

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

MARIA CECÍLIA GONTIJO RAMOS

**OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE UM SETOR DE ABASTECIMENTO DE
ÁGUA POR MEIO DA ALTERAÇÃO DOS VOLUMES DOS
RESERVATÓRIOS DE ÁGUA TRATADA**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2022

MARIA CECÍLIA GONTIJO RAMOS

**OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE UM SETOR DE ABASTECIMENTO DE
ÁGUA POR MEIO DA ALTERAÇÃO DOS VOLUMES DOS
RESERVATÓRIOS DE ÁGUA TRATADA**

Dissertação apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Tit. Woodrow Nelson Lopes Roma

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R175o Ramos, Maria Cecília Gontijo
Otimização operacional de um setor de abastecimento de água por meio da alteração dos volumes dos reservatórios de água tratada / Maria Cecília Gontijo Ramos; orientador Woodrow Nelson Lopes Roma. São Carlos, 2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. otimização combinatória. 2. otimização multiobjetivo. 3. reservatórios de distribuição. 4. redes de abastecimento de água. 5. custo de energia. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **MARIA CECÍLIA GONTIJO RAMOS**.

Título da dissertação: "Otimização operacional de um setor de abastecimento de água por meio da alteração dos volumes dos reservatórios de água tratada".

Data da defesa: 08/06/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Titular **Woodrow Nelson Lopes Ramos**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADA

Prof. Dr. **Erich Kellner**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Profa. Dra. **Cali Laguna Achon**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, por desde tenra idade serem os meus maiores incentivadores para que eu sempre buscasse me aprimorar por meio dos estudos. Obrigada pelo apoio e afeto incondicionais.

Aos professores, Dr. Woodrow Nelson Lopes Roma e Dr. Erich Kellner, por toda a paciência e compreensão ao longo desse processo. Para mim, representam a essência da docência. Sem eles, esse trabalho não seria possível.

Gratidão à Universidade de São Paulo, em especial a Escola de Engenharia de São Carlos, representada pelos amigos e docentes que conheci, por ter me acolhido desde a graduação até a culminação desse trabalho e ter me oferecido oportunidades e conhecimentos essenciais para a minha vida profissional e pessoal.

Agradeço à CAPES, pela concessão da bolsa de estudos para a realização dessa pesquisa.

Ao SAAE São Carlos, por ter aberto as portas desde o princípio, tendo fornecido os dados disponíveis prontamente, viabilizando a realização desse trabalho.

À Allevant Engenharia, onde eu me apaixonei pela modelagem hidráulica e pelo saneamento, conheci profissionais que me inspiram e cultivei amizades preciosas.

À minha família, por sempre ter acreditado em mim.

Por fim, sou muito grata a Deus, por ter colocado todas as pessoas citadas na minha vida e por ter me concedido a capacidade de superar os desafios impostos nessa trajetória terrena.

RESUMO

RAMOS, M. C. G. Otimização operacional de um setor de abastecimento de água por meio da alteração dos volumes dos reservatórios de água tratada. 2022. 103p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Em 2018, 89% do consumo energético dos prestadores de serviço de saneamento no Brasil foram destinados ao abastecimento de água, que representou 14,5% do total das despesas (SNIS, 2018). Na operadora de água do município do São Carlos - SP, esse percentual foi de 21,5%. Uma maneira de reduzir o custo de energia em um sistema de abastecimento de água é através de alteração operacional dos sistemas bombeamento-reservação, podendo-se ampliar o volume de armazenamento para deslocar o consumo de energia em que são cobradas as maiores tarifas para os horários em que as tarifas são mais baratas. Por outro lado, os reservatórios representam uma parcela bastante pequena do total de custos para manutenção e operação da rede. No entanto, seu impacto no desempenho geral da rede é significativo, desproporcional aos seus custos. Nessa pesquisa, foi desenvolvido um modelo de otimização que visa minimizar o custo energético, a partir da alteração das capacidades dos reservatórios de distribuição de água. Dessa forma, foi proposto um modelo computacional - MOC (Modelo de Otimização Combinatória), empregando algoritmo Guloso (ou de Prim) e um simulador hidráulico e de qualidade da água fundamentado no EPANET 2.2, que foi aplicado ao modelo hidráulico de um setor de abastecimento de São Carlos-SP. Dado que o sistema de abastecimento estudado possui 3 subsistemas e estes podem operar de forma independente ou interligada, foram realizadas análises para esses dois cenários. Mesmo no cenário que resultou em menor compensação financeira, estima-se que a economia de energia compensaria o custo a mais na implantação dos reservatórios dentro de 4 a 5 anos. No melhor cenário, essa compensação ocorreria em um ano.

Palavras-chave: otimização combinatória, otimização multiobjetivo, reservatórios de distribuição, redes de abastecimento de água, custo de energia.

ABSTRACT

RAMOS, M. C. G. Operational optimization of a water distribution network by changing service water reservoirs' capacities. 2022. 103p. Thesis (MSc in Hydraulics Engineering and Sanitation) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

In 2018, 89% of the energy consumption of sanitation service providers in Brazil was destined for water supply, which represented 14.5% of total expenses (SNIS, 2018). At the water operator in São Carlos - SP, this percentage was 21.5%. One way to reduce energy costs in a water supply network is through operational changes in the pumping-reservoir systems, with the possibility of expanding the storage volume to shift the energy consumption from peak electricity tariffs periods to off-peak electricity tariffs periods. On the other hand, water tanks represent a very small portion of the total costs of network maintenance and operation. However, its impact on overall network performance is significant, out of proportion to its costs. In this research, an optimization model was developed that aims to minimize energy costs, by changing service reservoirs' storage capacities. Therefore, a computational model was proposed, named MCO (Model of Combinatorial Optimization), employing greedy (or Prim's) algorithm and a hydraulic and water quality simulator based on EPANET 2.2. The optimization model was then applied to the hydraulic model of a supply sector in São Carlos-SP. Since there were 3 subsystems in the water supply sector studied and they can operate independently or connected, analyzes were carried out for these two scenarios. Even in the scenario that resulted in lower financial compensation, it is estimated that the energy savings would offset the extra cost of implementing the reservoirs within 4 to 5 years. In the best-case scenario, this compensation would occur in one year.

Keywords: combinatorial optimization, multi-objective optimization, service reservoirs, water tanks, water distribution networks, energy costs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura tarifária brasileira para as unidades consumidoras classificadas no grupo A.....	29
Figura 2 - Modalidades tarifárias disponíveis para cada tipo de consumidor. ...	30
Figura 3 - Interface desenvolvida para a execução do EPANET 2.2 a partir das combinações estabelecidas para os volumes dos reservatórios de nível variável do sistema de abastecimento de água.....	44
Figura 4 - Fluxograma dos procedimentos executados pelo MOC – Modelo de Otimização Combinatória.	45
Figura 5 - Fluxograma dos procedimentos executados pelo algoritmo de Prim	48
Figura 6 - Soluções factíveis, o espaço objetivo factível e o grau de dominância em um problema de minimização com dois objetivos.	51
Figura 7 - Padrão de consumo adotado.	55
Figura 8 - Padrão de perdas adotado.....	55
Figura 9 - Padrão de demanda do RAP Cidade Aracy 2.	56
Figura 10 - Padrão de demanda do REL Cidade Aracy.	56
Figura 11 - Padrão de tarifa de energia elétrica.	57
Figura 12 - Localização dos setores de abastecimento simulados.	58
Figura 13 - Esquema de abastecimento dos setores Cidade Aracy, Antenor Garcia e Abdelnur.	59
Figura 14 - Elevações topográficas dos nós da rede de distribuição.	61
Figura 15 - Esquema do abastecimento da região de estudo indicando as vazões médias macromedidas.	64
Figura 16 - Metodologia de distribuição de demandas no software WaterGEMS®.	67
Figura 17 - Áreas de distribuição das demandas no modelo hidráulico.	68
Figura 18 - Curva característica da bomba do Poço Abdelnur.	69
Figura 19 - Curva característica da bomba de contingenciamento do Reservatório Abdelnur para o RAP Antenor Garcia.	69
Figura 20 - Curva característica da bomba do Poço Antenor Garcia.	69
Figura 21 - Curva característica da bomba de alimentação do REL Antenor Garcia.....	70
Figura 22 - Curva característica da bomba do Poço Cidade Aracy.....	70

Figura 23 - Curva característica da bomba de alimentação do REL Cidade Aracy.	70
Figura 24 - Fluxograma das simulações e análises realizadas.	74
Figura 25 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Abdelnur entre a solução implantada e a solução otimizada para o cenário de sistemas isolados.	75
Figura 26 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Apoiado Antenor Garcia entre a solução implantada e a solução otimizada para o cenário de sistemas isolados.	76
Figura 27 - Frente de Pareto da otimização multiobjetivo com os sistemas operando isoladamente.	76
Figura 28 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Abdelnur entre a solução implantada e a solução otimizada de objetivo único para o cenário de sistemas interligados.	78
Figura 29 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Elevado Cidade Aracy entre a solução implantada e a solução otimizada de objetivo único para o cenário de sistemas interligados.	78
Figura 30 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Apoiado Cidade Aracy (2) entre a solução implantada e a solução otimizada de objetivo único para o cenário de sistemas interligados.	79
Figura 31 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Abdelnur entre a solução implantada e a solução otimizada multiobjetivo para o cenário de sistemas interligados.	80
Figura 32 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Elevado Cidade Aracy entre a solução implantada e a solução otimizada multiobjetivo para o cenário de sistemas interligados.	80
Figura 33 - Frente de Pareto da otimização multiobjetivo com os sistemas operando de forma interligada.	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios típicos para projetos de reservatórios para áreas residenciais com baixa densidade populacional	25
Quadro 2 - Métodos de otimização aplicados a projeto de reservatórios em sistemas de distribuição de água.	39
Quadro 3 - Resumo das características dos reservatórios.....	60
Quadro 4 - Relação dos dados de macromedição fornecidos pelo SAAE São Carlos.....	61
Quadro 5 - Controles Operacionais no cenário em que os sistemas operam isoladamente.....	71
Quadro 6 - Controles Operacionais adicionados no cenário em que os sistemas operam com contingenciamento.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites inferiores e superiores para identificação de outliers nos dados de macromedição.....	62
Tabela 2 – Demanda média medida nos pontos de macromedição.....	63
Tabela 3 – Consumos médios mensais e índice K1 para cada bairro em 2020.	65
Tabela 4 – Consumo diário por zona de pressão considerando índice k1	65
Tabela 5 – Demandas diárias dos setores de abastecimento em estudo	66
Tabela 6 – Resumo dos volumes calculados pelo modelo de otimização nos diferentes cenários.	83
Tabela 7 – Resumo dos aumentos relativos de volumes calculados pelo modelo de otimização nos diferentes cenários.	83
Tabela 8 - Comparação do custo de energia e do custo de implantação dos reservatórios para os cenários simulados com a solução implantada.....	84
Tabela 9 – Resultados do retorno do superávit do investimento na implantação dos reservatórios em relação à solução implantada	85
Tabela 10 – Comparação de custos entre as soluções PF-MOEA e FMO.....	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Sistemas de Abastecimento de Água.....	21
3.2	Reservatórios de distribuição	21
3.2.1	Tipo de reservatório.....	22
3.2.2	Localização.....	22
3.2.3	Elevação e níveis operacionais	23
3.2.4	Volume	23
3.3	Estação elevatória.....	27
3.3.1	Tarifa	28
3.3.2	Alternativas para redução do custo de energia elétrica	30
3.3.3	Alternativas operacionais de sistemas bombeamento-reservação.....	32
3.4	Simulação hidráulica	33
3.4.1	Calibração.....	33
3.5	Indicadores operacionais	35
3.6	Otimização operacional.....	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1	Modelo computacional proposto.....	43
4.1.1	Algoritmo Guloso (ou Algoritmo de Prim).....	47
4.1.2	Simulação Hidráulica e de Qualidade da Água.....	49
4.1.3	Função Multiobjetivo e Funções Objetivos	51
4.2	Formulação do Problema	52
4.2.1	Composição do Custo de Implantação dos Reservatórios de Nível Variável (RNV).....	53
4.2.2	Variação do consumo de água	54
4.2.3	Composição do Custo de Energia Elétrica Consumida	57
4.3	Modelo hidráulico da rede de distribuição de água	57
4.3.1	Características físicas.....	57
4.3.2	Análise de dados e definição das demandas.....	61
4.3.3	Curvas características das bombas.....	68

4.3.4	Controles operacionais	71
4.4	Análise comparativa dos resultados.....	72
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
5.1	Otimização considerando os sistemas isolados	74
5.2	Otimização para minimização dos custos de energia considerando os sistemas interligados.....	77
5.3	Otimização para minimização dos custos de energia e de implantação considerando os sistemas interligados	79
5.4	Discussões	82
6	CONCLUSÕES.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE A – Listagem do Modelo de Otimização Combinatória (MOC).....	93
	APÊNDICE B – Gráficos dos dados de macromedição com a identificação dos limites superiores e inferiores para determinação de outliers.....	94

1 INTRODUÇÃO

Em sistemas de abastecimento de água, a energia elétrica é necessária em todos os processos, desde a captação de água bruta, passando pelo tratamento até a distribuição de água tratada. Segundo o (SNIS, 2018), os prestadores de serviço de saneamento no Brasil consumiram 12,9 TWh, sendo 11,5 TWh apenas com abastecimento de água. Este consumo representou uma despesa de R\$ 6,19 bilhões, sendo que as despesas com eletricidade corresponderam a 14,5% do total das despesas (SNIS, 2018). Na operadora de água do município de São Carlos - SP, esse percentual foi de 21,5%, totalizando mais de 23 milhões de reais (“Portal da Transparência SAAE São Carlos”, 2020).

Existem diversas maneiras de reduzir o custo com energia elétrica em um sistema de abastecimento de água. Segundo Tsutiya (2001), a maioria dos procedimentos envolve alteração no sistema operacional, automação dos equipamentos dos sistemas de abastecimento de água, diminuição da potência dos equipamentos, conhecimento do sistema tarifário e geração de energia elétrica.

A alteração operacional apontada por Tsutiya (2001) para reduzir o custo com energia envolve, especificamente, os sistemas bombeamento-reservação, podendo-se ampliar o volume de armazenamento para deslocar o consumo de energia em que são cobradas as maiores tarifas para os horários em que as tarifas são mais baratas, otimizando economicamente o sistema.

Levando em consideração estritamente os custos, os reservatórios representam uma parcela bastante pequena do total requerido para manutenção e operação da rede, em oposição aos custos consideráveis de construção e/ou substituição dos tubos, ou aos custos operacionais das bombas. No entanto, seu impacto no desempenho geral da rede é significativo, desproporcional aos seus custos (VAMVAKERIDOU-LYROUDIA; SAVIC; WALTERS, 2007).

Um reservatório implantado em local não adequado pode aumentar significativamente os custos de projeto de tubulação para a rede, ou causar custos operacionais extremamente altos, afetando o projeto da bomba, ao mesmo tempo em que reduz índices de desempenho, como confiabilidade e

resiliência (VAMVAKERIDOU-LYROUDIA; SAVIC; WALTERS, 2007). As características dos reservatórios podem influenciar tanto em falhas mecânicas quanto hidráulicas. Por exemplo, se a elevação for muito alta, a pressão nas tubulações também assim o será, aumentando a probabilidade de ruptura dos tubos. Por outro lado, se a elevação for muito baixa, a pressão da água entregue aos consumidores talvez seja insuficiente, ocasionado falha hidráulica. Cada tipo de falha leva a perdas de água internas e mau funcionamento da rede. Contudo, essas falhas podem ser superadas se a rede é projetada para ter energia excedente suficiente para dissipação interna (PRASAD; PARK, 2004).

Ainda que os reservatórios possuam tal importância no desempenho da rede, as decisões concernentes aos seus projetos, no contexto real, ainda são muito baseadas em diretrizes normativas ou na experiência prática de engenheiros e tomadores de decisão. Um exemplo concreto ocorreu na cidade de São Carlos. De acordo com informações recebidas pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos (SAAE – São Carlos), estão planejadas implantações de, pelo menos, 9 (nove) reservatórios de água tratada com capacidade de 2650 m³ cada um, totalizando quase 24.000 m³. Essa ampliação representa um aumento de mais de 50% no volume total de armazenamento de água tratada implantado atualmente. Porém, ainda de acordo com o SAAE, ainda que esse planejamento tenha sido guiado pela identificação de problemas de abastecimento e com a intenção de melhorar os índices de desempenho relacionados à confiabilidade do sistema, não foram realizadas análises das demandas de cada bairro para verificar se esse volume seria adequado ou simulação hidráulica para verificação do impacto na operação da rede.

Pesquisas apresentadas na conferência de 1955 da Associação Internacional de Abastecimento de Água (IWSA) mostraram que, dependendo das diretrizes, a capacidade do reservatório pode variar de menos de 50% a mais de 200% da produção diária máxima na estação de tratamento (KELIHER; HUDSON; KEARNS, 1955). O uso contínuo dessas diretrizes de armazenamento, apesar da grande variação nas diretrizes de capacidade, revela o conservadorismo inerente a essa área. Embora o tamanho do reservatório deva ser específico do local, as diretrizes de projeto são concebidas para uma ampla gama de sistemas, o que leva, portanto, a reservatórios provavelmente

muito maiores do que eles precisariam ser, podendo ocasionar problemas na qualidade da água devido ao aumento no tempo de retenção (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

As limitações de diretrizes para a abordagem de projetos de reservatório destacam a necessidade de uma abordagem alternativa para apoiar a tomada de decisão em relação à otimização desses projetos, especialmente, no contexto real do aumento da demanda de água onde os consumidores têm novas necessidades de água para garantir seu conforto (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

Wu et al. (2005) conduziu um estudo para identificar alternativas de melhoria no sistema com o objetivo de atender à demanda crescente de uma comunidade. O estudo mostra que os modelos de otimização são uma poderosa ferramenta para auxiliar e aprimorar o processo de tomada de decisão na indústria de abastecimento de água.

Ferramentas de otimização são especialmente úteis quando sistemas possuem múltiplas restrições e engenheiros e administradores devem realizar muitas escolhas. Dado que a otimização permanece um grande desafio para a engenharia nas decisões diárias, analisar alternativas possibilita tomadas de decisão racionais que, mesmo que não necessariamente ótimas, são aceitáveis dentro de uma gama de soluções (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

Em 2001, Walski escreveu as razões pelas quais a otimização não se tornou uma prática de engenharia nos sistemas de distribuição de água. Um dos motivos elencados foi o fato de que os objetivos estabelecidos não refletem as verdadeiras preocupações dos administradores e, portanto, a programação matemática é raramente usada para tomar decisões críticas. Walski afirma que sistemas de distribuição reais possuem benefícios complexos de serem traduzidos em funções para os modelos de otimização. Ainda, dadas as incertezas das estimativas de custos e benefícios, muitas alternativas de projeto passam a ser essencialmente iguais. Por outro lado, na prática, os operadores estão dispostos a gastar dinheiro para fornecer capacidade aos sistemas como uma resposta à incerteza na previsão de futuras demandas e na necessidade de

confiabilidade. Além da incerteza própria da previsão de demandas, a capacidade em si dos sistemas pode acabar definindo o crescimento do consumo em determinada região.

A análise dos vários modelos de otimização de redes de abastecimentos de água revela que, embora muitos ainda se concentrem fortemente na otimização de tubos e na operação dos reservatórios, alguns modelos mais recentes tentam integrar o projeto do reservatório. Esses esforços devem ser encorajados e direcionados para uma maior aplicabilidade na prática do mundo real (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

Tendo em vista a expansão do armazenamento planejada pelo SAAE São Carlos e os demais aspectos relacionados aos reservatórios de distribuição de água supracitados, nessa pesquisa foi realizada uma análise dos volumes de reservação implantados nos bairros Cidade Aracy, Antenor Garcia e Abdelnur. Para isso, foi desenvolvido um modelo de otimização combinatória. O modelo hidráulico foi elaborado com o auxílio do software WaterGEMS®, devido às ferramentas que o software oferece, levando a uma maior praticidade para inserção de características físicas e das demandas do sistema. Em seguida, este foi exportado para o EPANET 2.2 para interface com o modelo de otimização, o qual analisou os resultados obtidos para diversas combinações de volumes de reservação e os custos de implantação e do uso de energia elétrica, a fim de se obter as condições ótimas para a implantação e operação do sistema de abastecimento de água.

Este documento está organizado em 6 capítulos, incluindo esta introdução. O capítulo 2 apresenta os objetivos gerais e específicos do trabalho. No capítulo 3, é realizada uma revisão bibliográfica apresentando os principais conceitos concernentes aos assuntos tratados. O capítulo 4 descreve os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho. No capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões. Por fim, no capítulo 6 são expostas as conclusões a respeito do trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esse trabalho teve como objetivo principal otimizar o sistema bombeamento-reservação de um setor de abastecimento de água de São Carlos - SP, levando em consideração o custo com energia elétrica da operação das bombas e o custo de implantação dos reservatórios de água tratada.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Construir modelo hidráulico representativo de um setor de abastecimento do município de São Carlos;
- Desenvolver modelo computacional de otimização combinatória acoplado ao EPANET 2.2;
- Analisar o impacto do volume dos reservatórios de água tratada no custo operacional do sistema de bombeamento com energia elétrica, baseando-se no modelo hidráulico e computacionais desenvolvidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura foi revisada com ênfase em componentes específicos dos sistemas de abastecimento de água, tais como os reservatórios de água tratada e estações elevatórias, assim como em modelos de otimização multiobjetivo.

3.1 Sistemas de Abastecimento de Água

Um sistema de abastecimento de água, apesar das diversas configurações que pode apresentar devido às particularidades de cada localidade (como a topografia, tamanho da cidade e posição em relação aos mananciais), apresenta em geral os seguintes elementos: manancial, captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento, reservatório e rede de distribuição (TSUTIYA, 2001).

Dado o recorte de pesquisa desse trabalho, serão aprofundados os estudos dos elementos: reservatórios de distribuição e estações elevatórias.

3.2 Reservatórios de distribuição

Os reservatórios de água tratada possuem um papel muito importante em sistemas de distribuição de água, possibilitando a gestão de demandas, garantindo o suprimento de água em caso de falha no sistema e reservas para emergências (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

Em relação à gestão de demandas, os reservatórios são responsáveis pela regularização da vazão e das pressões. A regularização da vazão, operacionalmente, quer dizer que o reservatório permite o fornecimento de uma vazão constante, geralmente, igual à vazão média de um dia de maior consumo. Quando a demanda da sua zona de abastecimento for menor que a média, ele acumulará água, do contrário, quando a demanda for maior que a média, ele fornecerá a vazão complementar (TSUTIYA, 2005). Já a regularização de pressões ocorre porque a existência de um reservatório pode diminuir as variações de pressão na rede, dependendo da localização em que este se encontra. A garantia de reserva de emergências é importante para suprir eventuais demandas extras relacionadas a ocorrências como incêndios, por exemplo. A garantia de suprimento de água em caso de falha no sistema está

relacionada à segurança do abastecimento, uma vez que o reservatório pode fornecer água durante um período mesmo que ocorram situações emergenciais, tais como ruptura na adutora, falta de energia elétrica ou alguma paralisação na captação ou estação de tratamento de água (TSUTIYA, 2005).

Além dessas vantagens, Tsutiya (2005) afirma que essas estruturas permitem uma otimização da utilização dos sistemas de bombeamento de duas maneiras:

- 1) Permitem o funcionamento do bombeamento fora dos horários em que a tarifa de energia elétrica é mais alta.
- 2) Levam a valores de bombeamento com altura manométrica e vazão constante, o que faz com que o conjunto motobomba opere mais próximo do seu ponto de rendimento máximo.

O projeto de um reservatório leva em consideração inúmeros fatores e compensações (“trade-offs”). Alguns dos fatores são: o tipo (elevado, apoiado ou semienterrado), a localização, a elevação (níveis operacionais mínimo e máximo) e o volume (WALSKI, 2000).

3.2.1 Tipo de reservatório

De acordo com Batchabani e Fuamba (2014), na prática corrente, a escolha do tipo de reservatório é influenciada por fatores tais como topografia, estética, disponibilidade de terreno, custo e experiência do projetista.

Já a localização geralmente é determinada pela disponibilidade de terreno. Morros são boas localizações para reservatórios pois mesmo os do tipo apoiado podem atuar como elevados em tais locais. Em áreas planas, entretanto, frequentemente há mais flexibilidade no que diz respeito à localização. (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

3.2.2 Localização

Uma localização comum para reservatórios é a jusante de plantas de tratamento ou na saída de um poço. Esse tipo de reservação é importante por poder proporcionar o atendimento a requerimentos do tempo de contato mínimo

para a desinfecção da água, porém, somente esses reservatórios não garantem a confiabilidade e a resiliência do sistema (WALSKI, 2000).

Outra localização possível é a jusante das áreas de maior demanda. Uma vantagem é que, se um tubo rompe perto da fonte de água, a ruptura não resultará em desconexão de todo o armazenamento dos clientes. Uma segunda vantagem é que se o fluxo de água chegar ao centro da demanda a partir de mais de uma direção, a vazão transportada por qualquer tubulação individual será menor e os tamanhos dos tubos geralmente serão menores, com redução de custos associada (WALSKI, 2000).

3.2.3 Elevação e níveis operacionais

De acordo com Walski (2000), a decisão mais importante em relação a um reservatório, em termos de projeto do sistema de distribuição, é a sua elevação e os consequentes níveis operacionais. O ponto chave para determinar a elevação do reservatório é determinar a região que será abastecida por ele. Os consumidores localizados nas posições mais alta e baixa determinarão se é possível trabalhar com uma zona ou se serão necessárias várias zonas de pressão. Essa informação, concomitantemente com as pressões mínimas e máximas aceitáveis, determinará as elevações do reservatório, assim como as alturas manométricas requeridas caso seja inevitável a utilização de bombas de distribuição (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

3.2.4 Volume

Segundo recomendações de Tsutyia (2005), para o dimensionamento da capacidade de um reservatório, devem ser levados em consideração os volumes para atender às variações de consumo de água, para combate a incêndios e emergências. Walski (2000) acrescenta ainda que escolher o volume ótimo envolve dilemas entre aumentar a confiabilidade do sistema proporcionada por reservatórios grandes, os custos mais altos envolvidos e problemas factíveis na qualidade da água ocasionados pela perda de desinfetante residual em reservatórios com maior tempo de retenção.

No Brasil, a NBR 12217/1994, que “fixa as condições exigíveis na elaboração de projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público”, não faz menção aos volumes de água para combate a incêndio e emergências. A norma determina que para o cálculo do volume útil do reservatório – definido como “volume compreendido entre os níveis máximo e mínimo, para atender às variações diárias de consumo” – devem ser avaliadas as informações do consumo diário e da forma de alimentação do reservatório, aplicando-se ao volume calculado um fator de 1,2 devido às incertezas dos dados utilizados.

Em relação ao volume para atender o combate a incêndios, Orsini e Resende (1969) afirmam que grandes eventos dessa natureza reconhecidamente não ocorrem nas cidades brasileiras, e, se ocorrem, não é em uma frequência que justifique o superdimensionamento dos reservatórios. Além disso, os autores afirmam que à reservação correspondente a um terço da demanda do dia de maior consumo – normalmente adotada no Brasil – deveria ser adicionado o volume dos reservatórios domiciliares, utilizados praticamente em todos os prédios e amplamente utilizados nas residências das cidades brasileiras. Dessa maneira, poder-se-ia considerar satisfatório o volume reservado para a maioria das emergências. Ademais, Orsini (1996, apud Tsutiya (2005) acrescenta que as concessionárias, a fim de evitar grandes volumes de reservação ineficientes, adotam redes flexíveis em que é possível manobrar para desviar água para os hidrantes.

Em uma pesquisa realizada por van Zyl et al. (2008), foram levantados os requisitos mínimos em relação aos volumes de incêndio e emergência em alguns países. O Quadro 1 apresenta os dados da pesquisa.

Quadro 1 - Critérios típicos para projetos de reservatórios para áreas residenciais com baixa densidade populacional

Países	Exigências de armazenamento	
	Incêndio (m ³)	Emergência
Estados Unidos da América	680 ¹	1 dia de maior consumo
França	120	2 dias de consumo médio
África do Sul	108	2 dias de consumo médio

Fonte: Adaptado de van Zyl et al. 2008.

Nota 1: limite superior baseado em uma avaliação da demanda para incêndio + demanda de um dia de pico – capacidade de produção.

As colunas do Quadro 1 não necessariamente são aditivas para determinação do volume total, uma vez que é improvável que ocorram ao mesmo tempo um incêndio e uma grande interrupção no fornecimento de água (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

Em relação ao volume requerido para atender às variações de consumo, Tsutiya (2005) estabelece que pode ser calculado por dois métodos diferentes, dependendo das informações disponíveis.

Quando os dados de curva de consumo estão disponíveis, ainda podem ser feitas duas considerações: adução contínua – vazão constante durante 24 horas com a demanda do dia de maior consumo – e adução intermitente – durante um intervalo t a adução é desligada diariamente. Para o caso em que a adução é contínua, pode-se determinar a capacidade mínima do reservatório pela Equação 1.

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

Equação 1 – Capacidade mínima de um reservatório para adução contínua

Em que:

V – Volume de reservação (m³);

Q – Vazão consumida (m³/h);

\bar{Q} – Vazão média do dia (m³/h);

t_2 – instante em que o consumo é menor que a vazão fornecida (h);

t_1 – instante em que o consumo é maior que a vazão fornecida (h).

Caso não se tenha informações sobre a curva de consumo, deve-se admitir uma. De acordo com Tsutiya (2005), pode-se adotar uma curva senoidal, por exemplo, representada pela Equação 2.

$$Q = (K_2 - 1) \times \frac{V}{24} \times \sin\left(\frac{\pi}{12} \times t\right) + \frac{V}{24} \quad \text{Equação 2 – Curva de consumo senoidal}$$

Em que:

K_2 – Coeficiente da hora de maior consumo;

V – Volume consumido no dia de maior consumo e

t – Horário correspondente do dia.

Assim, a capacidade mínima de reservação é calculada como na Equação

1. Resolvendo essa equação, tem-se que:

$$C = \frac{K_2 - 1}{\pi} \times V \quad \text{Equação 3 – Capacidade mínima do reservatório para curva de consumo senoidal}$$

Em que:

K_2 – Coeficiente da hora de maior consumo;

V – Volume consumido no dia de maior consumo;

C – Capacidade mínima do reservatório para curva de consumo senoidal.

De acordo com Azevedo Netto (1998), os valores recomendados de K_2 para projeto variam de 1,5 a 2,3, sofrendo influência da quantidade de reservatórios domiciliares presente no sistema. A baixa quantidade ou inexistência de reservatórios domiciliares levam a maiores valores de K_2 . O autor também discorre sobre a flutuação do consumo ao longo do ano em países tropicais, como o Brasil, onde ocorre um aumento em períodos de verão. Assim, devem ser consideradas variações de consumo mensais, diárias, horárias e instantâneas. Walski (2000) afirma que, na prática, a média atual de consumo diário é aumentada por um fator para levar em conta a demanda futura. Esse fator depende da taxa de crescimento na área de abastecimento e o projeto deve ser baseado na demanda do sistema ao final do período de estudo.

Por fim, em termos de diretrizes gerais para o cálculo do volume de reservatório destinado ao atendimento às demandas, Zyl et al. (2008) mostrou

que em países como Estados Unidos e França consideram-se volumes de 35% e 30%, respectivamente, do dia de maior consumo, em áreas residenciais de baixa densidade. No Brasil, no entanto, apesar da norma brasileira (NBR 12217/1994) não sugerir um percentual do consumo diário a ser adotado, é prática comum adotar-se um terço do volume consumido em um dia de pico.

3.3 Estação elevatória

As estações elevatórias em um sistema de abastecimento de água podem ser responsáveis por transportar tanto água bruta quanto água tratada. À medida que foram desenvolvidas tubulações com cada vez mais capacidade de resistência a altas pressões, dispositivos de proteção para essas tubulações e equipamentos de bombeamento com faixas largas de capacidade e foi aumentando a disponibilidade de energia elétrica, as estações elevatórias foram se tornando cada vez mais essenciais para os sistemas de abastecimento de água (SAA's) (TSUTIYA, 2005).

A estação elevatória é composta pela estrutura, pela tubulação, pela parte elétrica e pela parte mecânica. Os subcomponentes eletromecânicos são: controle, painel, transformador, linha de transmissão, motor e bomba (TSUTIYA, 2005).

A potência dos conjuntos elevatórios é dada pela Equação 4 (AZEVEDO NETTO, 1998):

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H_{man}}{736 \times \eta} \quad \text{Equação 4 – Potência dos conjuntos elevatórios}$$

Em que:

P – Potência em cv;

γ – peso específico do líquido a ser elevado (água ou esgoto: 9.810 N/m³);

Q – Vazão, em m³/s;

H_{man} – altura manométrica em m;

η – rendimento global do conjunto ($\eta_{bomba} \times \eta_{motor}$).

Para o cálculo do consumo de energia de um conjunto elevatório, utiliza-se a Equação 5:

$$E = 0,00273 \times \frac{H \times V}{\eta}$$

Equação 5 – Consumo de energia elétrica de um conjunto elevatório

Em que:

E – Energia consumida, kWh;

H – Altura manométrica de bombeamento, m;

V – Volume de água bombeada, m³;

η – Rendimento dos conjuntos motobombas.

A partir do cálculo do consumo, pode-se chegar ao custo multiplicando pela tarifa do kWh. A seguir será descrita a política de cobrança tarifária no Brasil.

3.3.1 Tarifa

O sistema tarifário brasileiro é regularizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de acordo com o exposto na Resolução Normativa (REN) nº 414 de 2010 (ANEEL, 2010) que estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica.

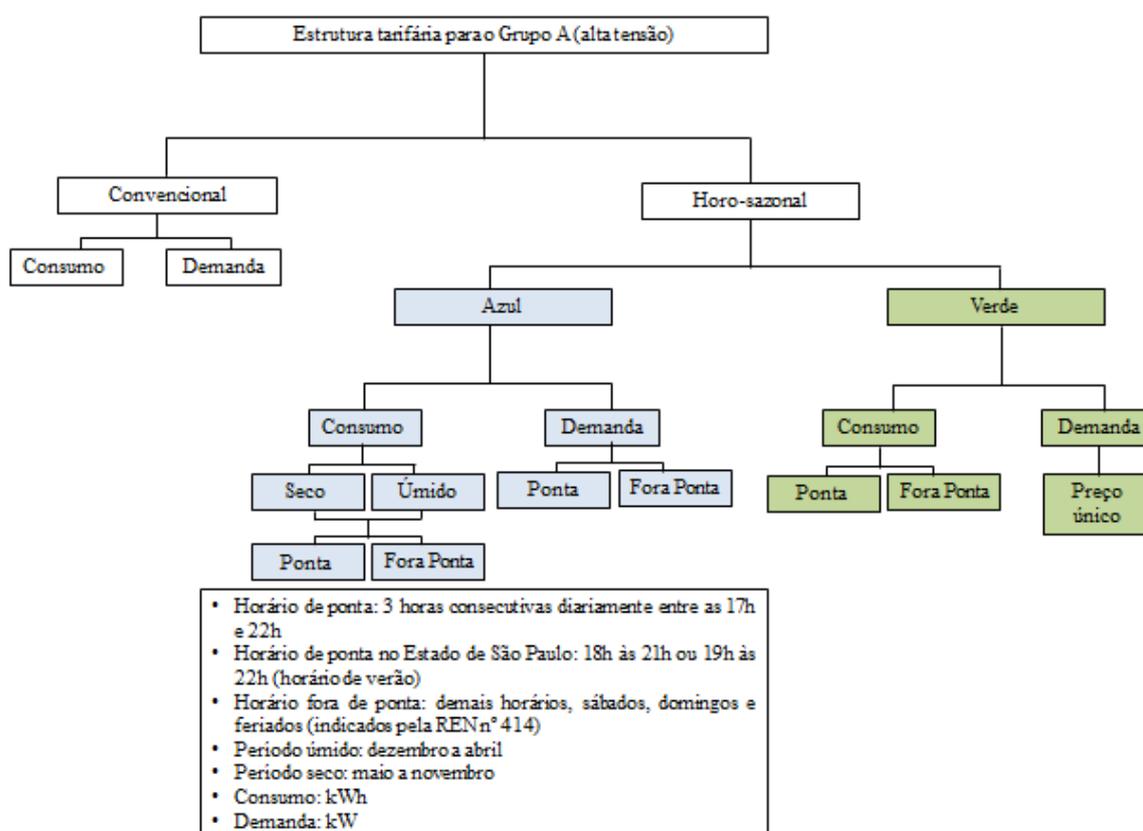
A Resolução Normativa divide os consumidores em dois grupos principais: grupo A e B. O grupo A é caracterizado pelas unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV (alta tensão) ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição (subgrupo AS). Para esse grupo, a tarifa é binômica, ou seja, tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia. Já o grupo B é composto por unidades com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV e são submetidos a tarifa monômica, que é caracterizada por apenas tarifas de consumo de energia elétrica, independentemente das horas de utilização do dia. As empresas de saneamento são consumidoras do grupo A.

As cobranças tarifárias feitas ao grupo A podem ser do tipo convencional ou horo-sazonal. Na estrutura convencional, é cobrada uma tarifa para o consumo de energia elétrica (kWh) e outra para a demanda (kW), independentemente da hora de utilização no dia e do período do ano. Já a cobrança do tipo horo-sazonal ainda pode ser azul ou verde. No caso da

estrutura tarifária azul são aplicadas tarifas diferenciadas para a demanda (kW) dependendo da hora do dia e para o consumo de energia elétrica (kWh) dependendo da hora do dia (ponta ou fora de ponta) e do período do ano (seco ou úmido). A hora de ponta é definida como um período diário de três horas consecutivas entre 17h e 22h, de segunda a sexta-feira. No Estado de São Paulo, esse horário é das 18h às 21h no horário convencional e das 19h às 22h no horário de verão.

Já na estrutura tarifária verde são aplicadas tarifas diferenciadas apenas para o consumo de energia elétrica (kWh), dependendo da hora de utilização do dia. Para a demanda (kW) é aplicada uma tarifa única. Tanto na estrutura tarifária verde quanto na azul, as tarifas aplicadas são maiores nos horários de ponta, sendo que na azul elas podem ser ligeiramente maiores no período seco. A Figura 1 resume a política tarifária aqui descrita para o grupo A.

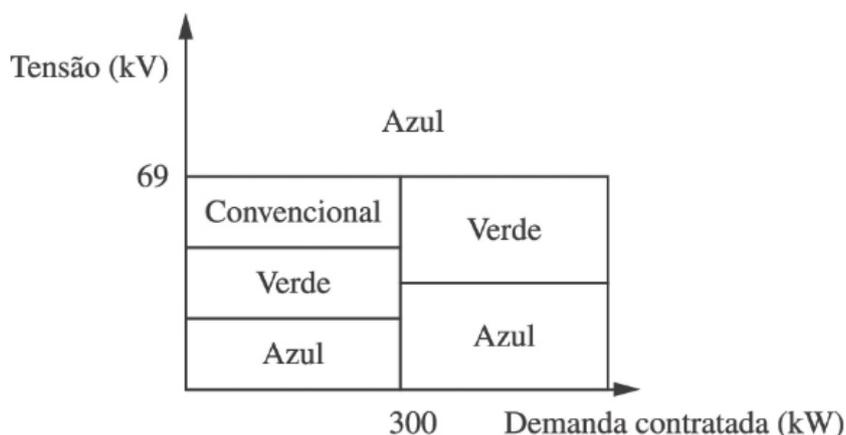
Figura 1 - Estrutura tarifária brasileira para as unidades consumidoras classificadas no grupo A.



Fonte: Elaboração Própria.

Para a definição da modalidade de cobrança de tarifas, os próprios consumidores podem fazer a opção, de acordo com o valor para a demanda contratada e a tensão. A Figura 2 apresenta as modalidades disponíveis para cada tipo de consumidor.

Figura 2 - Modalidades tarifárias disponíveis para cada tipo de consumidor.



Fonte: (SOLER et al., 2015).

O uso das estações elevatórias tornou-se cada vez maior e, portanto, o custo da energia elétrica passou a representar cada vez mais uma fatia dos custos operacionais em sistemas de abastecimento (TSUTIYA, 2005). Por isso, foram sendo desenvolvidas técnicas para redução desses custos. A seguir serão descritas algumas maneiras de melhorar a eficiência e reduzir custos com energia elétrica.

3.3.2 Alternativas para redução do custo de energia elétrica

Tsutiya (2001) aborda algumas alternativas para a redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água, dividindo em duas abordagens principais: reduzir o custo sem diminuir o consumo de energia ou reduzindo o consumo.

Entre as medidas que podem reduzir as despesas sem alterar o consumo de energia estão, principalmente, as medidas administrativas, que envolvem mudanças na estrutura tarifária; acordo com as companhias de energia para redução de tarifas; verificação de instalações que podem ser desligadas pela falta de uso; normalização da demanda contratada e correção da classe de

faturamento. Além dessas medidas administrativas, estão inclusas nesse grupo algumas medidas operacionais, tais como: correção do fator de potência, reparação do fator de carga e modificação da tensão de alimentação.

Para diminuir o consumo de energia, Tsutiya (2001) aponta que ações como a redução do índice de perdas, otimização do rendimento dos conjuntos motobombas e a redução das perdas de carga nas tubulações auxiliam nesse propósito.

O autor aponta também que controles na operação, por exemplo, no sistema de bombeamento-reservação e a utilização de inversores de frequência nos equipamentos também podem levar a uma redução de custo com energia.

Wlamir (2007) aponta práticas comuns em sistemas de abastecimento de água para controle da vazão aduzida que substituem a utilização de inversores. Utilizam-se, por exemplo, válvulas para aumentar a perda de carga ou “by-pass” na saída do recalque para retornar parte da vazão para o reservatório de sucção. Entretanto, como destacado pelo autor, essas operações representam um desperdício desnecessário de energia. O autor aponta que uma alternativa mais eficiente em relação a essas operações é justamente a utilização do inversor de frequência, como já citado, que controla a rotação do motor e, com isso, altera a curva da bomba, mantendo a curva do sistema ou instalação.

Em seu estudo, Wlamir (2007) elenca critérios para o uso eficiente de inversores de frequência. O autor aponta, por exemplo, que bombas com baixa variação de carga ao longo da sua curva não são as melhores para associação com inversor. Wlamir (2007) sugere ainda que, para atingir um melhor rendimento do conjunto motobomba, deve-se dimensionar de forma que o ponto de vazão máxima esteja localizado à direita das curvas de melhores rendimentos.

Não apenas a otimização do funcionamento das bombas e sua automatização devem ser levadas em consideração. Como observado por Soler et al. (2015), devido à estrutura tarifária descrita, o planejamento do funcionamento dos equipamentos elétricos em um sistema de abastecimento de água, principalmente bombas hidráulicas, é necessário, avaliando,

consequentemente, os níveis dos reservatórios em um horizonte de planejamento. No próximo tópico serão descritas alternativas de operação que envolvem a análise do funcionamento da adução em conjunto com o volume de reservação necessário para realização de tais operações.

3.3.3 Alternativas operacionais de sistemas bombeamento-reservação

Tsutiya (2001) descreve quatro alternativas operacionais para sistemas de bombeamento-reservação considerando as seguintes variáveis: a curva de consumo, o volume de reservação e a vazão de adução. Nessa análise, o autor avalia alternativas para um sistema simples, em que há apenas uma adução e um reservatório que abastece a região analisada.

Na primeira alternativa descrita, a adução é contínua e constante, sendo a vazão igual à taxa de consumo médio diário. Segundo o autor, essa operação é utilizada normalmente para o projeto do sistema bombeamento-reservação. Nessa alternativa, o volume mínimo de reservação é de 13% do total do consumo diário médio.

Na segunda alternativa operacional, o bombeamento seria realizado apenas nas horas foras de ponta, considerando tarifa horo-sazonal. Para uma cidade como São Carlos, localizada no Estado de São Paulo, o bombeamento seria desligado entre as 18h e as 21h. Nesse caso, nos horários de funcionamento da adução, a vazão deveria ser acrescida de 14% em relação à vazão média diária e o volume mínimo de reservação deveria ser 7% maior em relação à alternativa operacional anterior.

Na terceira alternativa operacional, ao invés de desligar completamente o bombeamento no horário de ponta, este é reduzido a 50%. Nesse caso, nos demais horários, a adução deve ser 7% maior que a vazão média de consumo diário e o volume mínimo de reservação de 16% o volume total médio consumido diariamente.

Na quarta e última alternativa, não há bombeamento durante os horários de ponta e não há aumento na taxa de bombeamento. Nessa situação, pode ser que seja necessária a expansão da reservação para suprir as 3 horas de

desligamento das bombas. O autor destaca ainda que para sistemas que já possuem folga na reservação, essa parada das bombas no horário de pico representa uma diminuição imediata nos custos com energia.

3.4 Simulação hidráulica

Modelos matemático-computacionais, quando calibrados, são ferramentas que reproduzem com muita precisão um sistema real, tornando-se muito úteis para formar pareceres mais seguros. Os modelos permitem a análise de diversos cenários antes que qualquer modificação seja implantada (WLAMIR, 2007).

Os modelos hidráulicos determinam a pressão em nós e vazões em tubulações de uma rede, sendo gerados por equações de conservação de massa e de energia. Para a resolução das equações, conhecem-se as demandas, associadas aos nós e as características das tubulações, calculando-se, assim, as perdas de carga e a vazão de cada trecho de rede (KAPELAN; SAVIC; WALTERS, 2005).

Para a resolução das equações, que não são lineares (devido à não-linearidade da equação de perda de carga) são aplicados métodos de solução aproximados. Um dos métodos mais utilizados atualmente é o do Gradiente, presente em simuladores como EPANET e WaterGEMS® (REGO, 2007). Nesse método, assume-se que todas as demandas são abastecidas (as cargas hidráulicas são positivas), sendo esta uma das principais desvantagens desse método (TANYIMBOH; TAHAR; TEMPLEMAN, 2003). O software WaterGEMS® faz uso do modelo dirigido pela demanda.

3.4.1 Calibração

Uma etapa muito importante no desenvolvimento de um modelo de distribuição de água é a comparação entre os resultados previstos pelo modelo com as observações realizadas em campo. Se os dados de entrada do modelo estiverem corretos, então os valores de vazão e pressão serão coerentes com os valores observados. Entretanto, os dados inicialmente utilizados para descrever a rede não são perfeitos geralmente, portanto, alguns valores devem

ser modificados para que os resultados modelados e os observados sejam compatíveis (WALSKI, 1983).

Para corrigir um modelo é necessário primeiramente conhecer as fontes de incertezas. Essas podem ser categorizadas nos seguintes grupos: estimativa de uso da água incorreto; capacidade de transporte das tubulações; cargas de pressão incorretas em pontos de pressão constante (bombas, reservatórios de distribuição, válvulas redutoras de pressão) e representação ruim do sistema no modelo (ausência da representação de tubulações existentes) (WALSKI, 1983).

Como um usuário pode dizer qual parâmetro alterar? A resposta é que, se o usuário está apenas tentando fazer com que o modelo preveja a pressão sob uma condição operacional, isso não importa. O usuário sempre pode forçar o modelo a ajustar as observações para um único conjunto de observações. Se o parâmetro errado for ajustado, o modelo, no entanto, fornecerá resultados ruins quando comparado a observações em uma vazão diferente (por exemplo, vazão média versus vazão de incêndio), uma vez que o modelo foi calibrado usando erros de compensação. A chave para selecionar o parâmetro correto para modificar é ter observações de campo correspondentes a mais de uma vazão, enquanto conhece as pressões da bomba, cotas do reservatório e configurações das válvulas correspondentes a esse tempo (WALSKI, 1983).

Para Shamir et al. (1977), a calibração consiste em determinar as características físicas e operacionais de um sistema existente e determinar os dados que, quando colocados no modelo computacional, irão alcançar resultados realísticos. Segundo Gao (2017), o processo de calibração é uma tarefa difícil, uma vez que requer um longo trabalho de investigação, experiência de engenharia e envolve muitos parâmetros do modelo utilizando apenas poucos dados observados para comparação. O autor classifica o procedimento de calibração em: métodos de tentativa e erro; métodos de simulação ou explícitos; métodos de otimização ou implícitos; e métodos de mínimos quadrados ponderados.

3.5 Indicadores operacionais

Como sempre, o setor de distribuição de água encara grandes desafios para o futuro, e estes estão em constante evolução. Algumas pressões que o setor enfrenta são: adaptação às mudanças climáticas; redução do uso de energia; acompanhamento do crescimento populacional especialmente rápido em áreas urbanas; pressão financeira; evolução das expectativas dos usuários; pressões políticas para redução das tarifas de água e o envelhecimento da infraestrutura e a sustentabilidade do serviço como um todo. Nesse sentido, sistemas de avaliação de desempenho têm se tornado mais comuns em sistemas de abastecimento de água ao redor do mundo nos últimos anos, assim como sua importância vem crescendo juntamente. Avaliações de desempenho também podem facilitar a comunicação entre os diferentes stakeholders envolvidos nos serviços de abastecimento de água (ALEGRE et al., 2006).

Um indicador de desempenho consiste em um valor expresso em unidades específicas e uma escala confiável que indica a qualidade dos dados representados. Indicadores são tipicamente taxas entre variáveis de mesma dimensão ou dimensões diferentes. No caso de se utilizar dimensões diferentes, deve-se atentar para não usar denominadores que possam variar substancialmente de um ano para outro, tais como consumo anual, exceto quando o numerador também varie na mesma proporção (ALEGRE et al., 2006).

Tsutiya (2001) apresenta alguns indicadores utilizados na Divisão de Controle e Desenvolvimento Operacional da Unidade de Negócio do Baixo Tietê e Grande a fim de se obter a máxima eficiência e confiabilidade na operação dos sistemas. Nessa unidade, há um programa de software de controle de contas de energia elétrica que avalia, por meio das contas de energia, a evolução do consumo energético e da demanda hídrica de todos os pontos de energia, levando em consideração os seguintes indicadores: m^3/kWh , $kWh/ligação$ e $R\$/ligação$.

Entretanto, para que os indicadores de desempenho de uma rede abastecimento de água sejam confiáveis, é necessário que haja confiabilidade nas medições realizadas. López J.D. e J.G. Guerrero (2013) alertam para o

desgaste dos equipamentos de medição individuais, que é influenciado pelos materiais e métodos utilizados na sua construção e pelo tempo de utilização do equipamento. Ainda segundo os autores, a incerteza quanto ao erro dos medidores individuais e de todos os instalados causa distorção nos balanços hídricos da rede de distribuição.

3.6 Otimização operacional

Em diversas áreas do conhecimento, aparecem problemas em que surge a pergunta “O que é melhor?”. A otimização matemática, como uma área da ciência computacional, busca responder a essa pergunta. O primeiro passo para se começar a resolver um problema é formulá-lo, o que significa determinar uma função objetivo que associará cada ponto no espaço de soluções a um número real. A partir desse número, é possível avaliar a qualidade da resposta. De forma geral, essa função pode buscar a maximização ou a minimização (SECCHI, 2004). Os problemas de maximização consideram os benefícios que cada elemento gera, apesar de despenderem os recursos disponíveis. Já nos problemas de minimização, os elementos avaliados possuem um custo e a decisão rende um apoio para a implantação de uma solução (MIYAZAWA; DE SOUZA, 2015).

Os métodos heurísticos de otimização podem ser determinísticos ou estocásticos. Um método é determinístico quando é possível antever os passos a partir de um ponto inicial, levando, portanto, sempre à mesma resposta quando se parte do mesmo ponto. Já os métodos estocásticos ou aleatórios utilizam-se de escolhas feitas a partir de números aleatórios, definidos durante a execução do código (SECCHI, 2004).

A Otimização Combinatória é uma das áreas que mais dependem da otimização heurística (SECCHI, 2004). Esse método é utilizado para resolução de problemas discretos, em que há uma função aplicada a um domínio finito ou enumerável. Ainda que finito, muitas vezes o domínio da função pode ser suficientemente grande para que algoritmos de busca exaustiva se tornem impraticáveis. Muitos problemas de grande porte são relevantes e requerem respostas, ainda que não sejam o melhor valor (mas que, preferencialmente,

tenham valor próximo do ótimo) ou sejam obtidas após muito processamento computacional (MIYAZAWA; DE SOUZA, 2015).

Os algoritmos por força-bruta, como sugerido pelo nome, usam muito trabalho computacional para atingir uma solução, sem se preocupar em explorar as estruturas combinatórias do problema. Na verdade, estes algoritmos relacionam todas as possíveis saídas, apurando sua exequibilidade e, se satisfeitos, seu potencial para ser uma solução ótima. Eles são um dos algoritmos mais simples, no entanto, por serem computacionalmente intensivos, geralmente, são utilizados apenas para entradas pequenas (MIYAZAWA; DE SOUZA, 2015).

Assim, surge a necessidade de desenvolvimento de ferramentas mais aprimoradas, denominadas meta-heurísticas. Alguns exemplos são os algoritmos genéticos (AG), busca tabu, *simulated annealing*, algoritmo de colônia de formigas, redes neurais (NEUMANN, L. G. et al, 2004).

A otimização de sistemas de abastecimento de água vem sendo estudada há muitos anos, sendo que algumas publicações mais antigas datam de 1890 e é um campo em que houve um rápido crescimento. Nas primeiras publicações, entretanto, não se referiam à otimização e sim à “economia” do sistema (MALA-JETMAROVA; BARTON; BAGIROV, 2015).

As técnicas de otimização têm sido aplicadas com sucesso em vários problemas de gerenciamento de água, tais como projeto, reabilitação e operação de reservatório de sistemas de distribuição de água. Uma das variáveis mais comuns na busca pela otimização é a energia para bombeamento, uma vez que ela representa uma porção significativa dos custos operacionais de sistemas ao redor do mundo (BAGIROV et al., 2013).

Métodos de otimização acoplados a modelos de simulação hidráulica podem melhorar o projeto de redes de grande escala. Em alguns casos, os métodos de otimização oferecem até economias de custos potenciais. As ferramentas de modelagem de otimização são especialmente úteis quando o abastecimento de água enfrenta várias restrições e engenheiros práticos e os

tomadores de decisão devem realizar muitas deliberações (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

Os métodos de otimização para reservatórios de distribuição em sistemas de abastecimento de água envolvem as seguintes etapas no processo: seleção das variáveis de decisão, formulação do problema, resolução do problema formulado e validação do modelo, que pode ocorrer por meio de um estudo de caso (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

A formulação do problema deve estar sujeita às equações de continuidade, conservação de energia e a critérios de projeto. Ainda, a otimização pode seguir basicamente dois modelos: objetivo único e multiobjetivo. O modelo com um único objetivo utiliza o custo como único critério de otimização (BATCHABANI; FUAMBA, 2014). Walski (2001), entretanto, opõe-se ao uso da minimização de como um objetivo do sistema de abastecimento, uma vez que, é difícil definir restrições e benefícios devido à incerteza sobre a demanda futura, além do fato de que sempre haverá várias maneiras de alcançar os mesmos custos e benefícios dada a gama de incertezas.

Já os modelos multiobjetivos buscam maximizar os benefícios ao mesmo tempo em que se minimizam os custos. Um dos benefícios comumente avaliados nos modelos multiobjetivos é a confiabilidade do sistema. (BATCHABANI; FUAMBA, 2014). A confiabilidade de um sistema de abastecimento de água refere-se à habilidade que o sistema tem de suprir os consumidores adequadamente sob condições normais e excepcionais. (ATKINSON et al., 2014).

A avaliação da confiabilidade do sistema pode ser realizada pelo índice de resiliência (IR) de Todini (2000), que foi modificado em 2008 por Jayaram e Srinivasan. A equação modificada é mais adequada para sistemas em que há múltiplas fontes. A premissa adotada no índice de resiliência modificado (IRM) é a de que, ainda na fase de projeto, há a intenção de fornecer potência adicional nos nós de demanda, com a finalidade de lidar com as incertezas. A Equação 6 apresenta o cálculo do IRM, que considera somente as soluções com as pressões iguais ou maiores à mínima requerida em todos os nós.

$$IRM = \frac{\sum_{j=1}^{nn} Q_j^{req} (H_j - H_{min,j})}{\sum_{j=1}^{nn} Q_j^{req} H_{min,j}} \times 100$$

Equação 6 - Índice de Resiliência
Modificado. Fonte: Jayaram e Srinivasan
(2008)

Em que:

nn é o número de nós de abastecimento e de demanda;

Q_j^{req} é a demanda requerida no nó j ;

H_j é a carga hidráulica no nó j ; e

$H_{min,j}$ é a carga hidráulica mínima requerida no nó j .

O Quadro 2 resume os métodos de otimização aplicados a projetos de reservatório em sistemas de abastecimento de água desenvolvidos nos últimos anos.

Quadro 2 - Métodos de otimização aplicados a projeto de reservatórios em sistemas de distribuição de água.

Artigo	Variáveis de decisão do reservatório	Formulação	Método de resolução
(ALPEROVITS; SHAMIR, 1977)	Elevação	Objetivo único	Programação Linear
(MURPHY; DANDY, 1994)	Localização Volume Nível mínimo operacional	Objetivo único	Algoritmo Genético (AG)
(WALTERS et al., 1999)	Localização Volume Níveis mínimo e máximo operacionais	Multiobjetivo	SMGA (<i>Structured messy Genectic Algorithm</i>)
(FARMANI, R., SAVIC, D. A., AND WALTERS, 2004)	Localização Diâmetro Níveis mínimos e máximo operacionais Elevação de fundo	Multiobjetivo	NSGA (<i>Non-dominated sorting Genectic Algorithm</i>)

Artigo	Variáveis de decisão do reservatório	Formulação	Método de resolução
(OSTFELD, 2005)	Volume	Objetivo único	Algoritmo Genético (AG)
(FARMANI; WALTERS; SAVIC, 2005)	Localização Níveis mínimos e máximo operacionais Diâmetro Elevação de fundo	Multiobjetivo	NSGA
(VAMVAKERIDOU-LYROUDIA; WALTERS; SAVIC, 2005)	Localização Volume Nível mínimo operacional	Multiobjetivo	Algoritmo Genético (AG) / Lógica Fuzzy
(FARMANI; WALTERS; SAVIC, 2006)	Localização Níveis mínimo e máximo operacionais Diâmetro Altura de água para emergência	Multiobjetivo	NSGA
(VAMVAKERIDOU-LYROUDIA; SAVIC; WALTERS, 2007)	Volume Nível mínimo operacional	Multiobjetivo	Algoritmo Genético (AG) / Lógica Fuzzy
(PRASAD, 2007)	Localização Volume Nível mínimo operacional Razão diâmetro-altura Razão volume de emergência-volume total	Objetivo único	Algoritmo Genético (AG)

Artigo	Variáveis de decisão do reservatório	Formulação	Método de resolução
(PRASAD, 2010)	Localização Volume Nível mínimo operacional Razão diâmetro-altura Razão volume de emergência-volume total	Objetivo único	Algoritmo Genético (AG)

Fonte: BATCHABANI; FUAMBA (2014).

Nyirenda e Tanyomboh (2018) alertaram para o fato que esses procedimentos de otimização não forneceram a capacidade de incorporar aspectos de qualidade da água no projeto de redes de distribuição de água ao mesmo tempo em que otimiza o projeto dos elementos físicos. Essa fraqueza resulta em baixo desempenho dos sistemas com operação ineficiente que podem fornecer água abaixo do padrão, potencialmente resultando em efeitos negativos, como aumento da idade da água, baixo teor de cloro residual bem como a produção de subprodutos nocivos da desinfecção.

Dadas as questões que envolvem a aplicação de modelos de otimização na realidade, incentivar a utilização deles requer um exame claro de quais são as forças e fraquezas de cada abordagem para um dado projeto de reservatório em um sistema de distribuição de água.

A abordagem mais comum, que é a adoção de diretrizes, é mais simples, gera uma estimativa mais rápida. Porém, elas não especificam completamente o projeto de um reservatório, deixando muito espaço para o julgamento da engenharia. As diretrizes, quando existentes, geralmente possuem um foco no volume e não em fatores como elevações mínimas e máximas ou localização. Sendo assim, elas apresentam maior rigidez e inconsistência e podem resultar em reservatórios maiores, podem levar a problemas na qualidade da água (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

Enquanto as formulações com um único objetivo são mais simples, acessíveis e possuem uma grande gama de ferramentas para implementação,

elas não apresentam mais de uma alternativa e podem não ser adequadas para a avaliação de um sistema de abastecimento, dada a necessidade deste de atender a critérios como confiabilidade e qualidade da água (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

Já as formulações multiobjetivo são mais flexíveis, mais adequadas à complexidade de sistemas de abastecimento de água e mais realistas, uma vez que considera fatores levados em consideração nas tomadas de decisão reais. No entanto, possuem uma maior dificuldade para implementação (BATCHABANI; FUAMBA, 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados os métodos empregados no desenvolvimento e validação do modelo de otimização, visando minimizar o consumo energético, assim como os custos operacionais relacionados, a partir da alteração das capacidades de armazenamento dos reservatórios de distribuição de água. À vista disso, foram seguidas as seguintes etapas: elaboração de um modelo computacional, formulação do problema e validação do modelo com base na aplicação a uma região de abastecimento da cidade de São Carlos.

4.1 Modelo computacional proposto

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi proposto um modelo computacional, denominado pela autora como “MOC – Modelo de Otimização Combinatória”, empregando algoritmo Guloso (ou de Prim) e um simulador hidráulico e de qualidade da água fundamentado no EPANET 2.2.

A interface entre o EPANET 2.2 e o modelo de otimização foi elaborada a fim de facilitar seu uso, permitindo estabelecer as condições de contorno, baseadas nos limites extremos de pressão e concentração de desinfetante; os parâmetros de otimização do sistema de abastecimento; o número e os percentuais de variação dos volumes iniciais dos reservatórios de nível variado (RNV), assim como os custos estabelecidos para implantação dos reservatórios e referentes ao consumo de energia elétrica e de produto químico para a desinfecção.

A Figura 3 ilustra a interface desenvolvida como ferramenta para o desenvolvimento da análise combinatória.

Figura 3 - Interface desenvolvida para a execução do EPANET 2.2 a partir das combinações estabelecidas para os volumes dos reservatórios de nível variável do sistema de abastecimento de água.

Características Gerais do Sistema de Abastecimento para fins de otimização

Número de percentuais de variação dos volumes iniciais dos reservatórios de nível variado (RVN)

Custos estabelecidos para implantação dos reservatórios e referentes ao consumo de energia elétrica e de produtos químicos para desinfecção

Parâmetros de Otimização

Condições de Contorno

MOC - Modelo de Otimização Combinatória para Sistemas de Abastecimento de Água

Características da Otimização

Arquivo:

Número de Reservatórios (Geral):

Número de Tanks:

Número de nós (Geral):

Número de combinações possíveis:

Número de combinações viáveis:

% dos Volumes de Reservação Considerados

Energia Elétrica

Número do Padrão (Pattern) do custo da energia elétrica

Desinfetante

Custo do Desinfetante (R\$/kg):

Concentração padrão (%):

Custo do Reservatório

Equação Geral:

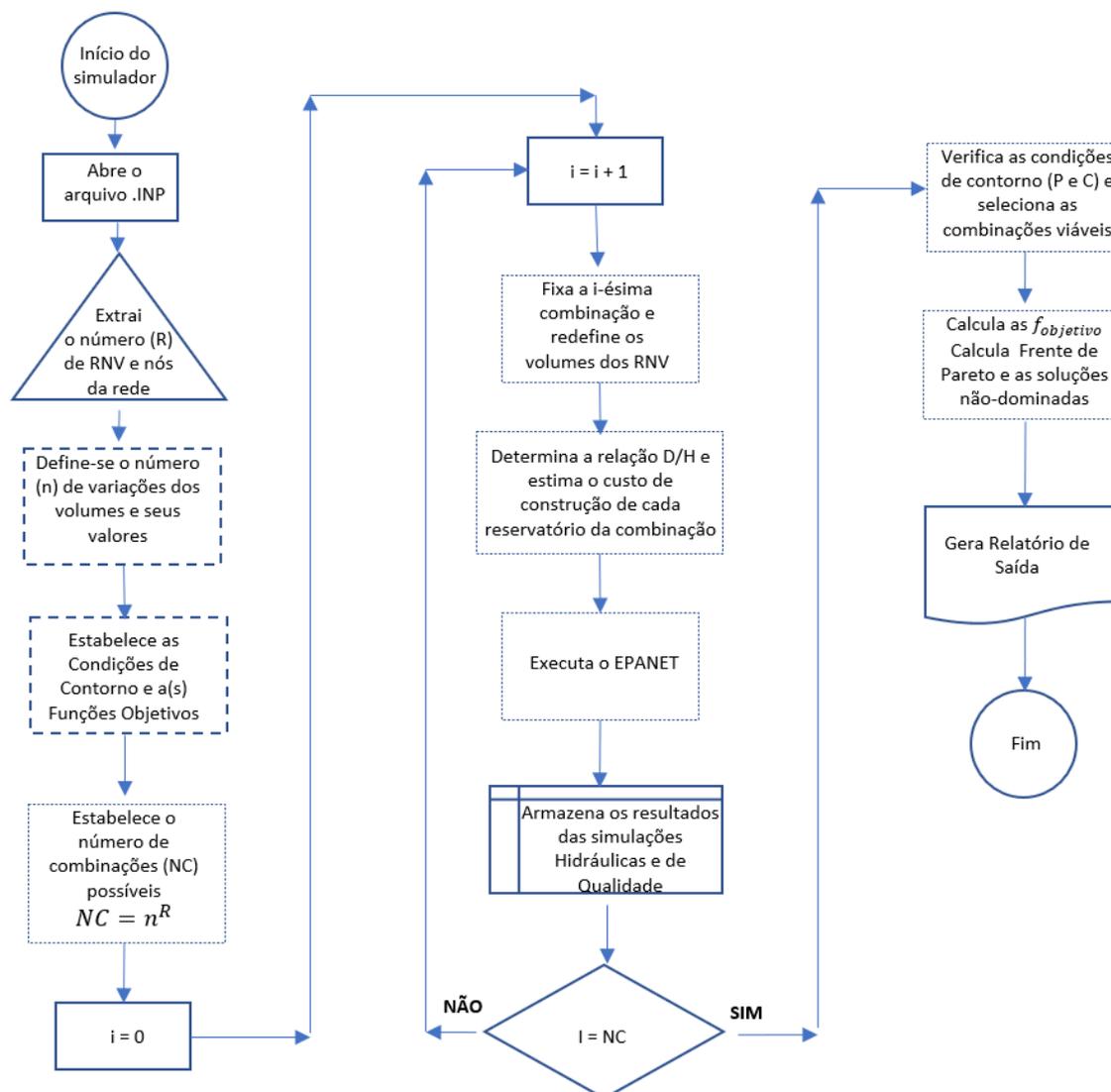
$$C (R\$) = 2837 \cdot V \cdot \frac{0.667}{(D/H)} \cdot \frac{0.333}{(D/H)} + 1137 \cdot V \cdot \frac{0.667}{(D/H)} \cdot \frac{0.667}{(D/H)} + 1076 \cdot V \cdot \frac{0.333}{(D/H)} \cdot \frac{0.333}{(D/H)} + 18745$$

Fonte: Elaboração própria.

A interface do Modelo de Otimização Combinatória foi desenvolvida em linguagem Visual Basic, de maneira a se interligar com o EPANET 2.2 através de um *toolkit* distribuído juntamente com o software pela EPA – Environmental Protection Agency, disponível em: < <https://www.epa.gov/water-research/epanet>>.

A Figura 4 apresenta o fluxograma que descreve os procedimentos executados pelo modelo MOC.

Figura 4 - Fluxograma dos procedimentos executados pelo MOC – Modelo de Otimização Combinatória.



Fonte: Elaboração própria.

As avaliações hidráulicas constituem parte fundamental na avaliação dos valores das funções objetivo. Dessa forma, houve a necessidade de incorporar um simulador hidráulico e de qualidade da água, no caso o EPANET 2.2, à rotina computacional com a finalidade de avaliar as variáveis de estado, como pressões, concentrações do agente desinfetante e vazões nos trechos que compunham o sistema de abastecimento.

Os parâmetros de otimização, os quais serão empregados para se definir as funções objetivos permitem considerar:

- Custo de implantação dos reservatórios;
- Custo de operação, relativo ao consumo de produto químico para desinfecção e de energia elétrica;
- Energia elétrica consumida;
- Pressão Máxima;
- Pressão Mínima;
- Minimização do volume de agente desinfetante;
- Índice de Resiliência de Todini.

O MOC utiliza as variáveis necessárias à formulação da função objetivo que foram agrupadas considerando-se os seguintes aspectos:

- Parâmetros Hidráulicos: layout do sistema, curvas das bombas e variação das demandas;
- Parâmetros Energéticos: tarifa base de energia e padrão de variação do fator temporal;
- Parâmetros Qualitativos: concentração ativa do desinfetante, custo do desinfetante, taxas de decaimento.
- Condições de Contorno: pressões e concentrações de desinfetante limítrofes (máxima e mínima estabelecidas)

Para formulação do problema de otimização, as restrições têm a finalidade de introduzir ao modelo limites hidráulicos e operacionais previamente estabelecidos, de modo que as soluções que tenham esses limites violados sejam identificadas e descartadas. Essas soluções são consideradas inviáveis porque caso fossem consideradas, certamente ocasionariam problemas operacionais.

Após a leitura de todos os parâmetros do sistema de abastecimento e das restrições impostas, inicia-se um processo iterativo entre o algoritmo de otimização combinatória e a ferramenta *toolkit* do EPANET. A cada iteração, as soluções geradas são armazenadas e posteriormente analisadas quanto a(s) função(ões) objetivo(s) estabelecidas a fim de se determinar as soluções não dominadas e estabelecer a Frente de Pareto.

Os resultados são armazenados em um arquivo .TXT.

No APÊNDICE A – Listagem do Modelo de Otimização Combinatória (MOC) é apresentada a listagem do modelo computacional proposto.

4.1.1 Algoritmo Guloso (ou Algoritmo de Prim)

O algoritmo guloso está, em geral, associado a técnicas simples, intuitivas e, quase sempre, fáceis de implementar. Sendo assim, uma das técnicas mais utilizadas no projeto de algoritmos para problemas de otimização combinatória (MIYAZAWA; DE SOUZA, 2015).

Em um problema de minimização, cada elemento possui um custo e sua escolha fornece uma contribuição para a construção de uma solução. Analogamente, em um problema de maximização, cada elemento gera um benefício, porém, consome parte dos recursos disponíveis. A ideia básica do projeto de um algoritmo guloso é, iterativamente selecionar um elemento que melhor contribua para a construção de uma solução, considerando seu custo ou benefício. Elementos cuja escolha não levam a uma solução viável são descartados.

O algoritmo termina quando os elementos selecionados formarem uma solução ou contiverem uma solução, que pode ser extraída de maneira direta.

Segundo Miyazawa e de Souza (2015), a técnica é exemplificada com os problemas da Árvore Geradora de Custo Mínimo, a qual normalmente é empregada em estruturas que envolvem conectividade, como de redes de computadores, de tubulações de saneamento, de telecomunicações etc.

O problema da Árvore Geradora de Custo Mínimo (PAGM), pode ser estabelecido dado grafo¹ conexo, não orientado $G = (V, E)$, cada aresta $e \in E$ com custo c_e , encontrar uma árvore geradora T de G , tal que $\sum(e \in T) \cdot c_e$ é mínimo.

¹ Um grafo $G = (V, E)$ é uma estrutura composta por dois tipos de objetos, os vértices, dado por um conjunto V , e as arestas, dado por um conjunto E tal que $E \subseteq \{\{u, v\}: u, v \in V\}$ e $V \cap E = \emptyset$. Se $G = (V, E)$ e $e = \{u, v\} \in E$ é uma aresta de G , então, u e v são adjacentes entre si e ditas extremidades de e . Neste caso, e é dito incidir em u e em v . (MIYAZAWA e SOUZA, 2015).

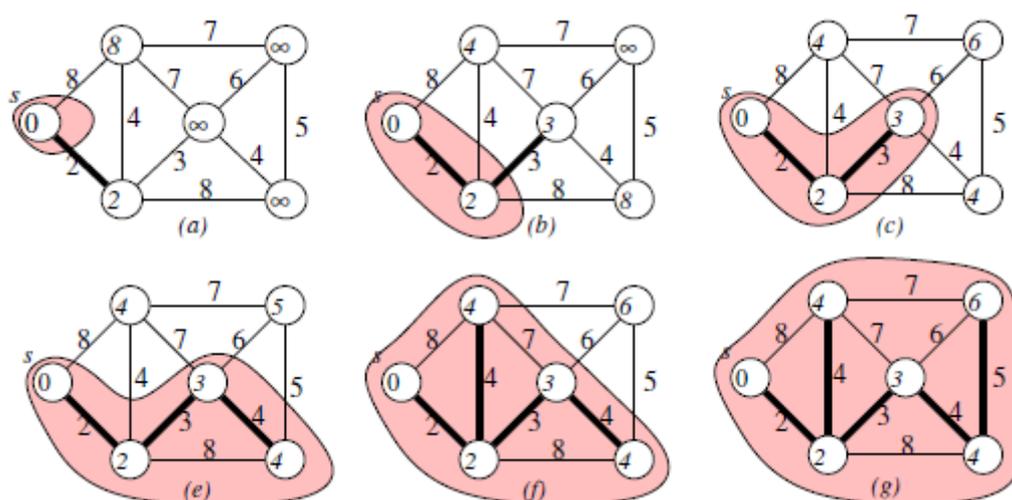
A estratégia usada por este algoritmo, é começar uma árvore a partir de um vértice qualquer e a cada iteração uma aresta é acrescentada, conectando a árvore corrente com um novo vértice.

A escolha de cada aresta é feita utilizando a estratégia gulosa, isto é, dentre as arestas que acrescentam mais um vértice à árvore, é escolhida uma de custo mínimo.

Interpretando o custo de uma aresta como distância, o algoritmo iterativamente anexa um vértice que está mais próximo da árvore. O algoritmo termina quando todos os vértices forem anexados à árvore.

A Figura 5 ilustra a simulação da execução do algoritmo de Prim.

Figura 5 - Fluxograma dos procedimentos executados pelo algoritmo de Prim



Fonte: MIYAZAWA; DE SOUZA, 2015.

O modelo MOC considera que cada vértice representa uma possível solução e com seu custo característico, de maneira que todas as soluções viáveis estejam conectadas entre si. Dessa maneira, o número de vértices possíveis, viáveis ou não, representa o número de permutação (NC), sem repetição, entre o número (n) de variações possíveis para cada reservatório e o número de reservatórios de nível constante (R) existente no sistema de abastecimento analisado, conforme expresso pela Equação 7.

$$NC = n^R$$

Equação 7 – Número de permutação sem repetição

4.1.2 Simulação Hidráulica e de Qualidade da Água

O EPANET 2.2 (ROSSMAN, L. A., 2020) é um programa de domínio público desenvolvido pela United States *Environmental Protection Agency* (USEPA) que permite analisar as redes de distribuição de água em regime permanente, assim como simular a concentração de um determinado traçador, conservativo ou não. Esse pacote computacional é distribuído gratuitamente sob duas formas: executável e código fonte (Toolkit).

A Toolkit é uma biblioteca de vínculo dinâmico (DLL), e consiste em arquivo de bibliotecas compartilhadas em sistemas operacionais Microsoft Windows que contém funções que permitem aos programadores personalizar os algoritmos de análise hidráulica implementados no EPANET, de modo que pode ser incorporado a aplicativos Windows 64 bit, escritos na linguagem C/C++, Delphi Pascal, Visual Basic, ou qualquer linguagem capaz de realizar leitura de um arquivo DLL (ROSSMAN, 2000).

A extensão *toolkit* possibilita a conexão entre algoritmos e rotinas de cálculo utilizadas pelo EPANET, essa vinculação é feita a partir do arquivo *epanet2.dll*, a partir disso, é possível realizar alterações no funcionamento do sistema, obter os valores das variáveis de estado e do custo energético, bem como alterar os parâmetros físicos da rede. Dentre as 54 funções disponíveis pela ferramenta toolkit, foram utilizadas as seguintes:

- *ENopen*: inicia o EPANET por meio da abertura do arquivo (*.inp*). Esse arquivo armazena todas as informações utilizadas pelo simulador hidráulico;
- *ENopenH*: inicia o módulo de análise hidráulica;
- *ENgetcount*: retorna a quantidade de elementos hidráulicos, tais como, a quantidade de nós, trechos, reservatórios.
- *ENgetlinktype*: retorna o tipo do elemento de ligação (tubo, válvula, bomba etc.);
- *ENgetlinkvalue*: obtém o valor para cada elemento de ligação (Ex.: energia consumida por uma bomba, diâmetro de um tubo);

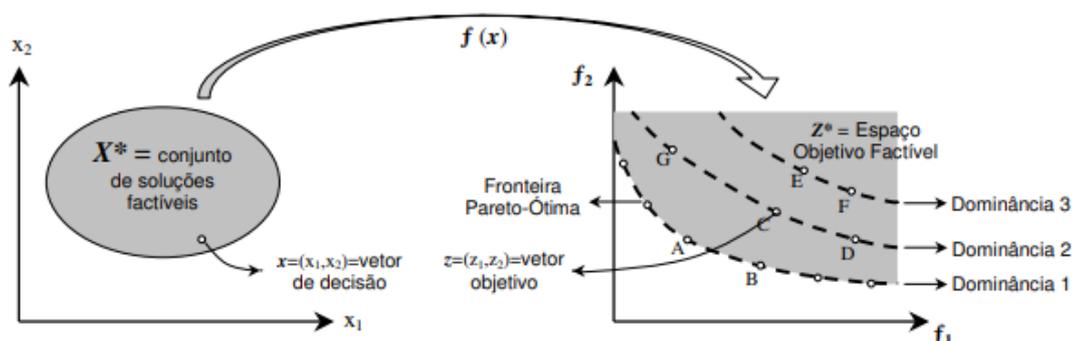
- *ENgetnodevalue*: obtém o valor para cada nó da rede (Ex.: pressões nos nós e níveis dos reservatórios em cada hora);
- *ENgetnodetype*: retorna o tipo do nó (nó com demanda, reservatório de nível variável etc.);
- *ENgetpatternvalue*: obtém o padrão de variação horária (Ex.: variação da tarifa energética);
- *ENsetxxx*: utilizado para modificar os parâmetros de simulação;
- *ENinitH*: inicializa a simulação por meio da inserção das variáveis hidráulicas no sistema;
- *ENinitQ*: inicializa a simulação da qualidade da água no sistema;
- *ENrunH (t)*: executa a simulação hidráulica para um tempo determinado;
- *ENrunQ (t)*: executa a simulação da qualidade da água para um determinado tempo;
- *ENgetxxx*: recupera os resultados;
- *ENnextH*: adianta um passo de tempo na simulação hidráulica;
- *ENcloseH*: fecha o módulo de análise hidráulica;
- *ENcloseQ*: fecha o módulo de análise da qualidade;
- *ENsaveH*: salva os resultados da simulação hidráulica nos arquivos de saída;
- *ENsaveQ*: salva os resultados da simulação de qualidade nos arquivos de saída;
- *ENsolveH*: executa uma simulação hidráulica completa com resultados para todos os períodos escritos no arquivo.
- *ENsolveQ*: executa uma simulação completa da qualidade da água com resultados para todos os períodos escritos no arquivo.
- *ENresetreport*: apaga algum conteúdo pré-existente no relatório;
- *ENsetreport*: define o conteúdo do relatório;
- *ENreport*: gera o arquivo contendo o relatório;
- *ENclose*: fecha o EPANET.

4.1.3 Função Multiobjetivo e Funções Objetivos

Segundo Coelho (1999), o problema de otimização multiobjetivo consiste na obtenção de um conjunto de variáveis (solução) que satisfaça algumas restrições e otimize uma função constituída por diversos termos ou funções objetivo.

A Figura 6 ilustra um conjunto de soluções factíveis, o espaço objetivo factível e o grau de dominância em um problema de minimização com dois objetivos.

Figura 6 - Soluções factíveis, o espaço objetivo factível e o grau de dominância em um problema de minimização com dois objetivos.



Fonte: (HASHIMOTO, 2004).

Na Figura 6 é possível observar que a imagem X^* , denominada Espaço Objetivo Factível, é denotada por $Z^* = \{(f_1(x), f_2(x), \dots, f_z(x)), x \in X^*\}$.

Em um problema de otimização multiobjetivo, quando são considerados objetivos conflitantes, em geral, não existe uma única solução que seja ótima com respeito a todos os objetivos. Nesses casos, a avaliação das soluções factíveis passa, então, pelo conceito de Dominância de Pareto, definido a seguir, conforme Hashimoto (2004).

Dados dois vetores de decisão quaisquer $x, y \in X^*$, há três possibilidades para os seus correspondentes vetores objetivos:

- $f_i(x) \leq f_i(y): \forall i$: diz-se que o vetor objetivo $Z^1 = f(x)$ domina $Z^2 = f(y)$ e que o vetor de decisão x domina y ;

- $f_i(y) \leq f_i(x): \forall i$: diz-se que o vetor objetivo $Z^2 = f(y)$ domina $Z^1 = f(x)$ e que o vetor de decisão y domina x ;
- $f_i(y) \not\leq f_i(x)$ e $f_i(x) \not\leq f_i(y)$: diz-se que o vetor objetivo $Z^1 = f(x)$ é indiferente com o vetor objetivo $Z^2 = f(y)$ e vice-versa, e que o vetor de decisão x é indiferente com y e vice-versa.

A Figura 6 que representa a consideração de dois objetivos, percebe-se que os pontos A e B dominam C, os pontos E e F são dominados por C e os pontos D e G são indiferentes com C.

Assim, segundo Hashimoto (2004), o conjunto de todas as soluções eficientes é denominado Conjunto Eficiente ou Conjunto Pareto-Ótimo. A imagem em Z^* do Conjunto Pareto-ótimo é denominado Fronteira Pareto-ótima.

Um dos processos de otimização multiobjetivo é o mapeamento das soluções factíveis direcionando para as soluções mais eficientes. Neste trabalho foi empregado o método das Somas Ponderadas, conforme Equação 8 proposta por Pantuza Jr. (2011).

$$\text{Min } O_i = \left\{ \sum_{i=1}^r w_i \cdot \left[\frac{f_i(x_{max}) - f_i(x)}{f_i(x_{max}) - f_i(x_{min})} \right]^s \right\}^{\frac{1}{s}}, \text{ com } \sum_{i=1}^r w_i = 1 \quad \text{Equação 8 – Método das Somas Ponderadas}$$

Sendo O_i a função multiobjetivo, f_1 e f_2 os objetivos estabelecidos, $f_i(x_{max})$ e $f_i(x_{min})$ os valores máximo e mínimo de cada objetivo estabelecido, s o número de funções objetivos selecionadas, e w_i o peso de cada objetivo.

Para este trabalho os pesos para cada função objetivo foram considerados iguais, de maneira a se ter $w_i = \frac{1}{s}$.

4.2 Formulação do Problema

A otimização operacional do sistema de abastecimento de água foi abordada como um problema de otimização multiobjetivo, cujas variáveis de

decisão, funções objetivo e ordenamento das soluções, são apresentadas na sequência.

Foram consideradas como variáveis de decisão os custos para implantação dos reservatórios, assim como os custos decorrentes do consumo de energia elétrica, considerando ciclo operacional de 24h.

Para composição dos possíveis cenários de simulação, foram considerados os fatores multiplicativos de 1,00, 1,20, 1,40 e 1,60 aplicado sobre os volumes iniciais de cada reservatório.

Considerando que o sistema de abastecimento analisado possui 6 reservatórios de nível variável (RNV), e que o número de fatores multiplicativos considerados em cada análise (n) foi quatro, o número máximo de combinações possíveis (NC), viáveis e não viáveis, foi de $4^6 = 4096$ combinações.

4.2.1 Composição do Custo de Implantação dos Reservatórios de Nível Variável (RNV)

Para a determinação de uma equação que descrevesse o custo de implantação de um reservatório, foi considerada uma composição de preços a partir da tabela SINAPI do Estado de São Paulo do ano de 2020.

A equação geral de custos para implantação dos reservatórios de nível variável adotada para este trabalho foi desenvolvida considerando uma composição SINAPI para a construção de um reservatório de concreto está representada pela Equação 9.

$$C_R = 2837 \cdot \frac{V^{0,667}}{(D/H)^{0,333}} + 1137 \cdot V^{0,667} \cdot (D/H)^{0,667} + 1076 \cdot V^{0,333} \cdot (D/H)^{0,333} + 18745$$

Equação 9 – Custos de Implantação dos reservatórios em função do volume e da relação diâmetro-altura.

Fonte: Elaboração própria.

Onde C_R é o custo estimado para o reservatório (R\$); V o volume de armazenamento do reservatório (m^3), e D/H a relação entre o diâmetro (m) e a altura do reservatório (m).

Como os volumes simulados variaram ao longo das análises combinatórias, o diâmetro (D) dos reservatórios foi determinado a partir dos volumes de

armazenamento e dos níveis operacionais (máximo e mínimo) estabelecidos na modelagem do sistema de abastecimento de água lançado no EPANET 2.2.

A Equação 10 apresenta o cálculo para determinação da relação D/H empregada nas simulações hidráulicas, que considerou reservatórios no formato cilíndrico.

$$\frac{D}{H} = \frac{\sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{V}{(h_{max} - h_{min})}}}{Cota NA_{max} - Cota Terreno}$$

Equação 10 – Custo de implantação de reservatório em função do volume. Fonte: Elaboração própria.

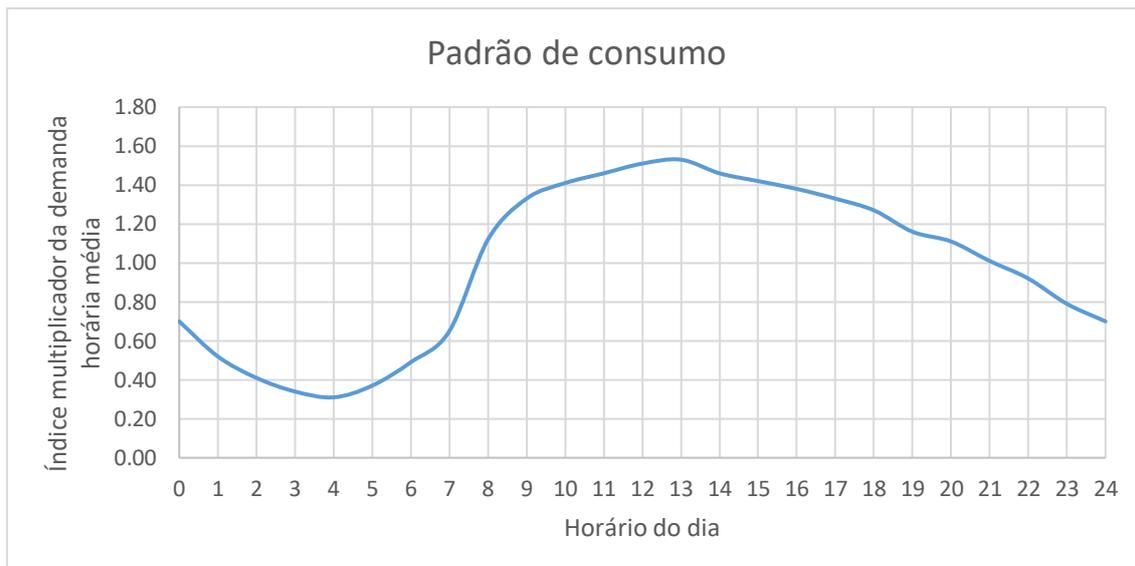
Sendo V o volume reservado para a simulação (m³); h_{max} a altura máxima de água a partir do nível do terreno (m); h_{min} a altura mínima de água a partir do nível do terreno (m)

Como os volumes simulados variaram ao longo das análises combinatórias, o diâmetro (D) dos reservatórios foi determinado a partir dos volumes de armazenamento e dos níveis operacionais (máximo e mínimo) estabelecidos na modelagem do sistema de abastecimento de água lançado no EPANET 2.2.

4.2.2 Variação do consumo de água

As curvas de consumo e perdas adotadas são apresentadas nas Figura 7 e Figura 8, respectivamente.

Figura 7 - Padrão de consumo adotado.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 8 - Padrão de perdas adotado.



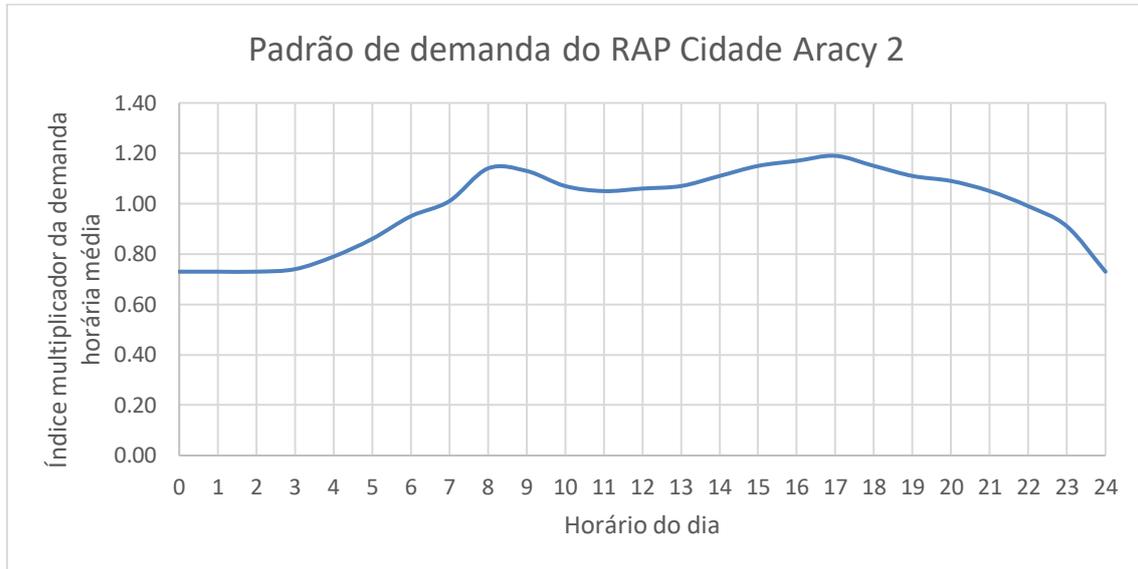
Fonte: Elaboração própria.

É importante salientar que não foram fornecidas informações do padrão de consumo. Portanto, foi adotada uma curva padrão, assemelhando-se a uma curva senoidal, com pico de consumo entre 12h e 13h. A curva de perdas tem comportamento próximo ao inverso da curva de consumo, uma vez que, quanto maior o consumo, menores as pressões nas tubulações, diminuindo potencialmente as perdas de água por vazamento.

Como as zonas de abastecimento dos reservatórios elevado e apoiado (2.650 m³) da Cidade Aracy se misturam, as curvas características foram

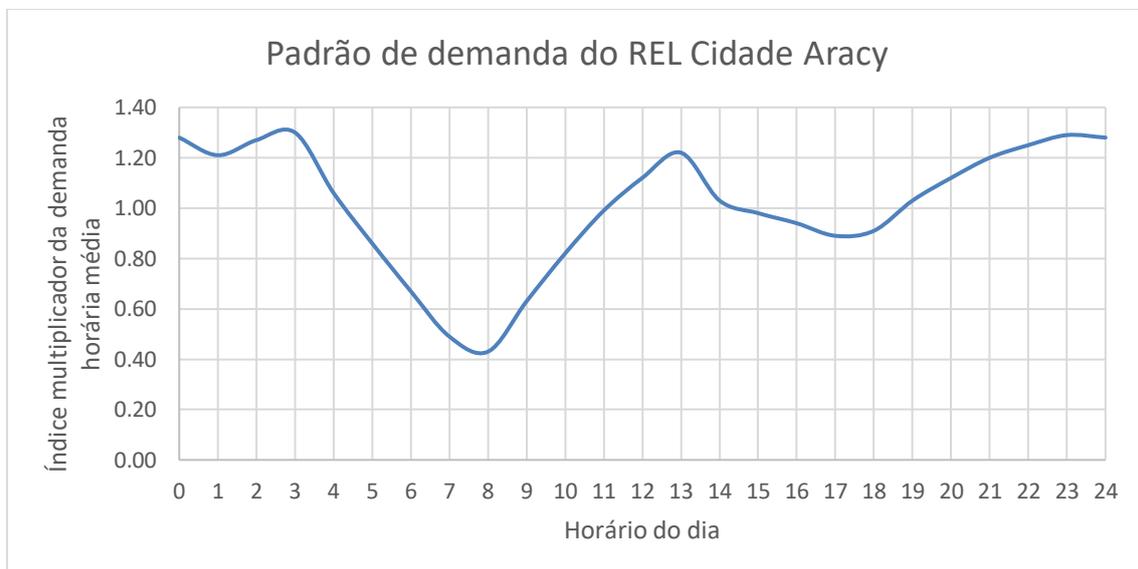
extraídas do resultado da simulação do modelo hidráulico com todas as tubulações, assim como o volume total abastecido por cada reservatório. Seguem as curvas resultantes da simulação e adotadas no modelo simplificado (Figura 9 e Figura 10).

Figura 9 - Padrão de demanda do RAP Cidade Aracy 2.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 10 - Padrão de demanda do REL Cidade Aracy.

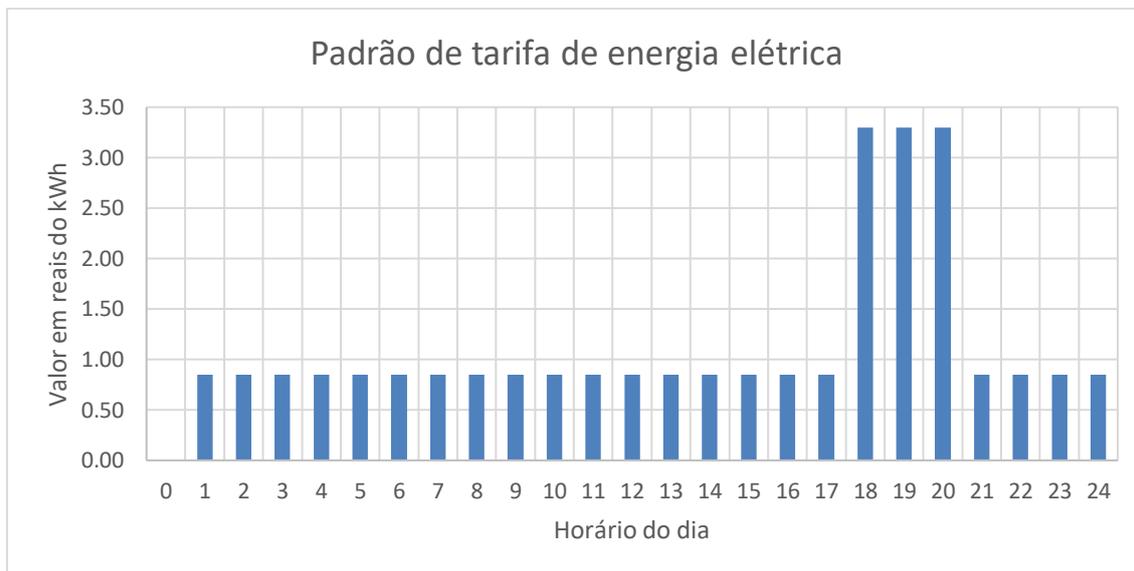


Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 Composição do Custo de Energia Elétrica Consumida

Outro padrão adotado foi da tarifa de energia elétrica, conforme informado pelo SAAE São Carlos (Figura 11).

Figura 11 - Padrão de tarifa de energia elétrica.



Fonte: SAAE São Carlos.

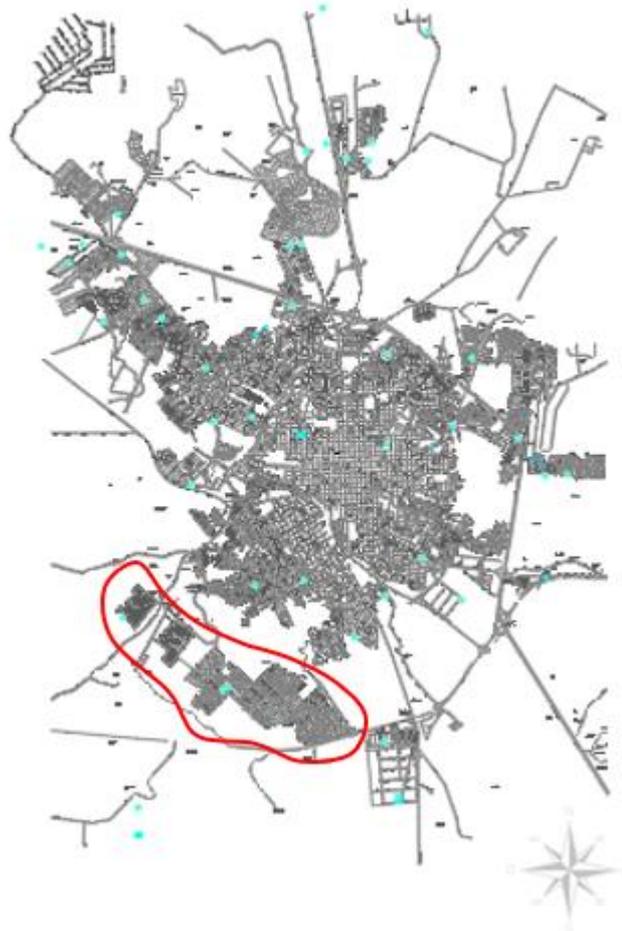
4.3 Modelo hidráulico da rede de distribuição de água

O modelo hidráulico foi construído no software WaterGEMS®. O software foi escolhido devido à presença de ferramentas mais práticas para a inserção de dados como topografia, demanda e controles operacionais. Após a elaboração do modelo físico e as definições operacionais, foi realizada a exportação para o EPANET 2.2 e aplicada a otimização.

4.3.1 Características físicas

O modelo de otimização proposto foi aplicado à rede de distribuição dos setores de abastecimento Abdelnur, Antenor Garcia e Cidade Aracy da cidade de São Carlos. Os setores estão localizados ao sul da cidade, como mostrado na Figura 12.

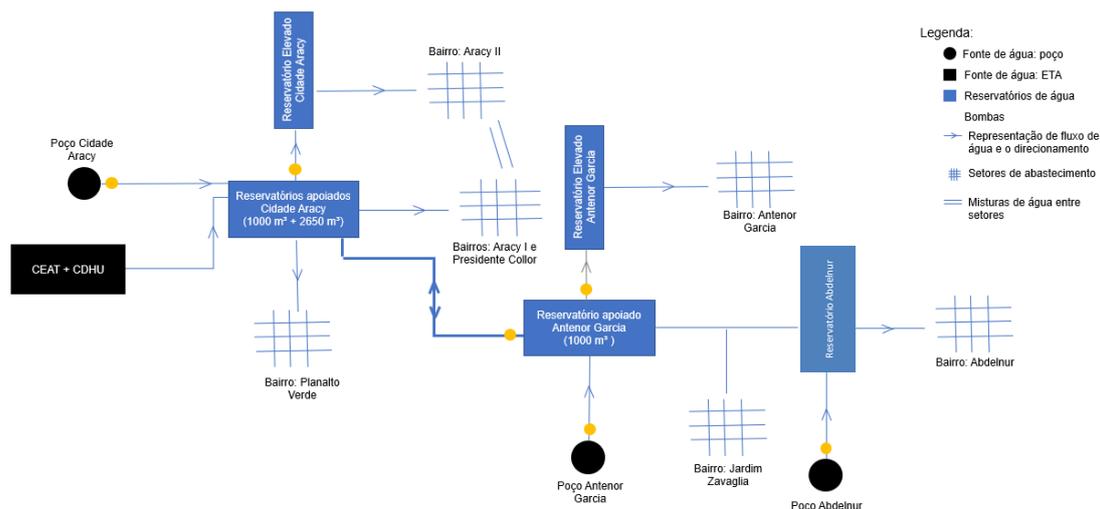
Figura 12 - Localização dos setores de abastecimento simulados.



Fonte: Elaboração própria.

Observando a Figura 12, percebe-se que os setores analisados são, fisicamente, mais isolados dos demais setores de abastecimento da cidade, porém, entre eles, há interligações. A Figura 13 abaixo é uma representação do funcionamento operacional desses sistemas.

Figura 13 - Esquema de abastecimento dos setores Cidade Aracy, Antenor Garcia e Abdelnur.



Fonte: Elaboração própria.

Como esquematizado na Figura 13, o setor de abastecimento Cidade Aracy é abastecido por duas Estações de Tratamento (CEAT e CDHU) e um poço (Poço Cidade Aracy) e possui 3 reservatórios, totalizando 4.010 m³ de reservação. Os reservatórios apoiados são conectados por uma tubulação e uma válvula de controle, sendo essa a única fonte de alimentação do reservatório de 1000 m³ atualmente. Nesse sistema, ocorre a mistura entre a zonas de pressão do reservatório elevado e do reservatório apoiado de 2.650 m³, uma vez que as tubulações dos bairros Cidade Aracy I, Cidade Aracy II e Presidente Collor encontram-se interligadas em diversos pontos. Ainda, existe uma adutora que conecta o reservatório apoiado de 2.650 m³ com o reservatório apoiado do setor de abastecimento Antenor Garcia. Essa adução é um contingenciamento, caso alguns dos setores esteja com deficiência no abastecimento. O cadastro de redes do setor de abastecimento Cidade Aracy indica que há conexões entre as aduções de abastecimento originadas das ETAs e a rede de distribuição. Como no escopo do trabalho não estava prevista a calibração da rede, para fins de simplificação, essas conexões não foram consideradas.

O sistema Antenor Garcia é abastecido por um poço, que alimenta um reservatório apoiado, com capacidade de 1.000 m³. Esse reservatório abastece o bairro Jardim Zavaglia e o reservatório elevado de 400 m³. O reservatório elevado, por sua vez, abastece o bairro Antenor Garcia. A tubulação que abastece o bairro Jardim Zavaglia estende-se até o reservatório do sistema

Abdelnur, podendo ocorrer contingenciamento entre esses sistemas, em ambas as direções. De acordo com o cadastro fornecido pelo SAAE, as redes de distribuição dos bairros abastecidos pelo sistema Antenor Garcia encontram-se isoladas de outras zonas de pressão.

Por fim, o sistema Abdelnur é abastecido por um poço, que alimenta um reservatório elevado de 400 m³. Esse sistema pode contingenciar o Antenor Garcia por meio de bombeamento.

O Quadro 3 abaixo resume as características dos reservatórios dos sistemas supracitados.

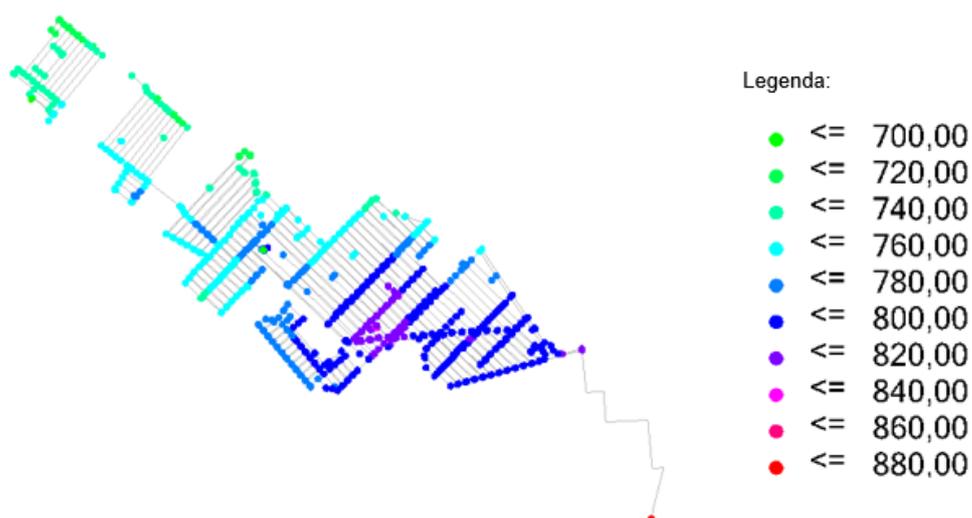
Quadro 3 - Resumo das características dos reservatórios.

Reservatório	Tipo	Volume (m³)	Nível Operacional máximo (m)	Nível Operacional mínimo (m)
Abdelnur	Elevado	600 m ³	763,09	753,00
REL Antenor Garcia	Elevado	400 m ³	790,88	778,83
RAP Antenor Garcia	Apoiado	1000 m ³	783,53	774,83
REL Cidade Aracy	Elevado	360 m ³	833,24	811,58
RAP Cidade Aracy	Apoiado	1000 m ³	830,36	807,58
RAP Cidade Aracy 2	Apoiado	2650 m ³	824,79	807,58

Fonte: Elaboração própria.

Para a inserção da topografia, foi gerada uma nuvem de pontos do cadastro de rede enviado pelo SAAE em formato shapefile, que foi exportada para o site GPS Visualizer (<https://tinyurl.com/gpsvelev>) e, assim, extraídas as elevações. O cadastro enviado pelo SAAE no formato dwg possuía alguns pontos topográficos, mas não era suficiente para cobrir toda a rede. Portanto, essa informação foi utilizada como forma de verificação das elevações exportadas do site supracitado. Após a verificação, concluiu-se que os resultados eram muito próximos e poderiam ser adotados sem prejuízos para os resultados da simulação. A Figura 14 mostra o resultado da topografia de rede.

Figura 14 - Elevações topográficas dos nós da rede de distribuição.



Fonte: Elaboração própria.

4.3.2 Análise de dados e definição das demandas

O SAAE São Carlos forneceu alguns dados de macromedição diários de 2018 a 2021 e os dados de consumo mensal ao longo do ano de 2020. Segue a relação dos dados de macromedição fornecidos no Quadro 4.

Quadro 4 - Relação dos dados de macromedição fornecidos pelo SAAE São Carlos.

Código de identificação SAAE	Ponto de medição
FIR1-44	Saída do Poço Abdelnur
FIR1-27	Saída do Poço Antenor Garcia
FIR2-27	Saída REL Antenor Garcia (Bairro: Antenor Garcia)
FIR3-27	Saída RAP Antenor Garcia (Bairro: Jardim Zavaglia)
FIR4-27	Saída RAP Antenor Garcia (Bairro: Jardim Itatiaia)
FIR1-31	Saída Poço Cidade Aracy
FIR2-31	Saída RAP Cidade Aracy (2.650 m ³) (Bairros: Aracy I e Presidente Collor)
FIR3-31	Saída REL Cidade Aracy
FIR6-31	Entrada CEAT e CDHU para o RAP Cidade Aracy (2.650 m ³)

Fonte: Elaboração própria.

Foram identificados dados dispersantes nos valores originais fornecidos pelo SAAE, além de muitas lacunas. Dessa forma, foi realizado um tratamento

nos dados para identificação de “outliers”, utilizando-se as Equação 11 e Equação 12 para cálculos dos limites inferiores e superiores, respectivamente.

$$L_{inf} = \bar{x} - 1,5 \times (Q3 - Q1)$$

Equação 11 – Limite inferior para identificação de outliers

$$L_{sup} = \bar{x} + 1,5 \times (Q3 - Q1)$$

Equação 12 – Limite superior para identificação de outliers

Em que:

\bar{x} – Média aritmética de todos os valores;

$Q3$ – Terceiro quartil ou quartil superior (separatriz da série ordenada a partir da qual se encontram os 25% valores mais elevados) e

$Q1$ – Primeiro quartil ou quartil inferior (separatriz da série ordenada abaixo da qual se encontram os 25% valores menores).

Considerando que de um ano para outro podem ocorrer ampliações na demanda de um sistema, devido ao aumento populacional ou migração de estabelecimentos comerciais ou industriais para a área, foram calculados os outliers de cada ponto de medição por ano. Na Tabela 1 encontra-se o resumo dos resultados.

Tabela 1 – Limites inferiores e superiores para identificação de outliers nos dados de macromedição

Limites	FIR1-44	FIR1-27	FIR2-27	FIR3-27	FIR4-27	FIR1-31	FIR2-31	FIR3-31	FIR6-31
L_{inf} 2018	131	1.884	1.761	561	75	2.309	1.946	1.994	4.180
L_{sup} 2018	814	2.678	2.301	1.776	162	2.429	3.007	5.184	7.045
L_{inf} 2019	-43	1.935	1.558	78	-	2.332	1.555	-3.804	3.680
L_{sup} 2019	709	2.694	2.392	3.381	-	2.599	3.058	8.046	7.021
L_{inf} 2020	-	1.805	1.295	1.043	81	2.387	2.036	3.087	2.360
L_{sup} 2020	-	2.013	2.165	1.866	218	2.465	3.566	5.002	7.484
L_{inf} 2021	1.321	-	-	-	-	-	-	-	-
L_{sup} 2021	1.413	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria.

No APÊNDICE B encontram-se os gráficos com os dados de cada ponto de medição, a média e os limites superiores e inferiores para identificação dos outliers. Após a exclusão dos outliers, a média das demandas foram recalculadas (Tabela 2).

Tabela 2 – Demanda média medida nos pontos de macromedição

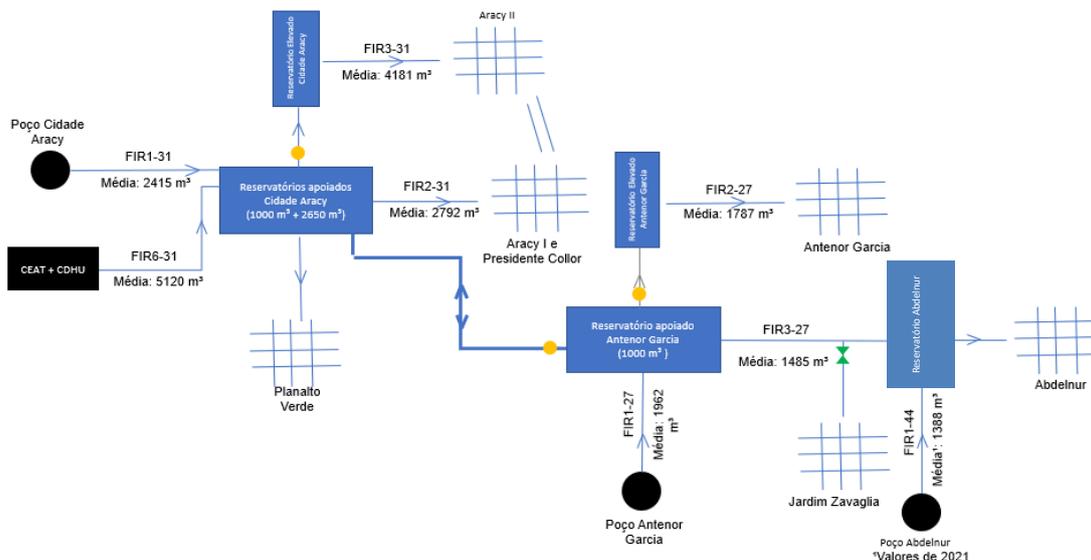
Anos	FIR1-44	FIR1-27	FIR2-27	FIR3-27	FIR4-27	FIR1-31	FIR2-31	FIR3-31	FIR6-31
2018	354	2.316	2.032	955	122	2.409	2.515	4.335	5.632
2019	333	2.271	1.904	1.163		2.420	2.501	2.121	5.442
2020		1.962	1.787	1.485	152	2.415	2.792	4.181	5.120
2021	1.388								

Fonte: Elaboração própria.

Pela Tabela 2, nota-se que os dados do ano de 2020 são os mais completos, com exceção da saída do poço Abdelnur (FIR1-44), que não possui dados nesse ano. Portanto, para esse caso, foi considerada a média do ano de 2021; para os demais pontos, considerou-se a demanda de 2020.

Ao se fazer uma análise crítica dos dados, verificou-se que há incoerências nos dados fornecidos. Pela Figura 15, depreende-se, por exemplo, que a vazão média fornecida pelo poço Antenor Garcia (1.962 m³) é menor que a soma das vazões medidas nas saídas dos reservatórios (3.272 m³). Mesmo os “superávits” nos sistemas Cidade Aracy e Abdelnur não seriam suficientes para abastecer as zonas de pressão correspondentes e contingenciar água para o reservatório Antenor Garcia.

Figura 15 - Esquema do abastecimento da região de estudo indicando as vazões médias macromedidas.



Fonte: Elaboração própria.

Os dados de micromedição fornecidos estavam agrupados por quadra, associada ao bairro. Segue na Tabela 3 o resumo da média de consumo por bairro e o índice K_1 ao longo do ano de 2020.

O índice K_1 (coeficiente do dia de maior consumo) foi calculado conforme estabelecido pela norma técnica brasileira NBR 12211/1992 (ABNT, 1992), sendo a relação entre o maior consumo diário, verificado no período de um ano e o consumo médio diário neste mesmo período, considerando-se sempre as mesmas ligações. Analisando esse índice para o sistema de forma geral, observa-se que não há grandes variações de demanda ao longo do ano, pois em todos os bairros esse índice ficou próximo de 1,1. A única exceção foi o Conjunto Habitacional Residencial Itatiaia, o que pode ser explicado pela ocupação populacional que se iniciou nesse ano nesse bairro.

Tabela 3 – Consumos médios mensais e índice K1 para cada bairro em 2020.

Bairro	Consumo médio (m ³ /mês)	K ₁
Antenor Garcia	11.490	1,10
Cidade Aracy	72.937	1,10
Cidade Aracy II	1.547	1,11
Pres. Collor de Mello	13.306	1,08
Conj. Hab. Residencial Itatiaia	888	1,77
Conj. Hab. Planalto Verde	10.354	1,18
Resid. Dep. José Zavaglia	14.298	1,08
Resid. Eduardo Abdelnur	13.504	1,10
Total Geral	138.323	1,08

Fonte: Elaboração própria.

Considerando as zonas de pressão existentes e as interligações no sistema, foram considerados os consumos diários apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Consumo diário por zona de pressão considerando índice k1

Reservatório(s) de alimentação	Bairros abastecidos	Consumo em m ³ /dia (considerando k1)
RAP Cidade Aracy 2 + REL Cidade Aracy	Cidade Aracy I, Cidade Aracy II e Pres. Collor de Mello	2892,1
RAP Antenor Garcia	Resid. Dep. José Zavaglia e Conj. Hab. Residencial Itatiaia	504,3
Abdelnur	Resid. Eduardo Abdelnur	447,7
REL Antenor Garcia	Antenor Garcia	377,5
RAP Cidade Aracy (1.000 m ³)	Conj. Hab. Planalto Verde	337,7

Fonte: Elaboração própria.

A próxima etapa para definição das demandas finais foi o cálculo do volume e do índice de perdas. As perdas de água nos sistemas de abastecimento correspondem à diferença entre o volume total de água produzido nas estações de tratamento e poços e a soma

dos volumes medidos nos hidrômetros instalados nos imóveis dos clientes. Portanto, o volume de perdas e índice de perdas na distribuição foram calculados pelas Equação 13 e Equação 14.

$$Q_p = Q_T - Q_c \quad \text{Equação 13 – Volume de perdas de água}$$

Em que:

Q_p – Volume de perdas de água na distribuição;

Q_T – Volume total produzido nas ETAs e poços (volume macromedido) e

Q_c – Volume total médio medidos nos hidrômetros (volume micromedido).

$$I_p = \frac{Q_T - Q_c}{Q_T} \quad \text{Equação 14 – Índice de perdas de água na distribuição}$$

Seguem os resultados obtidos para o sistema em estudo na Tabela 5.

Tabela 5 – Demandas diárias dos setores de abastecimento em estudo

Bairros	Consumo médio diário (m ³)	Consumo máximo diário - k1 (m ³)	Volume diário médio de perdas (m ³)	Demanda total diária (m ³)	Índice de perdas (%)
Cidade Aracy I, Cidade Aracy II e Pres. Collor de Mello	2629,2	2892,1	4344,1	7236,2	62%
Resid. Dep. José Zavaglia e Conj. Hab. Residencial Itatiaia	458,5	504,3	1026,9	1531,2	69%
Resid. Eduardo Abdelnur	407,0	447,7	981,4	1429,1	71%
Antenor Garcia	343,2	377,5	1444,1	1821,6	81%
Conj. Hab. Planalto Verde	307,0	337,7	507,2	844,9	62%

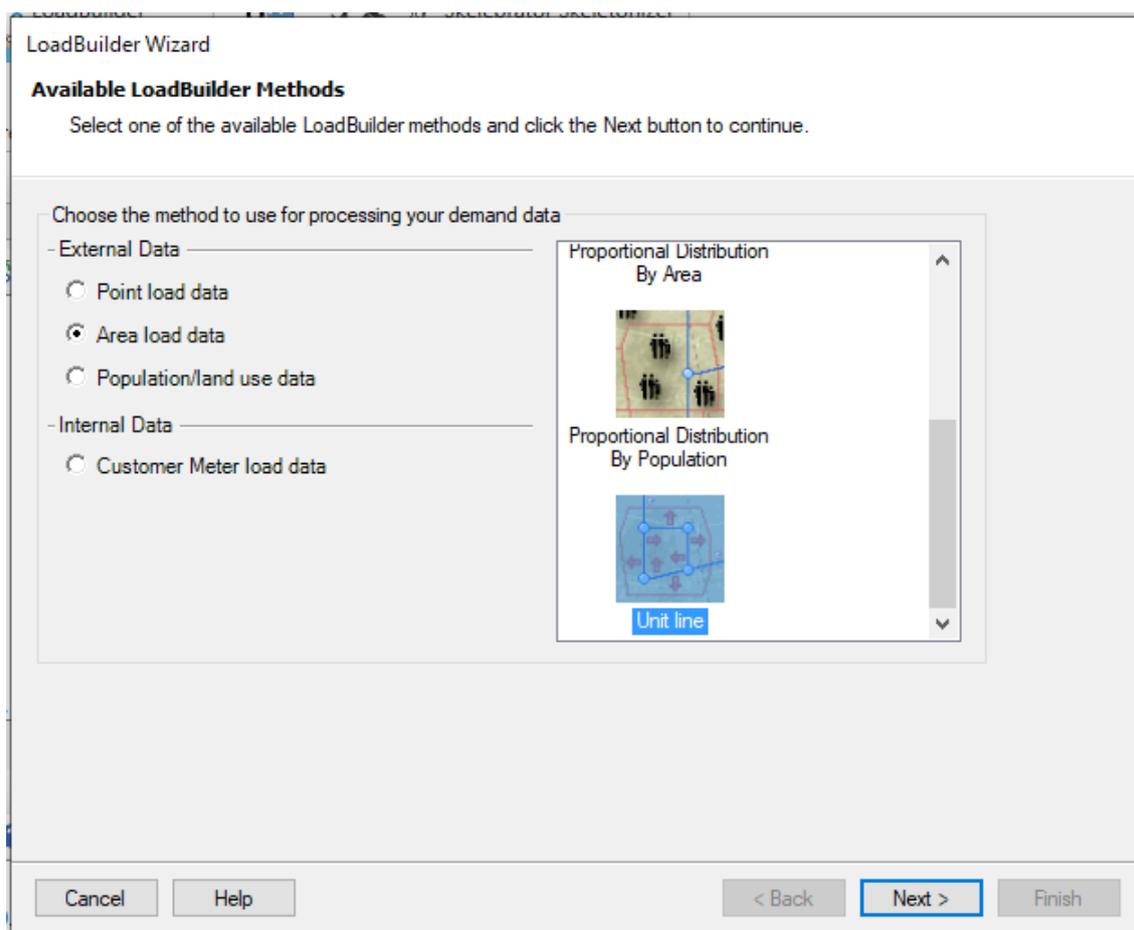
Fonte: Elaboração própria.

Uma premissa adotada para a definição dos valores da Tabela 5 foi que o volume macromedido na saída do poço Abdelnur abasteceu somente o bairro residencial Eduardo Abdelnur, não sendo utilizado para contingenciamento, uma

vez que não havia informações sobre o volume transferido para o sistema Antenor Garcia.

Após a definição das demandas, essas foram inseridas no modelo hidráulico utilizando-se a ferramenta “LoadBuilder”, considerando distribuição por área (bairros) proporcionalmente ao comprimento das tubulações (“unit line”), como apresentado na Figura 16.

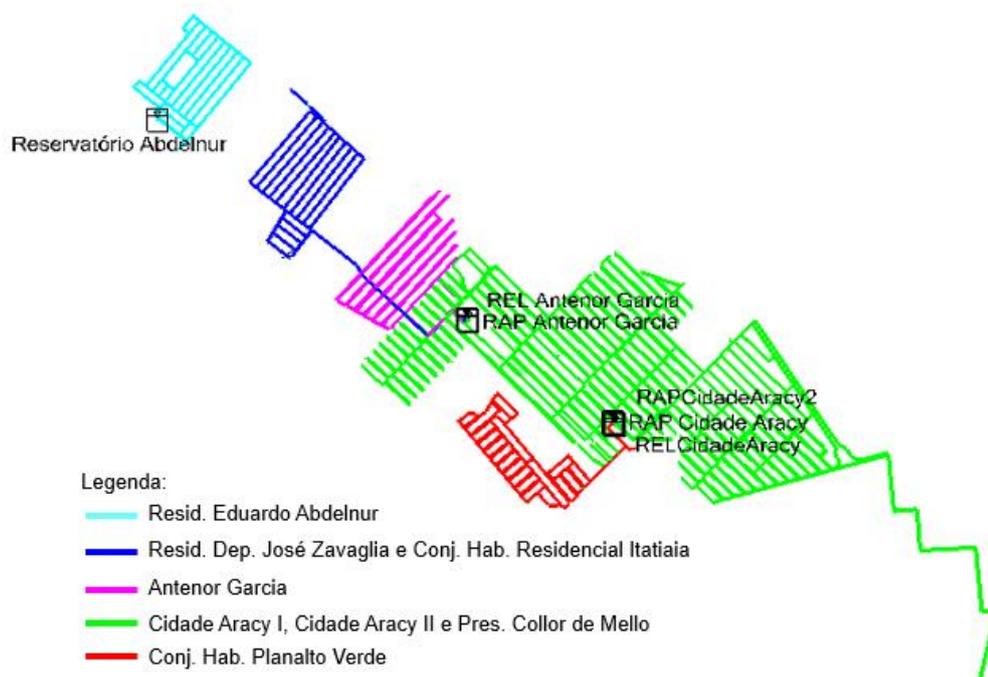
Figura 16 - Metodologia de distribuição de demandas no software WaterGEMS®.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 17 são apresentadas as áreas de distribuição das demandas no modelo hidráulico, de acordo com os valores indicados na Tabela 5.

Figura 17 - Áreas de distribuição das demandas no modelo hidráulico.



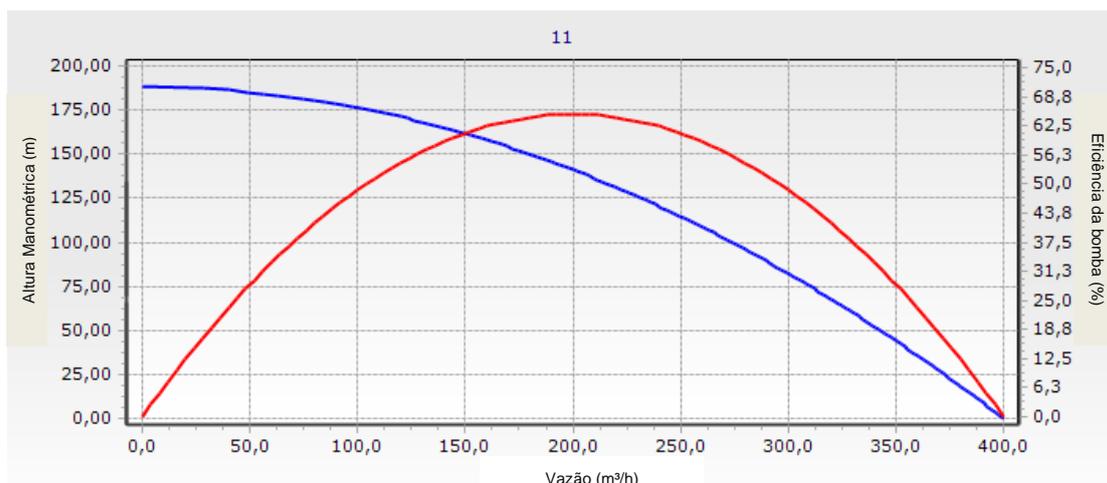
Fonte: Elaboração própria.

Após a inserção das demandas, verificou-se que todo o sistema estava sendo abastecido (sem pressões negativas) ao longo de 24 horas. Após essa verificação, o sistema foi simplificado, mantendo-se apenas as tubulações principais, a fim de diminuir o esforço computacional do modelo de otimização.

4.3.3 Curvas características das bombas

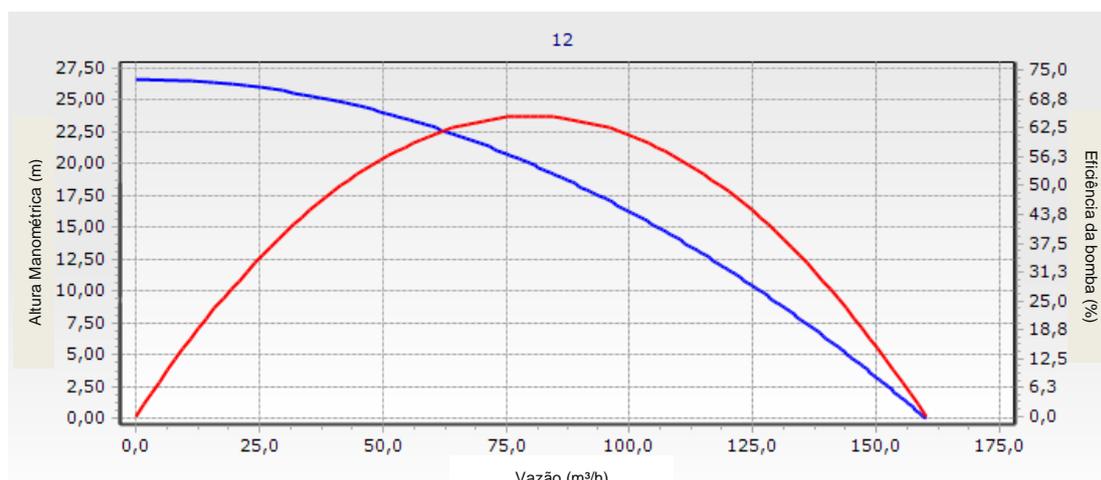
A seguir são apresentadas as curvas características dos bombeamentos (Figura 18 a Figura 23). As características das bombas instaladas também não foram fornecidas pelo SAAE São Carlos. Portanto, foram adotados pontos de funcionamento condizentes com a necessidade apontada pelo modelo e eficiência máxima de 65%.

Figura 18 - Curva característica da bomba do Poço Abdelnur.



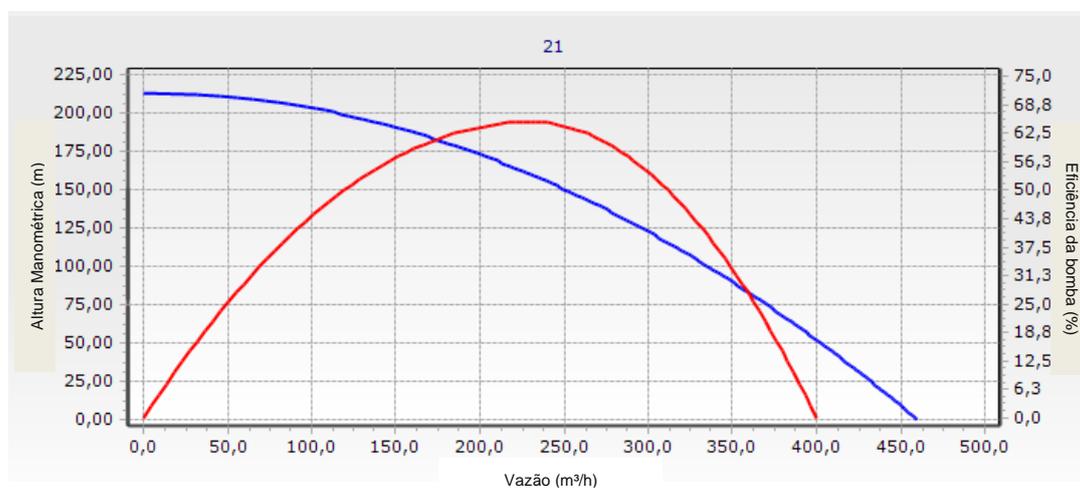
Fonte: Curva gerada pelo software WaterGEMS® a partir do ponto de operação definido.

Figura 19 - Curva característica da bomba de contingenciamento do Reservatório Abdelnur para o RAP Antenor Garcia.



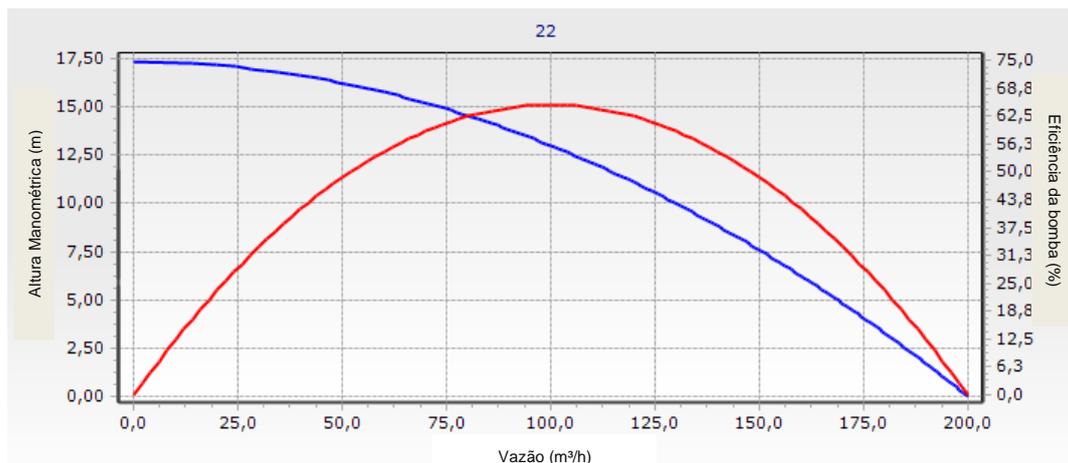
Fonte: Curva gerada pelo software WaterGEMS® a partir do ponto de operação definido.

Figura 20 - Curva característica da bomba do Poço Antenor Garcia.



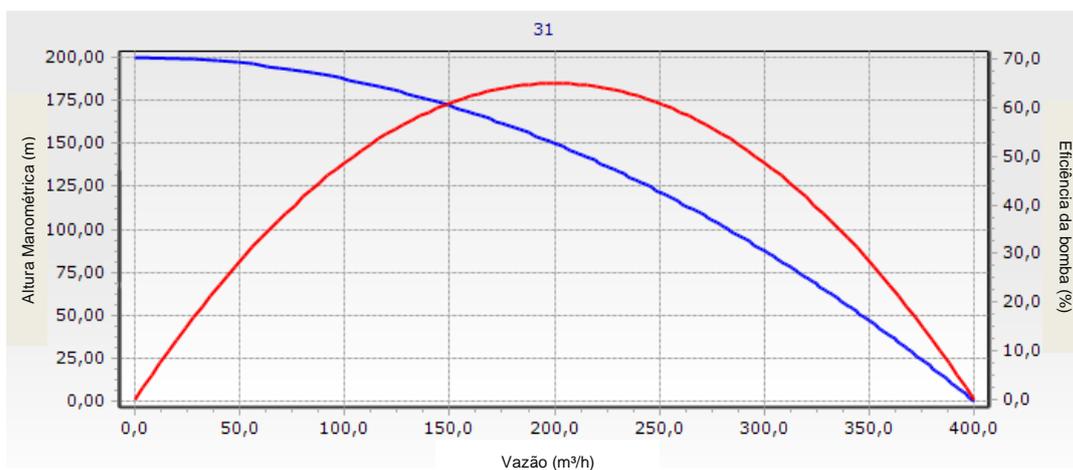
Fonte: Curva gerada pelo software WaterGEMS® a partir do ponto de operação definido.

Figura 21 - Curva característica da bomba de alimentação do REL Antenor Garcia.



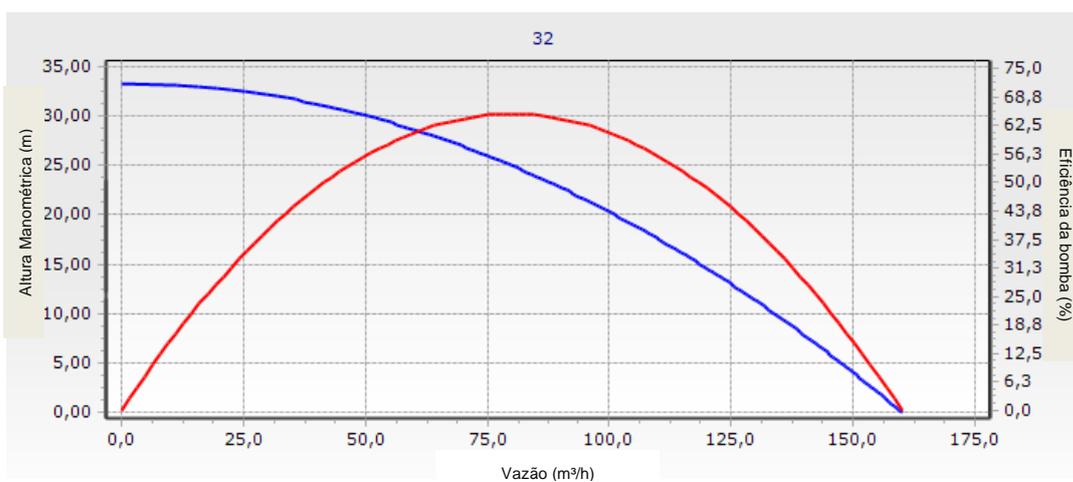
Fonte: Curva gerada pelo software WaterGEMS® a partir do ponto de operação definido.

Figura 22 - Curva característica da bomba do Poço Cidade Aracy.



Fonte: Curva gerada pelo software WaterGEMS® a partir do ponto de operação definido.

Figura 23 - Curva característica da bomba de alimentação do REL Cidade Aracy.



Fonte: Curva gerada pelo software WaterGEMS® a partir do ponto de operação definido.

4.3.4 Controles operacionais

Os controles operacionais inseridos no modelo hidráulico tiveram como objetivo controlar os níveis dos reservatórios. Além disso, foram estabelecidos dois cenários. No primeiro cenário, os sistemas trabalharam de forma isolada (sem contingenciamento). No segundo, foi simulado um contingenciamento do setor Abdelnur para o Antenor Garcia e do Cidade Aracy para o Antenor Garcia. Nos Quadro 5 e Quadro 6 são apresentados os controles operacionais adotados.

Quadro 5 - Controles Operacionais no cenário em que os sistemas operam isoladamente.

Condição	Ação
Percentual de cheio do Reservatório Abdelnur $\leq 40,0$ %	Status Bomba 11 = On
Percentual de cheio Reservatório Abdelnur $\geq 90,0$ %	Status Bomba 11 = Off
Percentual de cheio RAP Antenor Garcia $\leq 20,0$ %	Status Bomba 21 = On
Percentual de cheio RAP Antenor Garcia $\geq 90,0$ %	Status Bomba 21 = Off
Percentual de cheio REL Antenor Garcia $\leq 20,0$ %	Status Bomba 22 = On
Percentual de cheio REL Antenor Garcia $\geq 90,0$ %	Status Bomba 22 = Off
Percentual de cheio REL Cidade Aracy $\geq 90,0$ %	Status Bomba 32 = Off
Percentual de cheio REL Cidade Aracy $\leq 20,0$ %	Status Bomba 32 = On
Percentual de cheio RAPCidadeAracy2 $\leq 50,0$ %	Status Bomba 31 = On
Percentual de cheio RAPCidadeAracy2 $\geq 90,0$ %	Status Bomba 31 = Off
Percentual de cheio RAPCidadeAracy2 $\leq 50,0$ %	Válvula FCV CEAT - Cidade Aracy = 250,0 m ³ /h
Percentual de cheio RAPCidadeAracy2 $\geq 90,0$ %	Válvula FCV CEAT - Cidade Aracy = 0,0 m ³ /h

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 6 - Controles Operacionais adicionados no cenário em que os sistemas operam com contingenciamento.

Condição	Ação
Percentual de cheio RAP Antenor Garcia \geq 90,0 %	Válvula FCV-3 = Fechada
Percentual de cheio RAP Antenor Garcia \leq 20,0 %	Válvula FCV-3 = Aberta
Horário = 10:00	Status Bomba 12 = On
Horário = 21:00	Status Bomba12 = Off

Fonte: Elaboração própria.

4.4 Análise comparativa dos resultados

A fim de se comparar os resultados obtidos nas simulações, foram calculadas as variações percentuais em relação ao custo operacional com energia elétrica e ao investimento para implantação dos reservatórios, de acordo com fórmula matemática amplamente conhecida.

$$i = \frac{V_{final} - V_{inicial}}{V_{inicial}} \times 100$$

Equação 15 - Cálculo da variação percentual entre os custos operacionais e custo de implantação dos reservatórios

Em que:

i é a variação percentual;

V_{final} é o valor do custo operacional ou custo de implantação do reservatório da solução otimizada no cenário simulado;

$V_{inicial}$ é o valor do custo operacional ou custo de implantação do reservatório na solução implantada atualmente.

Por fim, para verificar a compensação financeira do superávit no custo com implantação dos reservatórios, foi realizado o cálculo demonstrado na Equação 16.

$$RI = \frac{(CO_{final} - CO_{inicial}) \times 365}{CI_{final} - CI_{inicial}} \times 100$$

Equação 16 – Retorno do superávit do investimento na implantação dos reservatórios em relação à solução implantada

Em que:

CO_{final} é o custo operacional com energia elétrica da solução otimizada no cenário simulado;

$CO_{inicial}$ é o custo operacional com energia elétrica na solução implantada atualmente;

CI_{final} é o custo com implantação do reservatório na solução otimizada no cenário simulado;

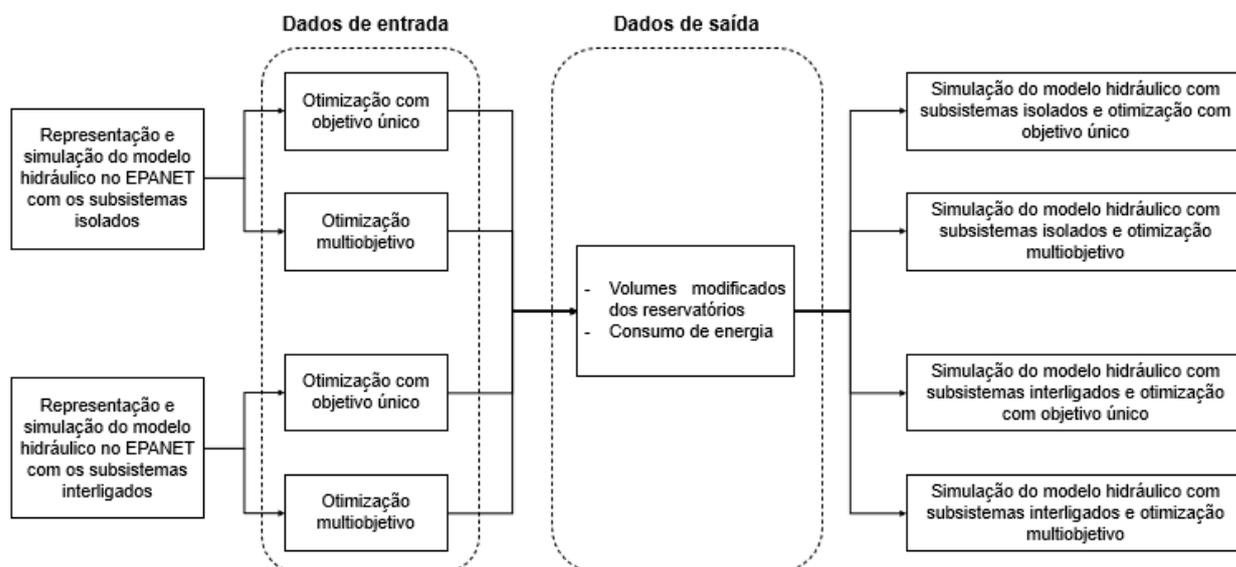
$CI_{inicial}$ é o custo com implantação do reservatório na solução otimizada no cenário simulado;

Com esse índice é possível estimar em quanto tempo a economia de energia das simulações otimizadas suplantariam o valor investido a mais na implantação dos reservatórios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados das otimizações combinatórias e as simulações dos modelos hidráulicos aplicando as soluções otimizadas. Dado que o sistema de abastecimento estudado possui 3 subsistemas de armazenamento-bombeamento e estes podem operar de forma independente ou interligada (quando ocorre contingenciamento), foram realizadas análises para esses dois cenários. Na Figura 24, apresenta-se um fluxograma das simulações e análises feitas para melhor acompanhamento do leitor dos resultados apresentados.

Figura 24 - Fluxograma das simulações e análises realizadas.



Fonte: Elaboração própria.

5.1 Otimização considerando os sistemas isolados

As simulações com objetivo único e multiobjetivo do modelo hidráulico operando com os sistemas isoladamente resultaram na mesma solução otimizada e, por isso, as análises foram unificadas. Nesses cenários, foram alterados os volumes do reservatório Abdelnur e do reservatório apoiado Antenor Garcia. No caso do reservatório Abdelnur, o volume na solução ótima foi de 1.069 m³, o que representa um aumento de 78% no volume implantado (600 m³).

Já para o RAP Antenor Garcia, a solução otimizada apresentou um volume de 1274 m³, isto é, 27% de aumento em relação ao volume implantado (1.000 m³).

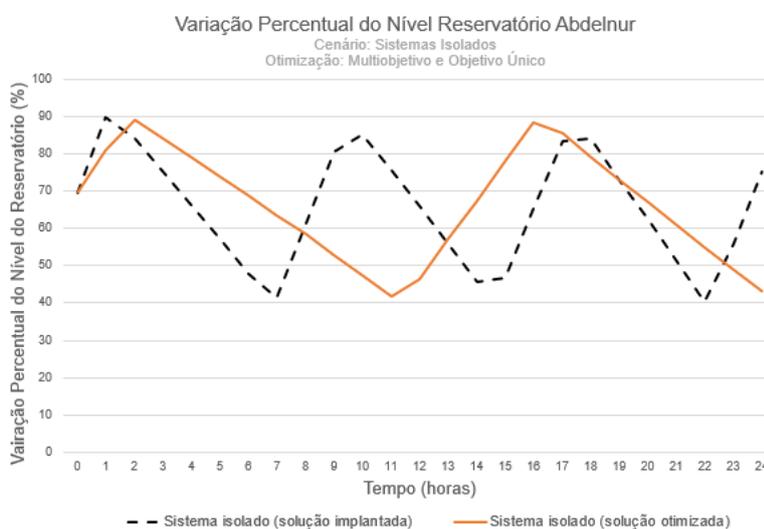
Como foi adotada a premissa de altura fixa, os diâmetros foram alterados para se alcançar esses volumes. Assim, os diâmetros dos reservatórios Abdelnur e RAP Antenor Garcia apresentaram um aumento de 33% e 13% respectivamente.

Em termos de custo operacional, essa solução apresentou um custo com energia elétrica de R\$ 5.054,1 ao dia, o que significa uma economia de 11,2% em relação ao custo calculado na simulação hidráulica da solução implantada.

Por fim, para a implantação da solução otimizada seria necessário um investimento de R\$ 2.864.971,00, ou seja, um investimento 7,3% maior em relação à solução implantada.

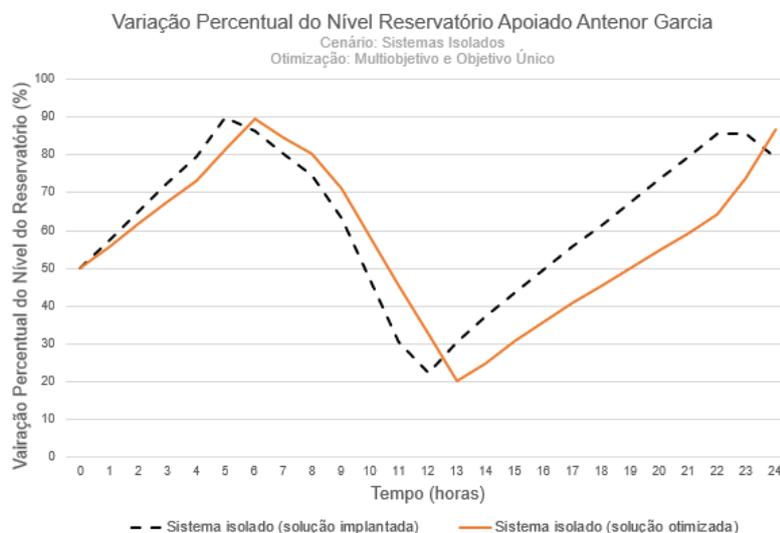
Nas Figura 25 e Figura 26 são apresentadas as variações percentuais dos níveis dos reservatórios que tiveram os seus volumes alterados.

Figura 25 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Abdelnur entre a solução implantada e a solução otimizada para o cenário de sistemas isolados.



Fonte: Elaboração própria.

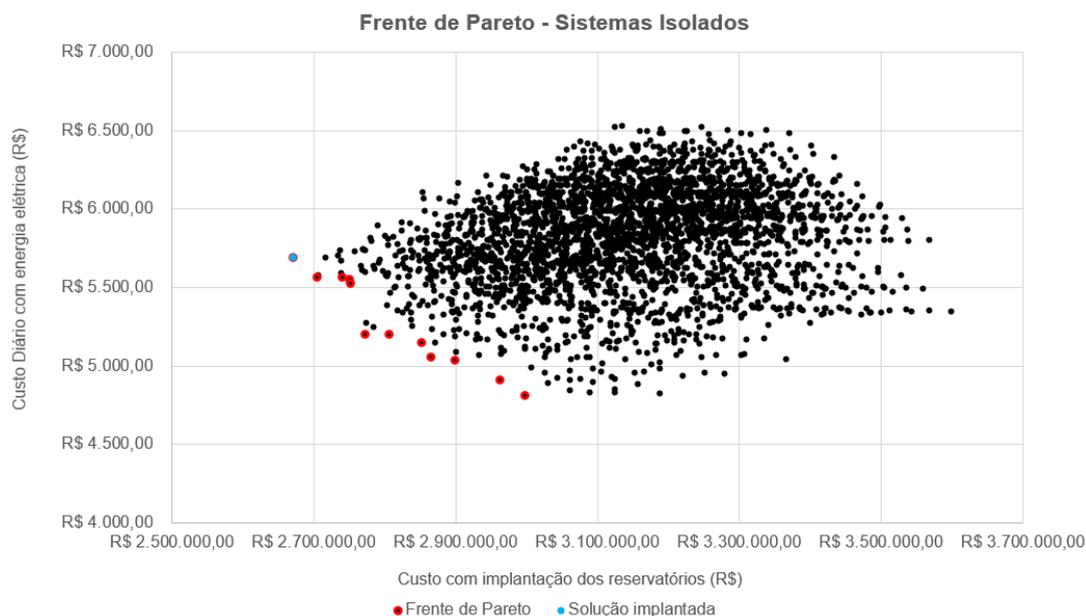
Figura 26 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Apoiado Antenor Garcia entre a solução implantada e a solução otimizada para o cenário de sistemas isolados.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 27 observa-se a Frente de Pareto (soluções não-dominadas), resultantes da simulação multiobjetivo.

Figura 27 - Frente de Pareto da otimização multiobjetivo com os sistemas operando isoladamente.



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se na Figura 27 que a solução implantada é uma das soluções da frente de Pareto, pois o custo de implantação é o menor, uma vez que foram analisados operacionalmente apenas volumes maiores que os reais.

5.2 Otimização para minimização dos custos de energia considerando os sistemas interligados

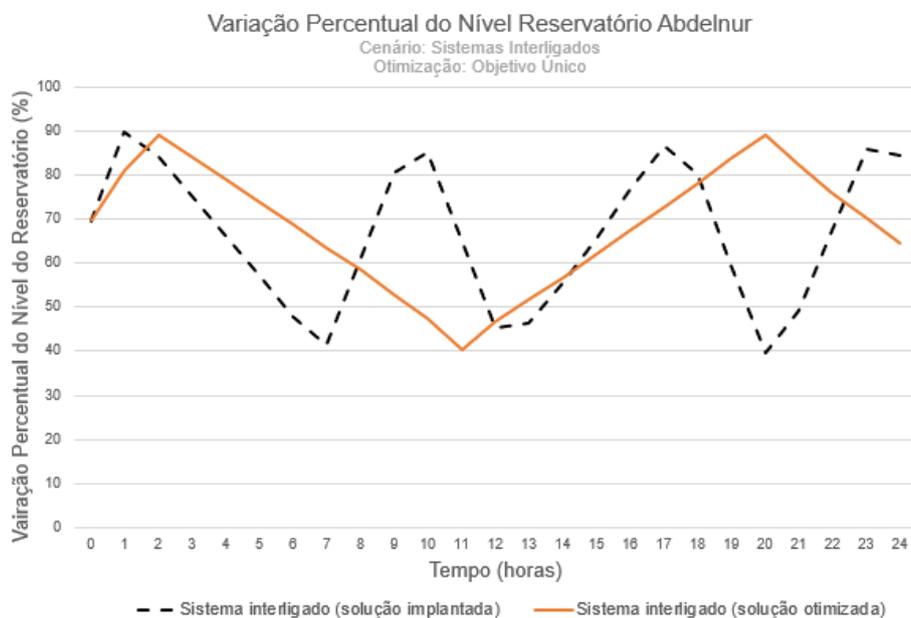
Na otimização com objetivo único (minimização dos custos com energia elétrica) e com os sistemas operando de forma interligada (Reservatório Abdelnur e Reservatório Apoiado Cidade Aracy (2) contingenciando o Reservatório Antenor Garcia), foram alterados os volumes do reservatório Abdelnur, do reservatório elevado Cidade Aracy e do reservatório apoiado Cidade Aracy (2). No caso do reservatório Abdelnur, o volume na solução ótima foi de 1.069 m³, o que representa um aumento de 78% no volume implantado (600 m³). Para o reservatório elevado Cidade Aracy, a solução otimizada apresentou um volume de 458 m³, isto é, 27% de aumento em relação ao volume implantado (360 m³). Já para o reservatório apoiado cidade Aracy (2), a solução otimizada apresentou um volume de 3.373 m³, o que representa um aumento também de 27% no volume implantado.

Como foi adotada a premissa de altura fixa, os diâmetros foram alterados para se alcançar esses volumes. Assim, os diâmetros dos reservatórios Abdelnur, REL Cidade Aracy e RAP Cidade Aracy (2) apresentaram um aumento de 33%, 13% e 13% respectivamente.

Em termos de custo operacional, essa solução apresentou um custo com energia elétrica de R\$ 4.509,2 ao dia, o que significa uma economia de 4,0% em relação ao custo calculado na simulação hidráulica da solução implantada. Por fim, para a implantação da solução otimizada seria necessário um investimento de R\$ 2.952.223,00, ou seja, 10,6% maior em relação à solução implantada.

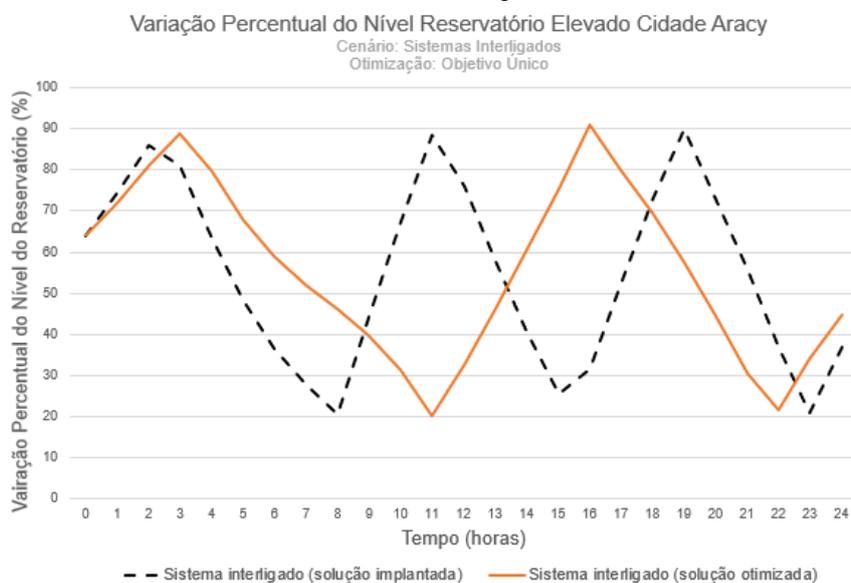
Nas Figura 28, Figura 29 e Figura 30 são apresentadas as variações percentuais dos níveis dos reservatórios que tiveram os seus volumes alterados.

Figura 28 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Abdelnur entre a solução implantada e a solução otimizada de objetivo único para o cenário de sistemas interligados.



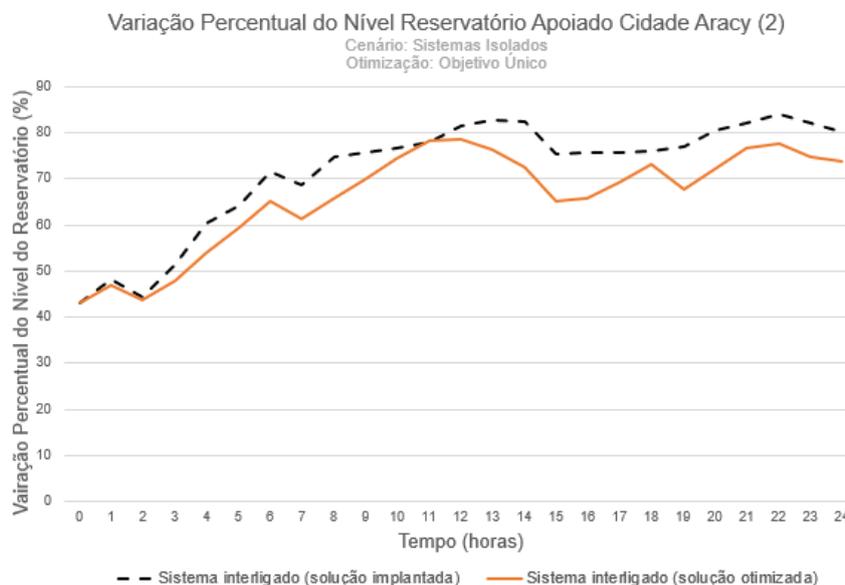
Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Elevado Cidade Aracy entre a solução implantada e a solução otimizada de objetivo único para o cenário de sistemas interligados.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Apoiado Cidade Aracy (2) entre a solução implantada e a solução otimizada de objetivo único para o cenário de sistemas interligados.



Fonte: Elaboração própria.

5.3 Otimização para minimização dos custos de energia e de implantação considerando os sistemas interligados

Na otimização multiobjetivo (minimização dos custos com energia elétrica e dos custos de implantação) e com os sistemas operando de forma interligada (Reservatório Abdelnur e Reservatório Apoiado Cidade Aracy (2) contingenciando o Reservatório Apoiado Antenor Garcia), foram alterados os volumes do reservatório Abdelnur e do reservatório elevado Cidade Aracy. Nesse cenário, o volume na solução ótima de ambos os reservatórios resultou em um aumento de 27% em relação ao volume implantado atualmente, o que levou a capacidades de 764 m³ e 458 m³ para o reservatório Abdelnur (600 m³) e para elevado Cidade Aracy (360 m³), respectivamente.

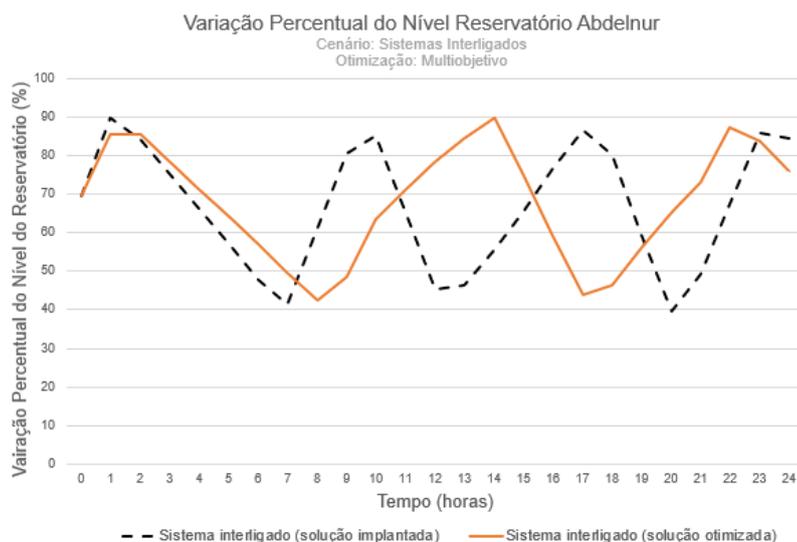
Como foi adotada a premissa de altura fixa, os diâmetros foram alterados para se alcançar esses volumes. Assim, os diâmetros de ambos os reservatórios apresentaram um aumento de 13%.

Em termos de custo operacional, essa solução apresentou um custo com energia elétrica de R\$ 4.581,3 ao dia, o que significa uma economia de 2,5% em relação ao custo calculado na simulação hidráulica da solução implantada. Por

fim, para a implantação da solução otimizada seria necessário um investimento de R\$ 2.751.299,00, ou seja, 3% maior em relação à solução implantada.

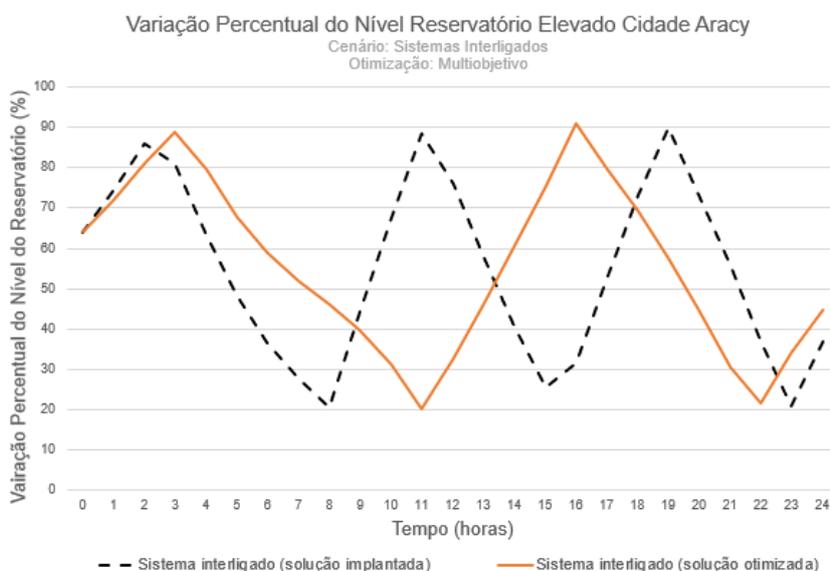
Nas Figura 31 e Figura 32 são apresentadas as variações percentuais dos níveis dos reservatórios que tiveram os seus volumes alterados.

Figura 31 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Abdelnur entre a solução implantada e a solução otimizada multiobjetivo para o cenário de sistemas interligados.



Fonte: Elaboração própria.

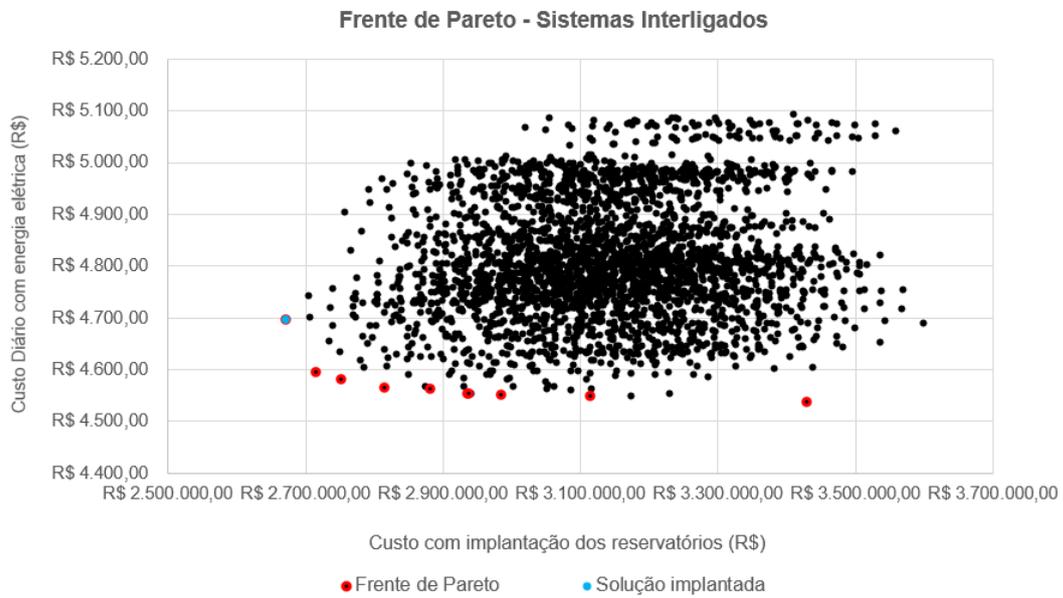
Figura 32 - Comparação das variações percentuais do nível do Reservatório Elevado Cidade Aracy entre a solução implantada e a solução otimizada multiobjetivo para o cenário de sistemas interligados.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 33 observa-se a Frente de Pareto (soluções não-dominadas), resultantes da simulação multiobjetivo.

Figura 33 - Frente de Pareto da otimização multiobjetivo com os sistemas operando de forma interligada.



Fonte: Elaboração própria.

5.4 Discussões

Analisando os resultados obtidos, observa-se que, em todas as simulações, o volume do reservatório Abdelnur foi alterado na solução otimizada em relação à solução implantada. Mesmo com as incertezas inerentes aos modelos hidráulicos, pode-se inferir que há fortes indícios que um reservatório maior nesse sistema melhoraria a operação.

Outra análise que pode ser feita é o fato de o reservatório RAP Antenor Garcia ter tido o seu volume alterado nas soluções otimizadas apenas nos cenários em que os sistemas foram considerados isolados. Isso ocorreu, provavelmente, pois no cenário em que ocorre contingenciamento entre os sistemas, o reservatório Abdelnur absorve parte da demanda do RAP Antenor Garcia, abastecendo o bairro Jardim Zavaglia.

Por outro lado, o reservatório apoiado Cidade Aracy (2) só sofreu modificação na solução otimizada com objetivo único de minimização de custos operacionais no cenário em que os sistemas operam interligados. Isso deveu-se, provavelmente, por ser o maior reservatório e, portanto, impactar negativamente no objetivo de minimização do custo de implantação. Ademais, no cenário de contingenciamento, ele também alimenta o reservatório apoiado Antenor Garcia, além de atender às demandas do próprio sistema.

A Tabela 6 resume os valores de capacidade dos reservatórios resultantes de cada simulação e a Tabela 7 apresenta os aumentos relativos dos volumes dos reservatórios.

Tabela 6 – Resumo dos volumes calculados pelo modelo de otimização nos diferentes cenários.

Reservatórios	Volumes implantados (m ³)	Volumes calculados pelo modelo de otimização			
		Cenário: Sistemas interligados		Cenário: Sistemas isolados	
		Função objetivo: minimização dos custos de energia	Função objetivo: minimização dos custos de energia e dos custos de implantação	Função objetivo: minimização dos custos de energia	Funções objetivo: minimização dos custos de energia e dos custos de implantação
REL Abdelnur	600	1069	764	1069	1069
REL Antenor Garcia	400	407	407	407	407
RAP Antenor Garcia	1000	1019	1019	1274	1274
REL Cidade Aracy	360	458	458	367	367
RAP Cidade Aracy	1000	1020	1020	1020	1020
RAP Cidade Aracy (2)	2650	3373	2699	2699	2699

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 – Resumo dos aumentos relativos de volumes calculados pelo modelo de otimização nos diferentes cenários.

Reservatórios	Volumes implantados (m ³)	Aumento de volume em relação ao volume implantado			
		Cenário: Sistemas interligados		Cenário: Sistemas isolados	
		Função objetivo: minimização dos custos de energia	Função objetivo: minimização dos custos de energia e dos custos de implantação	Função objetivo: minimização dos custos de energia	Funções objetivo: minimização dos custos de energia e dos custos de implantação
REL Abdelnur	600	78%	27%	78%	78%
REL Antenor Garcia	400	2%	2%	2%	2%
RAP Antenor Garcia	1000	2%	2%	27%	27%
REL Cidade Aracy	360	27%	27%	2%	2%
RAP Cidade Aracy	1000	2%	2%	2%	2%
RAP Cidade Aracy (2)	2650	27%	2%	2%	2%

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 8 resume os valores das variáveis otimizadas no modelo e compara com a solução implantada atualmente.

Tabela 8 - Comparação do custo de energia e do custo de implantação dos reservatórios para os cenários simulados com a solução implantada.

Variáveis de otimização	Cenário: Sistemas interligados			Cenário: Sistemas isolados		
	Solução implantada	Função objetivo: minimização dos custos de energia	Função objetivo: minimização dos custos de energia e dos custos de implantação	Solução implantada	Função objetivo: minimização dos custos de energia	Funções objetivo: minimização dos custos de energia e dos custos de implantação
Custo com energia (R\$/dia)	4697,1	4509,2	4581,3	5692,1	5054,1	5054,1
Variação do custo de energia em relação à solução implantada (%)	-	-4,0%	-2,5%	-	-11,2%	-11,2%
Custo de Implantação Reservatórios (R\$)	R\$ 2.670.458,00	R\$ 2.952.223,00	R\$ 2.751.299,00	R\$ 2.670.458,00	R\$ 2.864.971,00	R\$ 2.864.971,00
Variação do custo de implantação em relação à solução implantada	-	+10,6%	+3,0%	-	+7,3%	+7,3%

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 9 resume os valores de RI, conforme Equação 16.

Tabela 9 – Resultados do retorno do superávit do investimento na implantação dos reservatórios em relação à solução implantada

	Cenário: Sistemas interligados		Cenário: Sistemas isolados	
	Função objetivo: minimização dos custos de energia	Função objetivo: minimização dos custos de energia e dos custos de implantação	Função objetivo: minimização dos custos de energia	Funções objetivo: minimização dos custos de energia e dos custos de implantação
Economia de energia anual (R\$)	R\$ 68.575,53	R\$ 42.246,56	R\$ 232.885,33	R\$ 232.885,33
Superávit do investimento na implantação dos reservatórios em relação à solução implantada (R\$)	R\$ 281.765,00	R\$ 80.841,00	R\$ 194.513,00	R\$ 194.513,00
Retorno do superávit do investimento na implantação dos reservatórios em relação à solução implantada (R\$)	24,3%	52,3%	119,7%	119,7%

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 9 demonstra que, dentro de um ano, no cenário dos sistemas isolados, o investimento que seria realizado a mais na implantação dos reservatórios seria compensado pela economia de energia, com excesso de quase 20%. Mesmo no cenário em que a compensação financeira é menor (RI = 24,3%), esperar-se-ia que a economia de energia compensasse o custo a mais na implantação do reservatório no período entre 4 e 5 anos.

6 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi desenvolvido um modelo computacional para simulações com objetivo único de minimização do custo de energia e multiobjetivo analisando os custos com implantação dos reservatórios e os custos operacionais com energia elétrica. Ao manter apenas a variação do diâmetro dos reservatórios (e, conseqüentemente, a capacidade de armazenamento), mantendo altura, níveis e localização como premissas fixas, foi possível identificar como a decisão dessa variável pode impactar nos custos operacionais dos sistemas.

O sistema de abastecimento analisado possuía ainda alguns desafios. Um deles é que, operacionalmente, é um sistema complexo, devido à possibilidade de contingenciamento entre eles, em diferentes direções, e à existência no sistema real de interligações entre as aduções e a rede de distribuição e entre diferentes zonas de pressão distintas. Outra questão que adiciona complexidade ao sistema são as incertezas em relação aos dados fornecidos, como já discutido no capítulo 4.

Pelos resultados obtidos, dadas as condições de contorno adotadas e os objetivos analisados, pode-se inferir que, alterar os volumes implantados pode ser financeiramente muito vantajoso. A simulação em que o custo de implantação foi maior resultou em um índice RI de 24,3%.

Entretanto, frisa-se que a análise apenas financeira não contempla a avaliação que deve ser feita em redes de abastecimento de água, devendo ser analisadas também a qualidade da água e a resiliência do sistema.

No estudo realizado por Nyirenda e Tanyomboh (2018), eles compararam os custos com tubulação, energia e implantação dos reservatórios aplicando duas metodologias distintas. Em uma das metodologias (Penalty-Free Multi-objective Evolutionary Algorithm – PF-MOEA), levou-se em consideração um critério adicional de depleção do reservatório, que foi utilizado explicitamente para melhorar a qualidade nos tanques. Isso é alcançado escolhendo a localização, o tamanho e a forma corretos, forçando o tanque a esvaziar e encher

a cada 24 horas, potencialmente diminuindo a idade da água e promovendo uma mistura adequada. Já a segunda metodologia (Fuzzy Multi-objective Optimisation – FMO) verificou apenas a capacidade da solução otimizada atender aos requisitos hidráulicos. A Tabela 10 resume os resultados em termos de custos.

Tabela 10 – Comparação de custos entre as soluções PF-MOEA e FMO

Método de otimização	Custos (Milhões de \$)			
	Tubulações	Energia	Reservatório	Total
PF-MOEA	3,68	6,22	0,51	10,41
FMO	3,78	6,15	0,61	10,54

Fonte: Adaptado de Nyirenda e Tanymboh (2018)

Apesar de apresentar um custo energético maior, a solução PF-MOEA apresentou um custo total menor. Além disso, nas análises da qualidade da água, verificou-se que a solução FMO resulta na concentração do cloro igual a zero ao final do dia, em um dos reservatórios.

Nos casos simulados, com exceção do reservatório Cidade Aracy (2), todos os demais esvaziam e enchem ao longo do dia. Portanto, para esse reservatório em particular, seria ainda mais importante a análise da qualidade da água, inclusive podendo-se estender a simulação para um período maior que 24h.

Por fim, aponta-se que um dos maiores ganhos desse trabalho foi o desenvolvimento de um modelo de otimização (MOC), que possui a possibilidade de analisar tanto indicadores financeiros, quanto indicadores de qualidade da água e índice de resiliência. Ainda que as simulações realizadas tenham considerado apenas objetivos financeiros, essas suscitam uma discussão sobre a modificação de um elemento da rede, o reservatório de distribuição de água tratada, que raramente é considerado pelos tomadores de decisão para otimizar o sistema, uma vez que, geralmente, as modificações propostas focalizam, primeiramente, mudanças nas características das tubulações e do bombeamento.

Em um sistema de abastecimento de água, dentro de um contexto realístico, dificilmente chega-se a uma solução ótima, devido principalmente às diversas perspectivas sob as quais as redes podem e devem ser analisadas. Contudo, é importante que os operadores ambicionem sempre a otimização operacional como forma de oferecer um serviço de maior qualidade e eficiente na utilização dos recursos para possibilitar mais investimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEGRE, H. et al. **Performance indicators for water supply services**. 2. ed. London: International Water Association - IWA, 2006.

ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. **Water Resources Research**, 1977. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR013i006p00885>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR013i006p00885>. Acesso em: 03 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12211**: Estudos de Concepção de sistemas públicos de abastecimento de água - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12217**: Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ATKINSON, S. et al. Reliability Indicators for Water Distribution System Design: Comparison. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 2, p. 160–168, 2014.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de Hidráulica**. 8a ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 1998.

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**, v. 57, n. 3–4, p. 873–886, 2013.

BATCHABANI, E.; FUAMBA, M. Optimal Tank Design in Water Distribution Networks: Review of Literature and Perspectives. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 2, p. 136–145, fev. 2014.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010**. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em: <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=112868>. Acesso em: 04 abr. 2022.

COELHO, C. A. C. An updated survey of ga-based multiobjective optimization techniques: state of the art and future trends. **CEC**, v. 1, p. 3–13, 1999.

FARMANI, R., SAVIC, D. A., AND WALTERS, G. A. The Simultaneous multi-objective Optimization of Anytown Pipe Rehabilitation , Tank Sizing , Tank Siting and Pump Operation Schedules Resilience Index for Reliability Analysis of Water Systems. **World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management**, p. 1–10, 2004.

FARMANI, R.; WALTERS, G. A.; SAVIC, D. A. Trade-off between total cost and reliability for anytown water distribution network. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, n. 3, p. 161–171, 2005.

FARMANI, R.; WALTERS, G. A.; SAVIC, D. Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: Total cost vs. reliability vs. water quality. **Journal of Hydroinformatics**, v. 8, n. 3, p. 165–179, 2006.

HASHIMOTO, K. **Técnicas de otimização combinatória multiobjetivo aplicadas na estimação do desempenho elétrico de redes de distribuição**. 2004. Tese (Doutorado em Sistemas de Potência) – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2004.

LÓPEZ RIVAS, J., & GUERRERO ERAZO, J. Estimation of precision in the micro- measurement of the water supply system in Pereira. **Entre Ciencia E Ingeniería**, 7(14), 72-76. Disponível em: <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/619>. Acesso em: 01 de jul de 2022.

JAYARAM, N; SRINIVASAN, K. Performance- based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing. **Water resources research**, v. 44, n. 1, 2008.

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Optimal sampling design methodologies for water distribution model calibration. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 131, n. 3, p. 190–200, 2005.

KELIHER; HUDSON; KEARNS. Design and construction of service reservoirs and water towers. **International Water Supply Association (IWSA)**, n. 3rd Congress, 1955.

MALA-JETMAROVA, H.; BARTON, A.; BAGIROV, A. A history of Water distribution systems and their optimisation. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 15, n. 2, p. 224–235, 2015.

MIYAZAWA, F. K.; DE SOUZA, C. C. Introdução à Otimização Combinatória, Jornadas de Atualização em Informática. **Congresso da Sociedade Brasileira de Computação - JAI-SBC**, 2015.

MURPHY, L. J.; DANDY, G. C. Optimum Design and Operation of Pumped Water Distribution Systems. **Conference on Hydraulics in Civil Engineering The Institution of Engineers**, Australia Brisbane, Australia, 1994.

NEUMANN, L. G. et al. Otimização combinatória empregando algoritmo genético aplicada na análise multivariada de medicamentos manipulados. **XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção**. Florianópolis. n. 2003, p. 3175–3182, 2004.

NYIRENDA, MERCY; TANYIMBOH, TIKU. Service Reservoir Design in Water Distribution Network Optimization Models: Water Quality Concerns. **Conference: International Conference on Sustainable Sanitation, Waste and Water Management, 20-23 November 2018**, Cape Town, South Africa.

ORSINI, E.Q.; RESENDE, T. C. Capacidade de Reservatórios de Distribuição com Base em Curvas de Consumo. **Revista DAE**, v. 75, 1969.

OSTFELD, A. Optimal design and operation of multiquality networks under unsteady conditions. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, n. April, p. 116–124, 2005.

PANTUZA JR., G. **Métodos de otimização multiobjetivo e de simulação aplicados ao problema de planejamento operacional em lavra em minas a céu aberto**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

PRASAD, T. D. Design of Anytown network with improved tank sizing methodology. **Proceedings of the Combined International Conference of Computing and Control for the Water Industry CCWI2007 and Sustainable Urban Water Management SUWM2007**, p. 391–396, 2007.

PRASAD, T. D. Design of Pumped Water Distribution Networks with Storage. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 1, p. 129–132, 2010.

PRASAD, T. D.; PARK, N.-S. Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 1, p. 73–82, 2004.

REGO, A. A. DE C. Integração de Ferramentas SIG para a Otimização de Sistema Adutor com Recurso ao EPANET. 2007.

ROSSMAN, L. A. **EPANET programmer's Toolkit Manual**. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, v. Cincinnati, 2000.

ROSSMAN, L. A., ET AL. **EPANET2.2. Users Manual**. U.S. Environmental Protection Agency – EPA, v. Cincinnati, 2020.

SNIS. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto. Brasil, 2018. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico_AE2018.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SOLER, E. M. et al. Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água. **Production**, v. 26, n. 2, p. 385–401, 2015.

TANYIMBOH, T.; TAHAR, B.; TEMPLEMAN, A. Pressure-driven modelling of water distribution systems. **Compute**, v. 1, n. 1988, p. 255–261, 2003.

TODINI, E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. **Urban water**, v. 2, n. 2, p. 115-122, 2000.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 2a ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

TSUTIYA, M. T. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. 1a ed. São Paulo: **ABES**, 2001.

VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Tank Simulation for the Optimization of Water Distribution Networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 133, n. 6, p. 625–636, 2007.

VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L. S.; WALTERS, G. A.; SAVIC, D. A. Fuzzy Multiobjective Optimization of Water Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, n. 6, p. 467–476, 2005.

van Zyl, J. E., Piller, O., and le Gat, Y. (2008b). “Critical parameters for the reliability of municipal storage tanks.” **World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua’a, May 12, 2008–May 16, 2008**, ASCE, Reston, VA.

WALSKI, T. M. Hydraulic Design Of Water Distribution Storage Tanks. **Water distribution systems handbook**, L. Mays, ed., 10.11–10.20.

Walski, T. The wrong paradigm - Why water distribution optimization doesn't work. **Journal of Water Resources Planning and Management**. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:4\(203\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:4(203)). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282001%29127%3A4%28203%29>. Acesso em: 04 abr. 2022.

WALTERS, G. A. et al. Improved design of “Anytown” distribution network using structured messy genetic algorithms. **Urban Water**, v. 1, n. 1, p. 23–38, 1999.

WLAMIR, R. C. **Crítérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água**. p. 234, 2007.

WU, Z. Y. et al. Optimizing water system improvement for a growing community. **Proceedings of the 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2005: Water Management for the 21st Century**, v. 2, p. 99, 2005.

APÊNDICE A – Listagem do Modelo de Otimização Combinatória (MOC)



Listagem-MOC.pdf

APÊNDICE B – Gráficos dos dados de macromedição com a identificação dos limites superiores e inferiores para determinação de outliers

