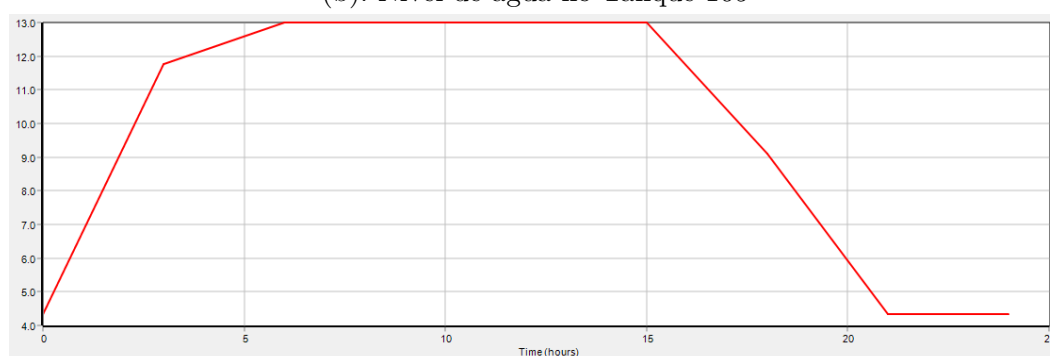
De acordo com o EPANET, o custo total com energia elétrica, obtido com a heurística, foi de 4473.89 reais. Ao comparar esse resultado com a simulação padrão do EPANET, percebe-se que a heurística HERA mostrou-se, mais uma vez, satisfatória. A Tabela 6.15 oferece uma comparação desses resultados.



(a). Nível de água no Tanque 65



(b). Nível de água no Tanque 165



(c). Nível de água no Tanque 145

Figura 6.17: Nível de água nos tanques - Primeiro Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras

	Heurística HERA	Simulação do EPANET
Valor (u.m.)	4473.89	5.903.45

Tabela 6.15: Comparação de resultados - Primeiro Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras

Na próxima seção, será abordada a análise do segundo cenário, onde haverá um incremento de 5% na demanda dos centros de consumo, assim como os testes anteriores.

6.2.2.2 Segundo Cenário

Neste segundo cenário de testes, a demanda dos nós foi aumentada em 5%. Os resultados obtidos com a heurística HERA foram implementados no EPANET. Na simulação inicial foi gerado um problema com pressão negativa. No entanto, com o auxílio do procedimento de correção de pressão, o problema foi facilmente resolvido e assim, obtida uma simulação bem sucedida. Na Figura 6.17 estão as soluções obtidas para a operação das bombas 1, 3 e 82, respectivamente.

Assim como ocorreu no primeiro teste, a condição da heurística de manter o estoque final próximo ao estoque inicial será sempre atendida, uma vez que o estoque inicial é equivalente ao estoque mínimo. A Figura 6.19 ilustra os níveis de água nos tanques ao longo do horizonte de planejamento, expressos em metros.

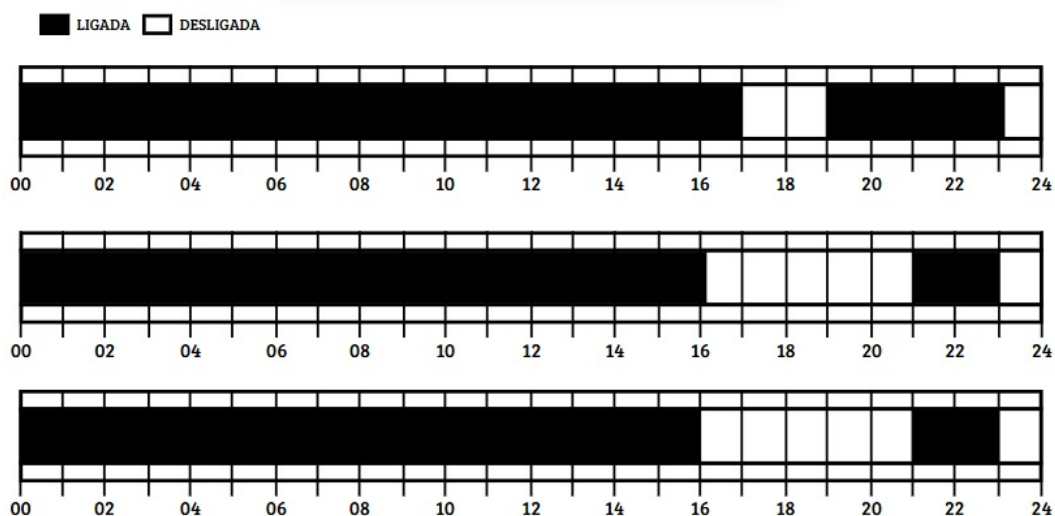
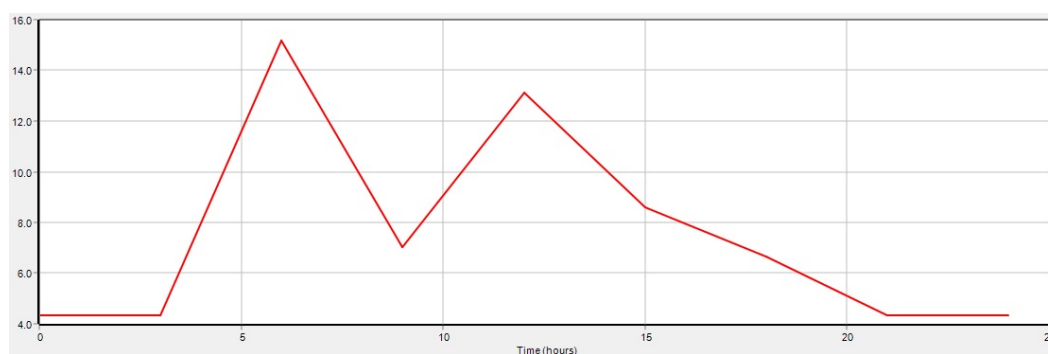
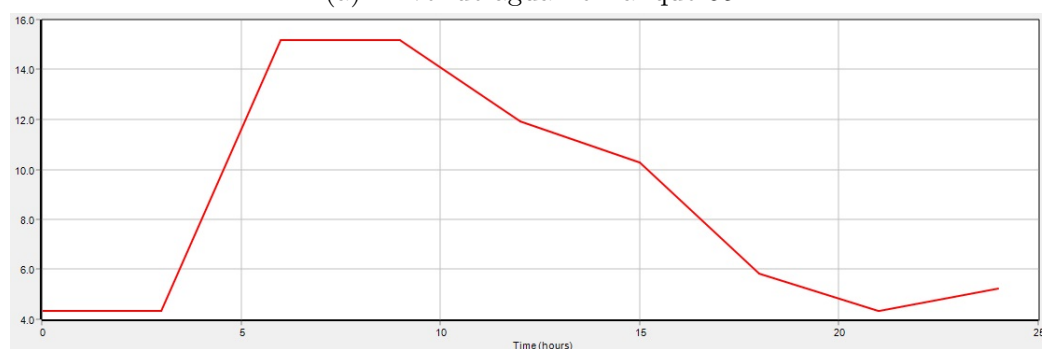


Figura 6.18: Programação das bombas - Segundo Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras

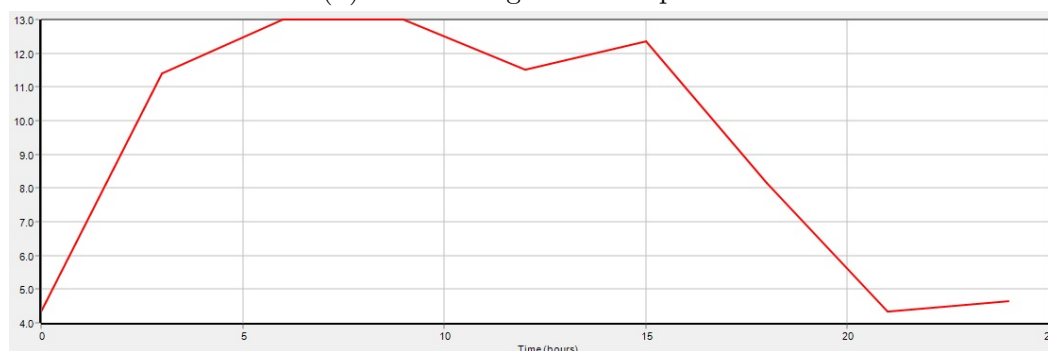
De acordo com o relatório gerado pelo EPANET, o custo total com energia elétrica foi de 4986.75 unidades monetárias. Ao comparar esse resultado com a solução obtida na simulação padrão do EPANET, percebe-se mais uma vez, a eficiência da heurística quanto à gestão dos recursos hídricos. A Tabela 6.16 oferece uma comparação desses resultados.



(a). Nível de água no Tanque 65



(b). Nível de água no Tanque 165



(c). Nível de água no Tanque 145

Figura 6.19: Nível de água nos tanques - Segundo Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras

	Heurística HERA	Simulação do EPANET
Valor (u.m.)	4986.75	6044.45

Tabela 6.16: Comparação de resultados - Segundo Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras

Na próxima seção, será abordada a análise do terceiro cenário, onde haverá um aumento de 10% na demanda dos centros de consumo.

6.2.2.3 Terceiro Cenário

Neste terceiro cenário, a demanda dos nós foi aumentada em 10%. Os resultados obtidos foram implementados no EPANET, utilizando controles simples. Assim como no primeiro e segundo cenário, foi necessário utilizar a heurística de correção de pressão. No entanto, o problema é facilmente corrigido e a simulação torna-se bem sucedida. Na Figura 6.19 estão as soluções obtidas para a operação das bombas 1, 3 e 82, em ordem.

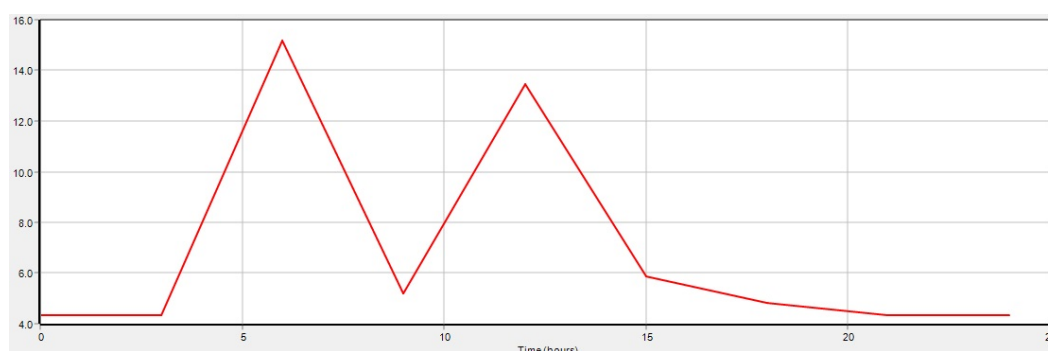


Figura 6.20: Programação das bombas - Terceiro Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras

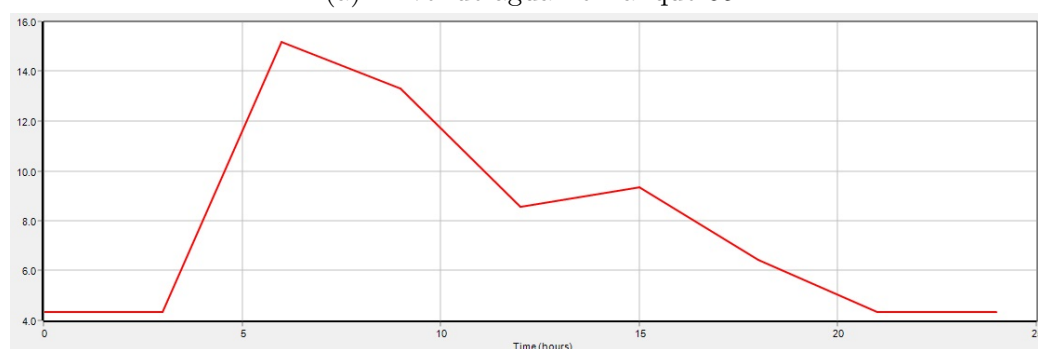
Assim como nos testes anteriores, a condição da heurística de manter o estoque final próximo ao estoque inicial será sempre atendida, uma vez que o estoque inicial é

equivalente ao estoque mínimo. A Figura 6.20 ilustra os níveis de água nos tanques ao longo do horizonte de planejamento, expressos em metros.

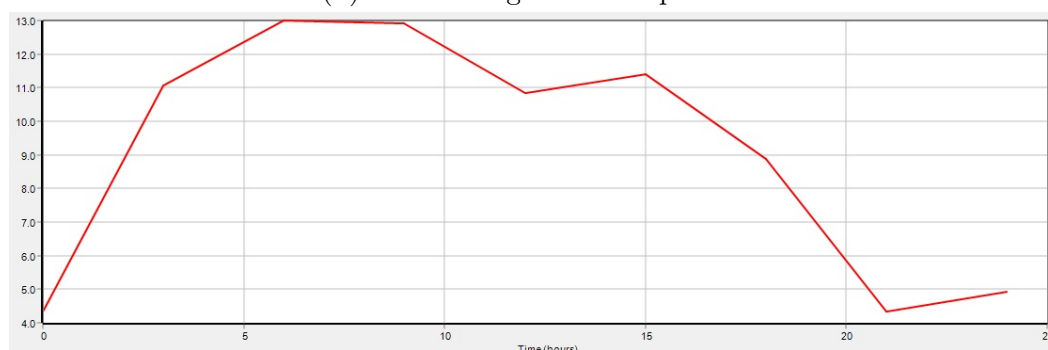
De acordo com o relatório gerado pelo EPANET, o custo total com energia elétrica foi de 4937.33 unidades monetárias. Ao comparar esse resultado com a simulação padrão do EPANET, percebe-se que a heurística HERA mostrou-se, mais uma vez, satisfatória. A Tabela 6.17 oferece uma comparação desses resultados.



(a). Nível de água no Tanque 65



(b). Nível de água no Tanque 165



(c). Nível de água no Tanque 145

Figura 6.21: Nível de água nos tanques - Terceiro Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras

	Heurística HERA	Simulação do EPANET
Valor (u.m.)	4937.33	6187.63

Tabela 6.17: Comparação de resultados - Terceiro Cenário com Rede de Anytown Modificada com tarifas brasileiras

E assim são finalizados os testes numéricos com a rede Anytown Modificada. Ao aplicar a heurística HERA, observou-se que ela foi capaz de lidar eficientemente com as variações de demanda e fornecimento, garantindo a continuidade do abastecimento e a manutenção dos níveis adequados nos reservatórios. Os resultados obtidos evidenciam que a heurística se adapta bem às condições propostas pela rede, para ambas as tarifas.

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar uma heurística para minimizar os gastos com energia elétrica em redes de abastecimento de água do tipo malhada, abordando de maneira eficiente o controle de operações e o atendimento da demanda dos reservatórios. Os resultados obtidos com a aplicação da heurística nas redes de Van Zyl et al. (2004) e AnyTown (1999) demonstraram a viabilidade da metodologia proposta, evidenciando seu potencial na otimização das operações hidráulicas e na minimização de custos.

A principal contribuição deste estudo foi a criação de uma abordagem sistemática para o liga e desliga das bombas, que pode ser aplicada a redes de diferentes configurações, e uma alternativa para a correção de problemas com pressões negativas. A heurística desenvolvida provou ser uma boa alternativa frente às técnicas tradicionais, mas que oferece simplicidade na aplicação e bons resultados.

Apesar dos resultados promissores, o trabalho apresenta algumas limitações. Entre elas, destacam-se a necessidade de mais testes em redes com características diferentes e a inclusão de fatores como falhas operacionais e perdas de água. Esses elementos podem afetar diretamente o desempenho da heurística e demandam uma análise mais aprofundada em estudos futuros.

Por fim, para trabalhos futuros propõe-se aprimorar a heurística desenvolvida considerando diversos outros fatores hidráulicos. Entre eles, a perda de água entre reservatórios e pressões dos nós e tubulações da rede. Também é possível aprimorar o método, integrando-o com outros.

Referências

ANEEL. Resolução Normativa ANEEL N° 1.000 (7 de dezembro de 2021). [S.l.]: , 2021. Acesso em: 25 de ago. de 2023.

BAGIROV, A. M. et al. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling. *Mathematical and Computer Modelling*, Elsevier, v. 57, n. 3-4, p. 873–886, 2013.

BARÁN, B.; LÜCKEN, C. V.; SOTELO, A. Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies. *Advances in Engineering Software*, Elsevier, v. 36, n. 1, p. 39–47, 2005.

BATISTA DO EGITO, Tuane; DE AZEVEDO, José Roberto Gonçalves; MARQUES BEZERRA, Saulo de Tarso. Optimization of the operation of water distribution systems with emphasis on the joint optimization of pumps and reservoirs. *Water Supply*, v. 23, n. 3, p. 1094-1105, 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Inserção de Energias Renováveis na América Latina: Discurso no Seminário Internacional de Energias Renováveis. Brasília, 2019. Disponível em: <https://antigo.mme.gov.br/documents/20182/1045954/20191126+Dircurso+Inser%C3%A7%C3%A3o+de+Energias+Renov%C3%A1veis+na+AL_vf.pdf>. Acesso em: 18 de out. de 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Água no mundo. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo>>. Acesso em: 18 de out. de 2023.

BONVIN, G. et al. A heuristic approach to the water networks pumping scheduling issue. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 75, p. 2846–2851, 2015.

CETESB. Saneamento no Brasil: Desafios e Perspectivas. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/11/1sabesp_saneamento_brasil_abes2011.pdf>. Acesso em: 21 de ago. de 2023.

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.

COSTA, Luis Henrique Magalhães et al. A branch-and-bound algorithm for optimal pump scheduling in water distribution networks. *Water resources management*, v. 30, p. 1037-1052, 2016.

CPFL Energia. Cartilha: Processo de Medição Amostral Permanente ANEEL. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/sites/cpfl/files/2022-01/Cartilha%20-%20Processo%20Medi%C3%A7%C3%A3o%20Amostral%20Permanente%20ANEEL.pdf>>. Acesso em: 21 de ago. de 2023.

CPFL Paulista. Tarifas CPFL Paulista. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/empresas/tarifas-cpfl-paulista>>. Acesso em: 14 de out. de 2024.

EBC - Empresa Brasil de Comunicação. Onde está a água no Brasil? Portal EBC. Disponível em: <<https://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil>>. Acesso em: 21 de ago. de 2023.

ECYCLE. Água e Saneamento. Dessalinização da água: do mar ao copo. 2021. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/dessalinizacao/>>. Acesso em: 21 de ago. de 2023.

ETES Sustentáveis. História do saneamento no Brasil. Disponível em: <<https://etes-sustentaveis.org/historia-saneamento-brasil/>>, Acesso em: 21 de ago. de 2023.

EVANS, H. B. Water distribution in ancient rome: The evidence of frontinus. University of Michigan Press, 1997.

International Energy Agency (IEA). (2021). Time-of-Use Pricing and Demand Response. Disponível em: <<https://www.iea.org>> Acesso em: 21 de ago. de 2023

JUNG, Y.; YANG, Y.; KIM, H.; KIM, J. H.; KIM, T. Minimizing Pumping Energy Cost in Real-time Operations of Water Distribution Systems using Economic Model Predictive Control. *Water Research*, v. 180, 115915, 2020.

JÚNIOR, O. F. L. Avaliação das perdas no sistema de abastecimento de água de palmas - to. Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA), 2018.

KUREK, W.; OSTFELD, A. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems. *Journal of environmental management*, Elsevier, v. 115, p. 189–197, 2013.

Lloyd, J. D., Butryn, R., Pearman-Gillman, S., & Allison, T. D. (2023). Seasonal patterns of bird and bat collision fatalities at wind turbines. *PLOS ONE*, 18(5), e0284778. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284778>>. Acesso em: 21 de ago. de 2023

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M. Instances of Optimization and Programming Problems. Disponível em https://lopez-ibanez.eu/ps_instances>. Acesso em: 21 de ago. de 2023.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, Manuel; PRASAD, T. Devi; PAECHTER, Ben. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. *Journal of water resources planning and management*, v. 134, n. 4, p. 337-346, 2008.

MALISSARD, A. La cultura del agua en la roma antigua. Los romanos y el agua. Barcelona, 1996.

MARINI, Gustavo et al. A Novel Approach to Avoiding Technically Unfeasible Solutions in the Pump Scheduling Problem. *Water*, v. 15, n. 2, p. 286, 2023.

MATEUS, Fernando Oliveira et al. Dinamizando a economia local com o acesso à energia elétrica: os Centros Comunitários de Produção como alternativa para potencializar os resultados do Programa Luz para Todos. 2016.

NETTO, J. M. d. A.; MARTINIANO, J. Manual de hidráulica. 8ª edição. Ed. Edgard Blucher, 1998.

NOBRE, B. M. S. et al. Construção de redes de abastecimento de água. Universidade Regional do Cariri - urca, 2012.

Organização Mundial da Saúde (OMS). Água e saúde: a importância da hidratação. Disponível em: <<https://www.who.int/pt/news-room/fact-sheets/detail/water-sanitation-and-hygiene>>. Acesso em: 21 de ago. de 2023.

PEREZ, Nestor Proenza. SFM 2014 - Aula 5. Universidade Estadual Paulista (UNESP). Disponível em: <<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/nestorproenzaperez/sfm-2014-aula-5.pdf>>. Acesso em: 21 de ago. de 2023.

Polya, G. (1945). *How to Solve It: A New Aspect of Mathematical Method*. Princeton University Press.

PRANA. Quais são os Impactos Ambientais da Energia Solar?. 2023. Disponível em: <<https://blog.prana.tec.br/quais-sao-os-impactos-ambientais-da-energia-solar/>>.

RUCKERT, F. Q. O abastecimento de água no brasil: uma prospecção bibliográfica no âmbito da historiografia. *Saeculum–Revista de História*, v. 25, n. 43, p. 280–295, 2020.

Santos, M. O., Soler, E. M., Furlan, M. M., & Vieira, J. C. (2022). A mixed integer programming model and solution method for the operation of an integrated water supply system. *International Transactions in Operational Research*, 29(2), 929-958.

SHU, M. et al. Efficient energy consumption system using heuristic renewable demand energy optimization in smart city. *Computational Intelligence*, Wiley Online Library, v. 38, n. 3, p. 784–800, 2022.

SOLER, E. M. et al. Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água. *Production*, SciELO Brasil, v. 26, p. 385–401, 2016.

SOUSA, Anselmo Claudino de; SOARES, Alexandre Kepler. Modelo para otimização hidroenergética da operação de bombeamento em sistemas de distribuição de água. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 26, n. 3, p. 429-440, 2021.

TOLEDO, F. et al. Logística de distribuição de água em redes urbanas: racionalização energética. *Pesquisa Operacional*, SciELO Brasil, v. 28, p. 75–91, 2008.

TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de Água*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

U.S. Department of Energy. (2020). *Electricity Pricing and Demand Management*.

WALSKI, T. M. et al. Battle of the Network Models: Epilogue. *Journal of the American Water Works Association*, v. 79, n. 10, p. 82–89, 1987.

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.

Zhang, X., Kumar, P., e Chauhan, S. (2023). Hydraulic modeling approach for evaluating the performance of water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 72(1), 1–15. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/aqua.2022.099>>. Acesso em: 21 de ago. de 2023

ZHANG, Y.; LI, X.; LI, Y.; ZHU, M.; LI, Z. Optimization of Water Distribution Systems Using Economic Model Predictive Control. *Journal of Hydrology*, v. 531, p. 460–471, 2015.

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.

Rede de Van Zyl et al. (2004)

[TITLE]

VanZyl Test Instance

Originally published in:

Van Zyl, J.E., Savic, D.A., Walters, G.A. (2004). Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm., Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 130 (3), 160-170.

[JUNCTIONS];

ID	Elev	Demand	Pattern
n1	10	0	—
n10	100	0	—
n12	100	0	—
n11	10	0	—
n13	10	0	—
n2	10	0	—
n3	75	0	—
n361	100	0	—
n362	100	0	—
n364	100	0	—
n365	100	0	—
n5	30	50	pattern24
n6	30	50	pattern24

[RESERVOIRS]

ID	Head	Pattern
r1	20	

[TANKS]

ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol	VolCurve	Overflow
t6	85	9.5	0	10	20	0		
t5	80	4.5	0	5	25	0		

[PIPES]

ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
p1	r1	n1	1	1000	100	0	Open
p10	n1	n10	1	1000	100	0	Open
p12	n1	n12	1	1000	100	0	Open
p11	n11	n2	1	1000	100	0	Open
p13	n13	n2	1	1000	100	0	Open
p2	n2	n3	2600	450	100	0	Open
p18	n3	n361	1	1000	100	0	Open
p361	n361	n362	1	1000	100	0	Open
p364	n364	n365	1	1000	100	0	Open
p4	n365	t6	2000	350	100	0	Open
p6	t6	n6	1100	300	100	0	Open
p5	t5	n5	500	300	100	0	Open
p3	n3	t5	1000	350	100	0	Open
p7	n6	n5	1	200	100	0	Open
p19	n361	n365	1	1000	100	0	CV

[PUMPS]

ID	Node1	Node2	Parameters
pmp1	n10	n11	HEAD 1
pmp2	n12	n13	HEAD 1
pmp6	n362	n364	HEAD 6

[VALVES]

ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

[TAGS]

[DEMANDS]

Junction	Demand	Pattern	Category
----------	--------	---------	----------

[STATUS]

ID	Status/Setting
----	----------------

[PATTERNS]

ID	Multipliers						
pattern24	0.62	0.62	0.67	0.76	0.91	1.1	
pattern24	1.48	1.71	1.48	1.02	0.73	0.55	
pattern24	0.49	0.55	0.73	1.02	1.36	1.53	

pattern24	1.53	1.36	1.1	0.91	0.76	0.67
pumptariff	0.0244	0.0244	0.0244	0.0244	0.0244	0.0244
pumptariff	0.0244	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194
pumptariff	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194
pumptariff	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194	0.1194
pump1	1	0	1	1	0	0
pump1	1	1	1	1	0	1
pump1	0	1	0	0	0	0
pump1	1	1	1	1	0	1
pump2	1	1	1	1	1	1
pump2	1	1	0	0	1	0
pump2	1	1	1	1	0	1
pump2	1	0	0	1	0	0
pump3	0	0	0	1	0	1
pump3	1	1	0	1	1	0
pump3	1	1	1	0	1	1
pump3	0	1	0	0	1	1

[CURVES]

ID X-Value Y-Value

PUMP: PUMP:

1 0 100

1 120 90

1 150 83

PUMP: PUMP:

6 0 120

6 90 75

6 150 0

PUMP: EFFICIENCY:

leff 50 78

leff 107 80

leff 151 68

leff 200 60

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency 85

Global Price 0

Demand Charge 0

Pump	pmp1	Efficiency	leff
Pump	pmp1	Price	1
Pump	pmp1	Pattern	pumptariff
Pump	pmp2	Efficiency	leff
Pump	pmp2	Price	1
Pump	pmp2	Pattern	pumptariff
Pump	pmp6	Price	1
Pump	pmp6	Pattern	pumptariff

[EMITTERS]

Junction	Coefficient
----------	-------------

[QUALITY]

Node	InitQual
------	----------

[SOURCES]

Node	Type	Quality	Pattern
------	------	---------	---------

[REACTIONS]

Type	Pipe/Tank	Coefficient
------	-----------	-------------

[REACTIONS]

Order Bulk	1
Order Tank	1
Order Wall	1
Global Bulk	0
Global Wall	0
Limiting Potential	0
Roughness Correlation	0

[MIXING]

Tank	Model
------	-------

[TIMES]

Duration 24:00

Hydraulic Timestep 1:00

Quality Timestep 0:05

Pattern Timestep 1:00

Pattern Start 0:00

Report Timestep 1:00

Report Start 0:00

Start ClockTime 0 am

Statistic NONE

[REPORT]

Status No

Summary No

Page 0

[OPTIONS]

Units LPS

Headloss H-W

Specific Gravity 1

Viscosity 1

Trials 70

Accuracy 0.00001

CHECKFREQ 2

MAXCHECK 10

DAMPLIMIT 0

Unbalanced Continue 10

Pattern 1

Demand Multiplier 1.0

Emitter Exponent 0.5

Quality None mg/L

Diffusivity 1

Tolerance 0.01

[COORDINATES]

Node	X-Coord	Y-Coord
n1	2100.000	3900.000
n10	2300.000	3700.000
n12	2300.000	4100.000
n11	2700.000	3700.000
n13	2700.000	4100.000
n2	2900.000	3900.000
n3	3800.000	4800.000
n361	3800.000	5300.000
n362	3500.000	5300.000
n364	3500.000	5800.000
n365	3800.000	5800.000
n5	4500.000	6000.000
n6	4500.000	6500.000
r1	1800.000	3900.000
t6	3800.000	6500.000
t5	4500.000	4800.000

[VERTICES]

Link	X-Coord	Y-Coord		
------	---------	---------	--	--

[LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor	Node
2344.110	3553.230	"Pump1A"	n10
2344.090	4408.220	"Pump2B"	n12
2846.640	5543.660	"Pump3B"	n362
4270.520	4707.550	"TankA"	t5
3283.050	6490.980	"TankB"	t6

[BACKDROP]

DIMENSIONS	1665.000	3300.000	4635.000	6640.000
------------	----------	----------	----------	----------

UNITS None

FILE

OFFSET	0.00	0.00
--------	------	------

[END]

Rede Anytown adaptada por Walters et al. (1999)

[TITLE]

Anytown network model

[JUNCTIONS]

ID	Elev	Demand	Pattern
20	20	500	
30	50	200	
40	50	200	
50	50	200	
55	80	0	
60	50	500	
70	50	500	
75	80	0	
80	50	500	
90	50	1000	
100	50	500	
110	50	500	
115	80	0	
120	120	200	
130	120	200	
140	80	200	
150	120	200	

160 120 800

170 120 200

[RESERVOIRS]

ID Head Pattern

10 10

[TANKS]

ID Elevation InitLevel MinLevel MaxLevel Diameter MinVol VolCurve Overflow

65 215 10 10 35 32.6 0

165 215 10 10 35 32.6 0

145 210 10 10 30 87.6 0

[PIPES]

ID Node1 Node2 Length Diameter Roughness MinorLoss Status

2 20 70 12000 16 70 0 OPEN

4 20 30 12000 12 120 0 OPEN

6 20 110 12000 24 70 0 OPEN

8 70 30 9000 12 70 0 OPEN

10 70 100 600 12 70 0 OPEN

12 70 90 600 10 70 0 OPEN

14 70 60 600 12 70 0 OPEN

16 90 60 600 10 70 0 OPEN

18 60 80 600 12 70 0 OPEN

20 90 80 600 10 70 0 OPEN

22 90 150 600 10 70 0 OPEN

24 90 100 600 10 70 0 OPEN

26 100 150 600 12 70 0 OPEN

28 150 80 600 10 70 0 OPEN

30 60 30 600 10 120 0 OPEN

32 30 40 600 10 120 0 OPEN

34 30 50 600 10 120 0 OPEN

36 40 50 600 10 120 0 OPEN

38 50 80 600 10 120 0 OPEN

40 80 140 600 14 120 0 OPEN

42 150 140 600 8 120 0 OPEN

44 150 160 600 12 120 0 OPEN

46 100 160 600 8 120 0 OPEN

48 100 110 600 8 70 0 OPEN

50 110 160 600 24 120 0 OPEN

52 110 120 600 10 120 0 OPEN

54	120	160	600	12	130	0	OPEN
56	120	130	600	8	120	0	OPEN
58	130	160	600	12	120	0	OPEN
60	130	170	600	12	120	0	OPEN
62	160	140	600	20	120	0	OPEN
64	170	140	12000	8	120	0	OPEN
66	50	140	12000	8	120	0	OPEN
68	140	115	6000	12	130	0	OPEN
70	140	75	6000	12	130	0	OPEN
72	115	75	6000	6	130	0	OPEN
74	50	55	6000	10	130	0	OPEN
76	55	75	6000	10	130	0	OPEN
80	160	165	100	8	120	0	Open
78	60	65	100	20	120	0	Open
85	140	145	100	20	130	0	Open

[PUMPS]

ID	Node1	Node2	Parameters
----	-------	-------	------------

82	10	20	HEAD 1
----	----	----	--------

1	10	20	HEAD 1
---	----	----	--------

3	10	20	HEAD 1
---	----	----	--------

[VALVES]

ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

[TAGS]

[DEMANDS]

Junction	Demand	Pattern	Category
----------	--------	---------	----------

[STATUS]

ID	Status/Setting
----	----------------

[PATTERNS]

ID	Multipliers
----	-------------

Demand Pattern

1	0.7	0.6	1.2	1.3	1.2	1.1
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

1	1	0.9
---	---	-----

kWh Price

kWhPrice	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

kWhPrice	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

kWhPrice	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

kWhPrice	0.8	0.8	0.8	0.2	0.2	0.2
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

[CURVES]

```

ID      X-Value  Y-Value
PUMP:    PUMP:    Pump Curve for Pump 9
1        0        300
1        2000     292
1        4000     270
1        6000     230
1        8000     181
EFFICIENCY: ID Flow efficiency
E1       0        0
E1       2000     50
E1       4000     65
E1       6000     55
E1       8000     40
[CONTROLS]
[RULES]
[ENERGY]
Global Efficiency 65
Global Price 0.0
Demand Charge 0.0
Pump 82    Efficiency E1
Pump 82    Price 1
Pump 82    Pattern kWhPrice
Pump 1     Efficiency E1
Pump 1     Price 1
Pump 1     Pattern kWhPrice
Pump 3     Efficiency E1
Pump 3     Price 1
Pump 3     Pattern kWhPrice
[EMITTERS]
Junction   Coefficient
[QUALITY]
Node       InitQual
[SOURCES]
Node       Type      Quality    Pattern
[REACTIONS]
Type       Pipe/Tank  Coefficient
[REACTIONS]
Order Bulk    1

```

Order Tank 1
Order Wall 1
Global Bulk 0
Global Wall 0
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0
[MIXING]
Tank Model
[TIMES]
Duration 24:00
Hydraulic Timestep 3:00
Quality Timestep 0:05
Pattern Timestep 3:00
Pattern Start 0:00
Report Timestep 3:00
Report Start 0:00
Start ClockTime 12 am
Statistic NONE
[REPORT]
Status No
Summary No
Page 0
[OPTIONS]
Units GPM
Headloss H-W
Specific Gravity 1.0
Viscosity 1.0
Trials 80
Accuracy 0.001
CHECKFREQ 2
MAXCHECK 10
DAMPLIMIT 0
Unbalanced Continue 10
Pattern 1
Demand Multiplier 1.0
Emitter Exponent 0.5
Quality Chlorine mg/L
Diffusivity 1.0

Tolerance 0.01

[COORDINATES]

Node	X-Coord	Y-Coord
20	6391.600	4257.810
30	6723.630	6181.640
40	5327.150	7500.000
50	3959.960	7050.780
55	3081.050	7431.640
60	5366.210	6044.920
70	5473.630	4931.640
75	2270.510	7089.840
80	4340.820	6230.470
90	4838.870	5410.160
100	4428.710	4765.630
110	4125.980	3945.310
115	1655.270	6787.110
120	3413.090	3281.250
130	2055.660	3896.480
140	2077.586	6172.414
150	3891.600	5566.410
160	2895.510	4765.630
170	825.200	5126.950
10	7241.210	3750.000
65	4991.379	6422.414
165	2129.310	4974.138
145	1318.966	6284.483

[VERTICES]

Link	X-Coord	Y-Coord
62	2133.790	6064.450
1	6464.646	3714.927
3	7003.367	4354.658

[LABELS]

X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
---------	---------	---------------------

[BACKDROP]

DIMENSIONS	0.000	0.000	10000.000	10000.000
------------	-------	-------	-----------	-----------

UNITS	None
-------	------

FILE

OFFSET	0.00	0.00
--------	------	------

[END]