

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

PEDRO HENRIQUE LEITE DE LIMA

**OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS ADUTORES COMPLEXOS
COM MÚLTIPLAS FONTES DE ÁGUA E RESERVATÓRIOS DE
DISTRIBUIÇÃO**

CARUARU – PE

2023

PEDRO HENRIQUE LEITE DE LIMA

**OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS ADUTORES COMPLEXOS
COM MÚLTIPLAS FONTES DE ÁGUA E RESERVATÓRIOS DE
DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste, para a obtenção do título de Mestre e Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Recursos Naturais e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra.

Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.

CARUARU – PE

2023

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Lima, Pedro Henrique Leite de.

Otimização operacional de sistemas adutores complexos com múltiplas fontes de água e reservatórios de distribuição / Pedro Henrique Leite de Lima. - Caruaru, 2024.

69f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2024.

Orientação: Saulo de Tarso Marques Bezerra.

Coorientação: Artur Paiva Coutinho.

Inclui referências.

1. Otimização operacional; 2. Gerenciamento hídrico; 3. Eficiência energética. I. Bezerra, Saulo de Tarso Marques. II. Coutinho, Artur Paiva. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

AGREDECIMENTOS

A realização desse trabalho contou com a colaboração e o apoio de diversas pessoas e instituições, às quais expresso minha profunda gratidão.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra, pela orientação, paciência e pelas valiosas contribuições ao longo de todo o processo. Também sou grato ao coorientador, Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.

Aos meus professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), agradeço pelo compartilhamento de conhecimentos e pelo ambiente colaborativo que sempre me incentivou a crescer academicamente.

Agradeço à Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) pela colaboração e pelo suporte técnico fornecido, essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação, direta ou indiretamente. A todos, meu muito obrigado.

RESUMO

Atualmente, devido ao crescimento populacional, urbanização acelerada, industrialização e mudanças climáticas há uma crescente demanda por água, exigindo que as companhias de saneamento implantem captações cada vez mais distantes e sistemas adutores compostos de várias estações elevatórias. Sistemas adutores podem possuir uma grande quantidade de combinações de ciclos operacionais, tornando as tomadas de decisões complexas. Tradicionalmente, o processo operacional é decidido com base no conhecimento prévio dos operadores, resultando em operações ineficientes do ponto de vista energético. Essa é hoje a realidade de quase todos os sistemas públicos de abastecimento de água no Brasil. Posto isso, esse trabalho desenvolveu um modelo computacional de apoio aos processos operacionais, visando definir o melhor ciclo operacional diário (regra operacional) para sistemas adutores reais e complexos, com o objetivo de minimizar os gastos energéticos. A metodologia aplicada utiliza um algoritmo genético de estratégia evolutiva (*Evolution Strategy*, ES) e o simulador hidráulico EPANET. O ES se diferencia dos algoritmos genéticos clássicos ao focar em mutações e seleção de indivíduos, em vez de cruzamentos. O modelo foi aplicado à Rede Baghmalek, cujos resultados foram similares aos da literatura, e ao Sistema Botafogo, um sistema complexo responsável por parte do abastecimento da Região Metropolitana de Recife, Nordeste do Brasil. O modelo desenvolvido tem potencial para melhorar o desempenho de sistemas de bombeamento de água em diversas aplicações práticas.

Palavras chaves: otimização operacional; gerenciamento hídrico; eficiência energética; algoritmo genético.

ABSTRACT

Currently, due to population growth, accelerated urbanization, industrialization, and climate change, there is a growing demand for water, requiring sanitation companies to implement increasingly distant intakes and adductor systems composed of multiple pumping stations. Adductor systems can have a large number of operational cycle combinations, making decision-making complex. Traditionally, the operational process is decided based on the operators' prior knowledge, resulting in energy-inefficient operations. This is the reality for almost all public water supply systems in Brazil today. Therefore, this work developed a computational model to support operational processes, aiming to define the best daily operational cycle (operational rule) for real and complex adductor systems, with the objective of minimizing energy costs. The methodology applied uses an Evolution Strategy (ES) genetic algorithm and the EPANET hydraulic simulator. ES differs from classic genetic algorithms by focusing on mutations and individual selection rather than crossovers. The model was applied to the Baghmalek Network, whose results were similar to those in the literature, and to the Botafogo System, a complex system responsible for part of the supply to the Metropolitan Region of Recife, Northeast Brazil. The developed model has the potential to improve the performance of water pumping systems in various practical applications.

Keywords: Operational optimization; Water management; Energy efficiency; Genetic algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um cromossomo.....	22
Figura 2 – Método do cruzamento por ponto único.	23
Figura 3 – Método do cruzamento uniforme.....	24
Figura 4 – Processo de funcionamento do algoritmo genético.....	25
Figura 5 – Esquema da Rede Baghmalek.....	26
Figura 6 – Padrão de consumo de água.	27
Figura 7 – Etapas do modelo de otimização proposto.....	36
Figura 8 – Transferência de energia do conjunto motor-bomba.	37
Figura 9 – Evolução e convergência da Rede Baghmalek para o primeiro cenário.	46
Figura 10 – Ciclo operacional da Rede Baghmalek.	47
Figura 11 – Ciclo operacional obtido pelo modelo proposto.	48
Figura 12 – Comparação dos resultados do Cenário 1 - pressão mínima nos nós da rede.	50
Figura 13 – Evolução e convergência do fitness da Rede Baghmalek para o Cenário 2.	50
Figura 14 – Ciclo operacional da Rede Baghmalek.	51
Figura 15 – Ciclo operacional obtido a partir do modelo de otimização proposto.....	51
Figura 16 – Comparação dos resultados do Cenário 2 - pressão mínima nos nós da rede.	51
Figura 17 – Sistema Adutor de Botafogo.	53
Figura 18 – Ciclo operacional otimizado da Alternativa 2.....	56
Figura 19 – Ciclo operacional otimizado da Alternativa 3.....	56
Figura 20 – Pressão ao longo da simulação no ponto de consumo do Alto do Céu.....	61
Figura 21 – Pressão ao longo da simulação ETA Botafogo.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações técnicas dos nós da Rede Baghmalek.	27
Tabela 2– Informações técnicas dos trechos da Rede Baghmalek.	28
Tabela 3– Informações técnicas das captações de água do Sistema Botafogo.	32
Tabela 4 – Informações técnicas do sistema de adução para a ETA Botafogo.	32
Tabela 5– Informações técnicas das EEAB do Sistema Botafogo.	33
Tabela 6 – Valores adotados para as penalidades no Cenário 1 e 2.	46
Tabela 7 – Comparação do consumo de energia elétrica e dos custos diários da rede Baghmalek - Cenário 1.	48
Tabela 8 – Comparação do consumo de energia elétrica e dos custos diários da rede Baghmalek - Cenário 2.	52
Tabela 9 – Comparação dos custos hidráulicos.	54
Tabela 10 – Características das soluções.	54
Tabela 11 – Características das soluções.	57
Tabela 12 - Valores utilizados das tarifas.	57
Tabela 13 – Energia consumida e custos mensais de cada alternativa.	58
Tabela 14 – Consumo de energia elétrica e custos diários das estações elevatórias para cada alternativa.	59
Tabela 15 – Níveis dos reservatórios ao longo do ciclo operacional - Alternativa 2.	63
Tabela 16 – Níveis dos reservatórios - Alternativa 3.	64

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
SUMÁRIO	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivos geral.....	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 Consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento.....	13
3.2 Estrutura tarifária de energia elétrica no Brasil	14
3.3 Modelagem de sistemas de abastecimento de água utilizando o EPANET	16
3.4 Técnicas de otimização.....	18
3.5 Algoritmos genéticos	20
4 ESTUDOS DE CASO	26
4.1 Rede Baghmalek.....	26
4.2 Sistema Botafogo.....	29
5 METODOLOGIA	34
5.1 Definição de variáveis e função objetivo.....	36
5.2 Definição da função aptidão	39
5.3 Custo de manutenção das bombas	40
5.4 Custo de recuperação do estado inicial.....	40
5.5 Custo de garantia de demanda	41
5.6 Coeficientes de penalidade.....	42
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
7.1 Rede Bagmalek.....	43
7.2 Sistema Botafogo.....	52
8 CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

O controle operacional dos sistemas de abastecimento de água (SAA) no Brasil enfrenta sérios problemas, resultando em graves deficiências na prestação de serviços. Interrupções frequentes no fornecimento de água e perdas significativas têm sido observadas. As decisões tomadas pelos técnicos muitas vezes não buscam as soluções mais eficientes e econômicas para a operação. Embora as soluções adotadas sejam geralmente tecnicamente viáveis, atendendo às restrições impostas pelo sistema, nem sempre são as mais eficientes, o que acaba elevando os custos das empresas de abastecimento de água.

Os problemas operacionais dos SAA são agravados pelo crescimento não planejado das cidades no Brasil. Com o aumento significativo da demanda por água potável devido ao processo de urbanização, há uma necessidade urgente de readequação do fornecimento de água. No entanto, a disponibilidade de mananciais está se tornando cada vez mais escassa e distante, o que requer a utilização de sistemas adutores de água para o abastecimento urbano. Esses sistemas são estruturas complexas, compostas por inúmeras estações elevatórias e válvulas, responsáveis pelo transporte de grandes volumes de água. A operação desses sistemas tem se tornado cada vez mais refinada, exigindo um controle operacional complexo. Esse desafio destaca a necessidade urgente da implantação de ações que promovam a eficiência operacional dos sistemas.

Diante desse cenário, é fundamental que haja um gerenciamento operacional otimizado, que considere a relação direta entre a demanda de água e o custo energético associado. Isso significa que é preciso encontrar um equilíbrio entre o volume de água transportado e o consumo de energia elétrica, visando minimizar os custos operacionais. Dessa forma, é necessário garantir a sustentabilidade do abastecimento de água urbano, promovendo um uso mais eficiente desse recurso e uma redução nos custos operacionais do sistema adutor.

As estações elevatórias desempenham um papel importante nos sistemas adutores, sendo responsáveis por parcela significativa dos gastos do setor de saneamento (Silva *et al.*, 2015). Gomes (2012) estima que, somente no Brasil, o consumo energético dos sistemas de abastecimento corresponde a aproximadamente 3% de toda a energia consumida no país. Dados de 2022 revelam que, somente no Brasil, as despesas com energia elétrica das empresas prestadoras de serviços de saneamento atingiram o valor de R\$ 9,00 bilhões, com um consumo total de 14,2 TWh, sendo 12,6 TWh destinados ao

abastecimento de água (SNIS, 2022). Entretanto, essa realidade não é exclusiva do Brasil, nos Estados Unidos, por exemplo, o consumo anual líquido de energia nos sistemas de abastecimento de água é estimado em aproximadamente 75 bilhões de kWh, o que equivale a um custo de cerca de US\$ 4 bilhões (Giacomello *et al.*, 2013).

SOUZA *et al.* (2021) relatam que sistemas urbanos de abastecimento de água normalmente consomem entre 1% e 4% da eletricidade de um município e são normalmente o maior consumidor individual de eletricidade. Esses custos podem representar até 65% do orçamento operacional de uma concessionária de água (Chen *et al.*, 2021), e 20% da eletricidade mundial é consumida por sistemas de bombeamento (IEA, 2024). Esses números ressaltam a necessidade de adotar medidas que otimizem o consumo de energia nesse setor, haja vista que, mesmo pequenos ajustes que levem a uma melhoria geral na eficiência podem resultar em economias significativas.

A otimização da operação dos sistemas de bombeamentos resulta em impactos econômicos significativos e pode alcançar uma economia de milhões de dólares por ano em grandes sistemas (Barros Filho *et al.*, 2017; Bezerra *et al.*, 2023). Estratégias de gestão inteligente destinadas a reduzir custos operacionais em estações de bombeamento, como programação otimizada de bombas, são opções atraentes para empresas de água e autoridades de gestão (Helmbrecht *et al.*, 2017). Entretanto, é importante ressaltar que o combate ao consumo excessivo de energia não deve comprometer a qualidade do serviço de abastecimento.

Os sistemas adutores de água possuem diversos componentes que podem ser alterados frequentemente em função da variação das demandas. Há diversas restrições que devem ser atendidas para garantir a confiabilidade do abastecimento, é necessário manter níveis mínimos de água nos reservatórios, garantir que os pontos de consumo apresentem valores mínimos de pressões e limitar o número de acionamento das bombas para preservar o sistema como um todo. Portanto, a otimização do sistema adutor é amplamente facilitada pelo uso de algoritmos de otimização, que se destacam como uma das melhores soluções para lidar com a complexidade dessas tarefas.

Determinar a rotina operacional ótima é um problema matemático complexo. O objetivo de minimizar os custos entra em conflito com outros objetivos que são necessários para um bom funcionamento do sistema, pois à medida que o custo operacional diminui, o sistema fica mais vulnerável e menos capaz de lidar com anormalidades, o que pode diminuir a qualidade do serviço. Logo, é preciso encontrar um ponto de equilíbrio entre os custos e os riscos. Conseqüentemente, então tem-se a

necessidade do desenvolvimento de pesquisas na área, em busca de melhorias no processo operacional, dessa forma, é necessário desenvolver técnicas que possam lidar com as diversas restrições do sistema adutor e encontrar soluções que levem em consideração as diversas variáveis que afetam a operação do sistema, sendo então fundamental investir em tecnologia e em processos que possam contribuir para a otimização do sistema adutor de água. Assim, a utilização de algoritmos de otimização, por exemplo, pode ajudar a encontrar a rotina operacional mais adequada, levando em consideração as diversas variáveis que afetam o sistema.

Portanto, a complexidade da definição de rotinas operacionais para os sistemas adutores exige uma abordagem integrada e multidisciplinar para otimizar seu processo operacional. A pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias são fundamentais para garantir a qualidade do serviço, minimizar os custos operacionais e garantir a sustentabilidade do abastecimento de água. Essa complexidade apresenta um grande desafio para a otimização do seu processo operacional, a não-linearidade dos sistemas dificulta que sejam analisados a partir de um tratamento analítico, o que limita a aplicação de técnicas de programação linear e dinâmica para otimizar projetos de sistemas adutores.

Atualmente, há uma vasta área de estudo que busca o aprimoramento da eficiência energética em sistemas adutores, levando em consideração fatores como a confiabilidade operacional e a satisfação das demandas. Estudos recentes destacam a aplicação de redes de água inteligentes e modelos digitais gêmeos para gerenciar a eficiência dos sistemas de distribuição (Ramos *et al.*, 2023). Além disso, pesquisas sobre a gestão de energia e controle de vazamentos mostram resultados promissores na otimização da eficiência energética (Giudicianni *et al.*, 2020). Métodos de otimização, como algoritmos genéticos, também têm sido eficazes na melhoria da operação e na redução do consumo de energia (Cimorelli *et al.*, 2023). Entretanto, o uso efetivo dos modelos desenvolvidos em aplicações reais ainda é um desafio para os pesquisadores e técnicos das companhias de saneamento.

Diante do exposto, esta pesquisa objetiva o desenvolvimento de um modelo computacional para a otimização de sistemas adutores de água complexos com múltiplas fontes de água e reservatórios de acumulação e distribuição.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos geral

O trabalho objetivou o desenvolvimento de um modelo de otimização para a operação de sistemas adutores complexos com vistas à minimização dos custos energéticos. O modelo computacional poderá auxiliar os tomadores de decisão na definição de regras operacionais ótimas de sistemas adutores com múltiplas fontes de água e reservatórios de acumulação e distribuição.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolvimento de um modelo computacional baseado no método de otimização para determinar estratégias operacionais eficientes em sistemas de abastecimento de água.
- Aplicação do modelo de otimização, para a definição de regras operacionais ótimas, no Sistema Botafogo, que é responsável pelo abastecimento de parte da Região Metropolitana de Recife, Pernambuco.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento

No Brasil, enfrentamos um desafio em relação à alocação de investimentos financeiros no setor de saneamento, embora haja um grande volume de recursos destinados à expansão dos sistemas existentes, há uma baixa priorização de investimentos na modernização da parte operacional desses sistemas. Portanto, essa discrepância resulta em problemas, especialmente no que diz respeito aos altos gastos com energia elétrica, assim encontramos vários fatores que contribuem para essa situação. Uma das principais causas dos altos gastos com energia elétrica no setor de saneamento está relacionada à ineficiência das estações elevatórias. Essas estações são responsáveis por bombear água para pressurização do sistema e muitas vezes operam de forma ineficiente, resultando em um consumo desnecessário de energia, além disso, a falta de manutenção adequada e projetos inadequados de rede também contribuem para o aumento dos gastos energéticos, assim como, a presença de tubos antigos, com alta perda de carga, agrava ainda mais a situação.

No entanto, a causa mais proeminente desses altos gastos é a falta de eficiência na forma como os sistemas de saneamento operam, a falta de embasamento teórico e estratégias de gerenciamento eficientes contribui para o desperdício de energia elétrica. Ademais, a ausência de um planejamento adequado e a falta de tecnologias modernas nos sistemas de saneamento levam a um consumo energético maior do que o necessário. Felizmente, essa falta de eficiência pode ser resolvida com a implementação de estratégias de gerenciamento adequadas, assim é fundamental investir em capacitação e treinamento dos profissionais envolvidos no setor de saneamento, garantindo que eles possuam o conhecimento necessário para operar os sistemas de forma eficiente e econômica, além disso, é importante investir em tecnologias modernas que possam otimizar o consumo de energia, como sistemas de monitoramento e controle inteligentes.

Dessa forma, para promover a melhoria do setor de saneamento, é fundamental realizar um processo de restauração e modernização dos setores operacionais das empresas. Já existem alguns sistemas que já adotaram Centros de Controle Operacional, que traz a capacidade de obter uma visão abrangente do sistema, esses centros permitem o monitoramento de dados sobre a situação das bombas, válvulas e níveis dos reservatórios, auxiliando na tomada de decisões em conjunto com a experiência do operador. No entanto, a implementação dessas melhorias deve levar em conta que é comum ocorrer

imprevistos no planejamento operacional, por isso, é necessário estabelecer estratégias de contingência e estar preparado para lidar com situações inesperadas que possam afetar a eficiência energética dos sistemas.

Embora sejam necessários altos investimentos na modernização dos sistemas de saneamento, o custo de implementação dessas ações é, relativamente, baixo, e traz um retorno significativo, conforme aponta os estudos realizados por Helmbrecht, Pastor e Moya (2017). Por meio da adoção de programas computacionais especializados, muitas empresas de saneamento estão aprimorando o controle e a avaliação de seus processos operacionais. Essas medidas permitem um monitoramento mais preciso e uma gestão mais eficiente, resultando em economia de energia elétrica e redução de custos. Dessa forma, no cenário atual, é encorajador observar que muitas empresas de saneamento estão reconhecendo a importância do gerenciamento eficiente e estão implementando medidas para melhorar seus processos operacionais. A introdução de programas computacionais e o investimento em tecnologias adequadas são passos importantes para alcançar uma gestão mais eficiente e sustentável.

3.2 Estrutura tarifária de energia elétrica no Brasil

O sistema tarifário de energia elétrica no Brasil é complexo e envolve diversas regulamentações e leis. As tarifas de energia elétrica são classificadas em duas categorias principais: residencial e industrial/comercial, sendo as tarifas comerciais e industriais geralmente mais baixas do que as residenciais, além disso, há classificação dos consumidores pelo nível de tensão de fornecimento de energia é importante para definir as tarifas de energia elétrica.

Os consumidores de baixa tensão recebem energia elétrica em tensões de até 1 kV e geralmente são consumidores residenciais e comerciais de pequeno porte. Os consumidores de média tensão recebem energia elétrica em tensões entre 1 kV e 69 kV e são geralmente consumidores comerciais e industriais de médio porte. Já os consumidores de alta tensão recebem energia elétrica em tensões acima de 69 kV e são geralmente consumidores industriais de grande porte, como indústrias de mineração e siderúrgicas (NEOENERGIA, 2022).

Nota-se que a classificação dos consumidores pelo nível de tensão é importante para definir as tarifas de energia elétrica, uma vez que as tarifas são ajustadas para refletir as necessidades e os custos de cada tipo de consumidor. As tarifas de energia elétrica para

os consumidores de baixa tensão são geralmente mais baixas para incentivar o consumo e a melhoria da qualidade de vida dos consumidores, enquanto as tarifas de energia elétrica para os consumidores de média e alta tensão são mais elevadas para incentivar a eficiência energética e a redução do consumo de energia elétrica pelos setores comerciais e industriais.

Existe também uma divisão da tarifa energética em Tarifa de Uso de Sistema de Distribuição (TUSD) e Tarifa de Energia (TE), para a separação dos custos de distribuição de energia elétrica dos custos de geração elétrica. A TUSD é a tarifa que os consumidores pagam pelo uso do sistema de distribuição de energia elétrica, que inclui a manutenção e expansão da rede de distribuição de energia, os custos de transmissão e distribuição, além de outras despesas relacionadas à operação e manutenção do sistema de distribuição. Já a TE é a tarifa que os consumidores pagam pela energia elétrica que consomem, que inclui os custos de geração da energia elétrica. Esta segregação da tarifa em TUSD e TE é importante para garantir a transparência na cobrança de tarifas de energia elétrica, permitindo que os consumidores saibam exatamente quanto estão pagando pela geração e distribuição de energia elétrica.

Além disso, há também uma subdivisão em diferentes tipos da Tarifa de Energia, que são:

1. Tarifa convencional;
2. Tarifa horo-sazonal verde (THS Verde);
3. Tarifa horo-sazonal azul (THS Azul).

Na tarifa convencional, que é uma tarifa monômnia, a cobrança é feita apenas com base no consumo de energia elétrica mensal, com um valor fixo para a tarifa de energia e um valor variável para a tarifa de uso do sistema de distribuição. Já os outros dois modelos de tarifa, que são tarifa binômnia, são cobrados tanto pela demanda quanto pela energia que consomem, sendo obrigatório para aqueles que são atendidos em tensão superior a 69 kV a THS Azul, no entanto há divergências entre as duas. Na Tarifa horo-sazonal verde tem-se o contrato da demanda pretendida pelo consumidor, que é a demanda contratada, que não depende da hora do dia, dessa forma o consumo consiste na soma do custo do consumo no horário de ponta e fora de ponta com a única tarifa de demanda. Já na Tarifa horo-sazonal azul existe a contratação de duas demandas, demanda contratada na ponta e demanda contratada fora de ponta além do custo do consumo em horário de ponta e fora de ponta.

3.3 Modelagem de sistemas de abastecimento de água utilizando o EPANET

O EPANET é um *software* que foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency - EPA*). É baseado em um modelo matemático que descreve a dinâmica da água em sistemas de distribuição de água. É um *software* gratuito e de código aberto, e é amplamente utilizado em todo o mundo por engenheiros, gerentes de sistemas de água e pesquisadores para simular e analisar sistemas de distribuição de água (Rossman, 2000).

O *software* pode ser utilizado para simulação de sistemas de distribuição de água pressurizada, proporcionando analisar o comportamento do sistema, incluindo o fluxo de água, pressão e consumo, permitindo assim, avaliar o desempenho do sistema de distribuição de água, identificando pontos críticos e avaliando a eficiência do sistema, além disso, é uma importante ferramenta para gerenciamento de sistemas, podendo ser usada para monitorar a distribuição de água, incluindo a identificação de vazamentos e avaliação de alternativas de reparo e auxilia também na análise de qualidade de água, avaliando a previsão de concentrações de contaminantes e a identificação de fontes potenciais de contaminação.

Portanto, a modelagem de SAA através do EPANET tem como objetivo simular o comportamento hidráulico de uma rede de distribuição de água, avaliando o desempenho geral em diferentes condições de operação, identificando problemas de pressão, vazamento e fluxo e avaliação de eficiência energética. Em resumo, vários dados podem ser extraídos de uma modelagem, auxiliando na tomada de decisões, alguns desses dados incluem:

1. A partir do modelo pode-se avaliar os impactos de novos desenvolvimento ou expansões na rede, possibilitando assim a inclusão de novos componentes para garantir a continuidade do fornecimento de água;
2. Identificação de áreas da rede com pressão insuficiente ou excessiva, evitando assim futuros problemas com vazamentos ou desabastecimento;
3. O modelo pode ser usado para auxiliar a avaliação do desempenho da rede com diferentes tamanhos e configurações de tubos, bombas e reservatórios, facilitando assim a otimização para atender às necessidades dos usuários da rede de distribuição de água;
4. A continuidade de abastecimento pode ser avaliada a partir de simulações a resposta da rede à continuidade do fornecimento, auxiliando identificar soluções

para garantia de continuidade de fornecimento, como a construção de novos reservatórios;

5. A qualidade da água pode ser avaliada em diferentes pontos da rede, favorecendo identificar problema com mistura de água contaminada ou falta de cloração em determinadas áreas da rede.

Para modelagem do sistema no EPANET, são necessários dados de entrada precisos e completos. Esses dados incluem informações sobre geometria da rede, as características hidráulicas, a demanda de água, as configurações de bombas, as configurações de reservatórios e os dados de calibração. O desempenho do modelo depende significativamente da qualidade desses dados. A geometria da rede abrange informações sobre o tamanho da rede, a forma e as posições das tubulações, válvulas, reservatórios, bombas, e outros componentes da rede. As características hidráulicas referem-se as informações sobre o diâmetro, a rugosidade, o comprimento e a perda de carga para cada segmento de rede. A demanda de água envolve a quantidade de água necessária para atender aos usuários em diferentes momentos do dia e ao longo do ano. As configurações de bomba incluem informações sobre a capacidade, a eficiência e as configurações de operação das bombas na rede. Para os reservatórios, as informações necessárias abrangem a capacidade, a elevação e as condições de operação.

Além do mais, diversos estudos têm explorado o potencial do EPANET para além das simulações padrão, integrando-o a outras metodologias e tecnologias avançadas. Por exemplo, Cariço e Ramos (2023) demonstraram como o EPANET pode ser usado para simular e otimizar a gestão da pressão em sistemas de distribuição de água, integrando-o com tecnologias de *Machine Learning* para promover a eficiência no uso da água e da energia. Esta abordagem não só melhora a sustentabilidade dos sistemas de água, mas também contribui para a transição energética através da implementação de microturbinas que geram energia elétrica.

Adicionalmente, Ribeiro *et al.* (2023) utilizaram a Teoria de Redes Complexas em conjunto com o EPANET para analisar o risco de rupturas em redes de distribuição, identificando elementos críticos que podem afetar adversamente a performance do sistema. Esta metodologia não só proporciona uma visão mais ampla dos riscos associados às infraestruturas de água, mas também oferece uma abordagem computacionalmente eficiente para a gestão de falhas.

Esses exemplos ilustram a ampla aplicabilidade e a relevância contínua do EPANET na pesquisa e prática em engenharia hidráulica, demonstrando seu papel fundamental em avançar o entendimento e a gestão dos sistemas de distribuição de água. As constantes inovações e integrações com outras tecnologias e métodos analíticos reforçam a posição do EPANET como uma ferramenta indispensável na engenharia de recursos hídricos.

3.4 Técnicas de otimização

A definição de regras operacionais desempenha um papel crucial na busca pelo melhor ciclo operacional de estações elevatórias de sistemas adutores. No entanto, como apontado por Lansey e Awuhmah (1994), o maior desafio na operação de um sistema adutor é encontrar esse cronograma de operação das bombas que resulte no menor custo e no menor número de acionamentos. Essa tarefa permanece complexa devido ao grande espaço de busca e à natureza não linear dos problemas. Apesar dessas dificuldades, a implementação de uma operação otimizada apresenta grandes vantagens, como a facilidade de implementação e a não necessidade de intervenções estruturais, o que resulta em um investimento relativamente baixo para implementação.

A otimização das operações das bombas é fundamental, mas também é importante considerar a utilização eficiente dos reservatórios, buscando aproveitar seus volumes de armazenamento para reduzir o número de partidas das bombas. De acordo com Chang *et al.* (2018), estudos de otimização realizados anteriormente mostram que, em média, apenas 37,6% da capacidade total dos reservatórios de armazenamento são utilizados. Essa subutilização representa uma oportunidade para melhorar a eficiência dos sistemas, pois, ao aproveitar de forma mais eficiente o armazenamento nos reservatórios, é possível reduzir a necessidade de acionar as bombas, economizando energia elétrica e prolongando a vida útil dos equipamentos.

No entanto, é importante ressaltar que, para garantir a continuidade do processo operacional, os níveis de água dos reservatórios devem retornar, ao final do ciclo, ao estado inicial. Isso significa que a otimização das operações das bombas e a utilização dos reservatórios devem ser realizadas levando em consideração os requisitos de fornecimento de água e a demanda dos consumidores, garantindo que não haja interrupções no abastecimento.

Estes problemas de otimização são cada vez mais comuns na aplicação de resolução de problemas de engenharia hidráulica, tendo como objetivo melhorar processos, diminuir custos e melhorar a produção. De acordo Tayfur (2017), técnicas de otimização são especialmente eficazes para lidar com dados dinâmicos, não lineares e ruidosos, quando os relacionamentos subjacentes não são completamente compreendidos. A generalidade intrínseca, flexibilidade e desempenho global desses modelos são razões para o crescente interesse neles. Problemas de otimização podem ser resolvidos por métodos determinísticos, que utilizam fórmulas matemáticas e cálculos precisos para encontrar soluções, e métodos estocásticos, que utilizam informações probabilísticas para encontrar soluções ótimas de um problema.

Os métodos determinísticos funcionam de forma sistemática e previsível, sem elementos de aleatoriedade. De acordo com Lin, Tsai e Yu (2012), as abordagens determinísticas aproveitam as propriedades analíticas para gerar uma sequência de pontos que convergem para uma solução ótima global, podendo fornecer ferramentas para resolver problemas de otimização para obter um ótimo global ou aproximadamente global. Dessa forma, em geral os métodos determinísticos são rápidos e precisos, mas podem ser limitados por condições complexas e falta de flexibilidade em problemas complexos, podendo ser insuficientes para resolver problemas com muitas soluções possíveis ou onde a solução ótima é incerta. Na engenharia hidráulica, a aplicação de métodos determinísticos e estocásticos tem se mostrado uma abordagem poderosa para enfrentar desafios complexos de projeto e operação. A integração de algoritmos inteligentes tem transformado a otimização de maquinário hidráulico, como mostrado por Yang *et al.* (2023), que destacam a capacidade dessa tecnologia em reduzir tempo de desenvolvimento e melhorar a eficiência e performance dos designs.

Alguns métodos determinísticos utilizam as derivadas da função objetivo do problema para encontrar a solução ótima, como por exemplo o Método de Newton e o Método do Gradiente, já outros utilizam equações matemáticas e recorrência para localizar a solução ótima.

No entanto, os métodos determinísticos são bastantes sensíveis as condições iniciais, ou seja, se os dados de entrada não estiverem corretos ou se a função objetivo do problema não for bem definida a solução encontrada pode não ser uma solução ótima ou até ser uma solução inviável. Além do mais, a utilização de equações matemáticas bem definidas, como derivadas, torna o custo computacional elevado, tornando ineficientes para problemas de grandes dimensões. Por fim, algoritmos determinísticos podem

encontrar problemas com equações descontínuas, assim, para esses tipos de problemas os métodos estocásticos são uma alternativa mais apropriada, por serem menos sensíveis as condições iniciais e produzirem soluções viáveis mesmo com equações descontínuas.

Métodos estocásticos são algoritmos que utilizam informações probabilísticas em busca de uma solução ótima, lidando com incertezas e imprecisões nos dados, incorporando-os na busca pela solução ótima, tendo a capacidade de explorar múltiplas soluções aumentando a chance de encontrar a melhor solução para o problema. Um exemplo de método estocásticos de otimização é os algoritmos genéticos, que se baseiam na teoria da evolução para encontrar a solução ótima, usando técnicas como seleção, mutação e recombinação para melhorar as soluções ao longo das interações.

Alguns pesquisadores, como Filo (2023), exploram técnicas como redes neurais artificiais, algoritmos evolutivos e lógica fuzzy para o dimensionamento ótimo de sistemas hidráulicos, proporcionando ferramentas robustas para o tratamento de variabilidades e imprecisões dos dados. Adicionalmente, a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina em engenharia hidráulica, como abordado por Lowe, Qin e Mao (2022), demonstra o crescente interesse e eficácia dessas técnicas em previsões de fluxo de rios e demanda de água, destacando sua relevância em diversas áreas de aplicação.

Dessa forma, os métodos estocásticos são especialmente úteis quando os dados são incertos ou imprecisos, ou quando é difícil encontrar uma solução exata usando métodos determinísticos e em problemas com equações descontínuas. Entretanto, estes métodos têm uma grande sensibilidade aos parâmetros como, taxa de mutação, taxa de crossover e tamanho da população, exigindo assim uma calibração cuidadosa para garantir o melhor desempenho. Ademais, os métodos estocásticos não oferecem garantias formais de encontrar uma solução ótima ou solução global.

3.5 Algoritmos genéticos

Algoritmos genéticos (AG) é uma técnica de programação estocástica que faz parte de um conjunto de algoritmos conhecidos como evolutivos, ou seja, são uma técnica de otimização inspirada na evolução natural, pois simulam o processo de seleção natural e cruzamento de genes de organismos biológicos para encontrar soluções ótimas para problemas complexos. Os AG foram desenvolvidos com base na teoria da evolução proposta por Charles Darwin e na teoria dos algoritmos genéticos propostas por John Holland (1970). Ao longo do tempo, o método foi aperfeiçoado e refinado, com o

desenvolvimento de novas técnicas de seleção, cruzamento e mutação, bem como a introdução de novos critérios de parada e avaliação de aptidão, além disso, a evolução dos computadores permitiu que os AG fossem aplicados a problemas cada vez mais complexos. Goldberg (1989) explora a aplicabilidade dos algoritmos genéticos em uma variedade de problemas de busca, otimização e aprendizado de máquina, demonstrando como esses algoritmos podem ser efetivamente utilizados para encontrar soluções ótimas em espaços de busca complexos.

As principais características dos algoritmos genéticos são a inspiração na evolução natural e exploram grandes espaços de soluções através de processos iterativos de seleção, cruzamento e mutação. Deb (2001) utiliza algoritmos evolutivos, incluindo algoritmos genéticos, para a otimização de problemas multiobjetivos, apresentando para resolver problemas que envolvem múltiplos critérios de decisão, muitas vezes conflitantes, assim destacando a capacidade em tratar com essas complexidades.

A sua utilização tem crescido constantemente devido a diversos fatores, mas principalmente devido a sua eficiência, flexibilidade, facilidade de implementação e a recente crescente da inteligência artificial. Algoritmos genéticos são altamente eficientes na solução de problemas complexos, sendo capazes de encontrar soluções ótimas sem precisar de conhecimento detalhado sobre a estrutura do problema. Eles são capazes de lidar com incertezas e dados incompletos, característica bastante útil onde os dados são imprecisos ou incertos. Estudos destacam a eficácia desses algoritmos em otimizar funções de múltiplos objetivos, mostrando sua capacidade de lidar com dados incertos e encontrar soluções ótimas (Hussain *et al.*, 2020; Elsayed *et al.*, 2014)

Algoritmos genéticos têm diversas possibilidades de aplicação em diversos campos da engenharia, auxiliando na resolução de diversos problemas, incluindo projeto de sistemas, otimização de processos industriais, planejamento de manutenção, otimização de controle e no desenvolvimento de novos materiais. Eles são amplamente utilizados em áreas como projeto de sistemas, otimização de processos industriais, planejamento de manutenção, otimização de controle e desenvolvimento de novos materiais, devido à sua capacidade de encontrar soluções ótimas em problemas de otimização, mesmo quando os dados são incompletos ou incertos (Gen & Cheng, 2000).

No campo da engenharia hidráulica, as aplicações podem ser feitas em projetos de sistemas de drenagem, análise de redes de tubulações, gerenciamento de recursos hídricos, redes de distribuição de água e sistemas adutores. Em redes de abastecimento e sistemas adutores, os algoritmos genéticos podem ser utilizados para otimizar a

localização e capacidade de bombas, bem como atender aos requisitos de pressão e vazão em diferentes regiões da rede, auxiliando a maximizar a eficiência dos sistemas de abastecimento de água, melhorando a qualidade e a disponibilidade da água para a população (Zou & Zhou, 2023).

A estrutura básica de um algoritmo genético consiste em representar a solução para o problema como uma sequência de caracteres, conhecida como cromossomo, que é uma cadeia de bits, onde cada bit é chamado de alelo que é representado pelo número 0 ou 1. A ideia é que estes cromossomos (Figura 1) além de representar uma solução para o problema ao mesmo tempo que sejam facilmente manipuláveis para geração de novas soluções, sendo eles agrupados em uma população de cromossomos, que é a base para a evolução das soluções.

Figura 1 - Representação de um cromossomo.

0	1	0	1	1	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

Fonte: Autor (2023)

A cada geração, as soluções são avaliadas para que se determine sua qualidade da solução em relação ao problema a ser resolvido, essa avaliação é feita através de uma função de aptidão. A função aptidão é uma medida quantitativa que avalia a qualidade de cada indivíduo da população em relação ao problema que está sendo resolvido pelo algoritmo genético e é definida pelo usuário, levando em consideração os objetivos e as restrições do problema. Sendo assim, é utilizada para selecionar os indivíduos mais aptos para serem pais dos indivíduos da próxima geração, que são os responsáveis por gerar novas soluções, definindo assim a direção do processo de evolução da população para a identificação da solução mais adequada do problema.

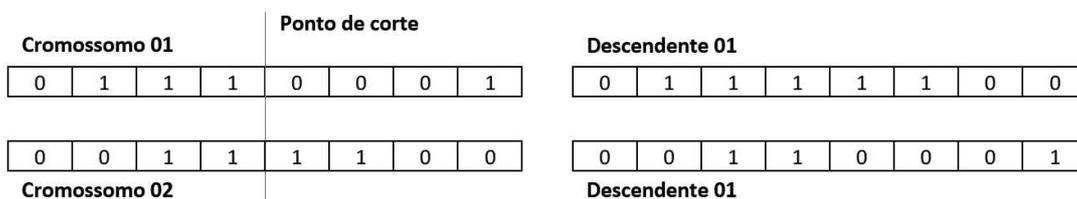
Outro ponto importante é a definição da população inicial, em razão da possibilidade de afetar o desempenho final do algoritmo, em geral, a população inicial é criada de maneira aleatória, mas também pode ser gerada através de técnicas que forneçam soluções iniciais de boa qualidade. Além disso, o tamanho da população inicial é também um fator muito relevante, pois pode afetar a velocidade de convergência do algoritmo e sua capacidade de encontrar soluções ótimas por se espalharem mais no espaço de busca, trasladando por locais que possam gerar soluções inovadoras, ainda não vistas. Em geral, é recomendável que a população inicial seja grande o suficiente para

fornecer uma boa solução final, mas pequena o suficiente para que o algoritmo possa ser executado em um tempo razoável.

A cada interação os indivíduos da população são submetidos a três operações básicas: seleção, cruzamento e mutação. A seleção é responsável por escolher os indivíduos mais aptos da população atual para se reproduzirem e produzir a próxima geração de indivíduos, sendo essa seleção feita com base na função aptidão. Há diversos métodos para seleção, incluindo seleção por roleta, torneio, elitismo, entre outros. Na seleção por roleta, por exemplo, os indivíduos são selecionados com base na probabilidade proporcional à sua aptidão, assim, indivíduos mais aptos têm maior chance de serem escolhidos; enquanto na seleção por torneio, os indivíduos são selecionados através de competições entre pequenos grupos de indivíduos, onde apenas o mais apto é selecionado para a próxima geração. Portanto, a seleção é responsável por preservar a diversidade genética da população, garantido assim a busca pela solução ótima global.

O processo de cruzamento é uma operação que tem como objetivo combinar as características de dois indivíduos para produzir uma nova geração de soluções, com propósito de combinar características benéficas de dois indivíduos para criar soluções ainda melhores. O processo de cruzamento é simples: primeiro, selecionam-se dois indivíduos da população com base em critérios de seleção, em seguida, ocorre o cruzamento dos cromossomos desses dois indivíduos para produzir novos cromossomos. Existem diversas técnicas de cruzamento em algoritmos genéticos, incluindo cruzamento simples, cruzamentos uniforme e cruzamento por ponto único. No cruzamento por ponto único, apenas um ponto de corte é utilizado, gerando novos cromossomos a partir da junção dos cromossomos pais, conforme ilustrado na Figura 2.

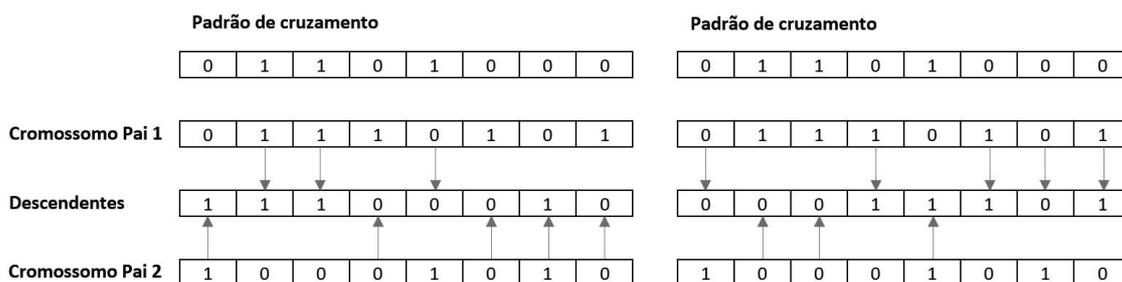
Figura 2 – Método do cruzamento por ponto único.



Fonte: Autor (2023)

Enquanto no cruzamento uniforme, uma probabilidade é atribuída a cada gene do cromossomo para determinar se será herdado ou não, esta probabilidade é tomada de forma aleatória, o processo pode ser melhor entendido a partir da Figura 3.

Figura 3 – Método do cruzamento uniforme.



Fonte: Autor (2023)

Dessa forma, o cruzamento é um importante passo para a evolução da população, pois permite a introdução de novas combinações de características benéficas na população, aumentando assim as chances de encontrar as melhores soluções para o problema. Já a mutação tem como objetivo introduzir uma variação na população, funcionando assim como um mecanismo de correção que promove diversidade genética na população. A mutação é realizada aleatoriamente em um ou mais elementos de cada cromossomo da população, o número de elementos afetados pela mutação é determinado por uma taxa de mutação, que é um parâmetro importante do algoritmo que precisa ser ajustado cuidadosamente.

A natureza da mutação depende do tipo de problema que está sendo resolvido e o formato dos dados de entrada, por exemplo, em problemas de otimização numérica, a mutação pode ser realizada adicionando ou subtraindo pequenas quantidades aos valores dos elementos, já em problemas de codificação binária, a mutação pode ser realizada alterando o valor de um bit. Assim sendo, a mutação é uma operação importante para introduzir variação na população e evitar que a solução ótima seja preservada pelas operações de seleção e cruzamento.

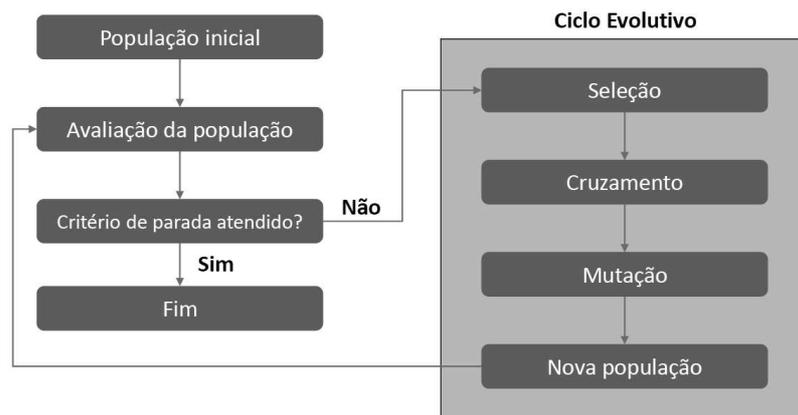
Por fim, o algoritmo genético necessita de um critério de parada que é uma condição que determina quando o algoritmo deve parar de gerar novas gerações de soluções, esses critérios são usados para evitar que o algoritmo entre em um *loop* infinito. Existem vários critérios de parada que podem ser usados, dependendo da natureza do problema e da abordagem de solução. Alguns critérios de parada mais comuns são:

- Número máximo de gerações: Um número pré-determinado de gerações é gerado e, quando esse número é atingido, o algoritmo é interrompido;

- Solução ótima encontrada: Quando uma solução satisfatória é encontrada, o algoritmo é interrompido. Sendo essa solução globalmente ótima, ou uma solução satisfatória que atenda a uma determinada condição;
- Nenhuma melhora na aptidão: Se a aptidão da solução não melhorar após um determinado número de interações o algoritmo pode ser interrompido, pois é provável que esteja preso em uma solução local;
- Tempo de execução: O algoritmo pode ser interrompido se ultrapassar um tempo de execução específico.

O critério de parada é importante para garantir que o algoritmo genético seja eficiente e alcance soluções viáveis em um tempo de processamento aceitável. Todo esse processo pode ser melhor visualizado através da Figura 4.

Figura 4 – Processo de funcionamento do algoritmo genético.



Fonte: Autor (2023)

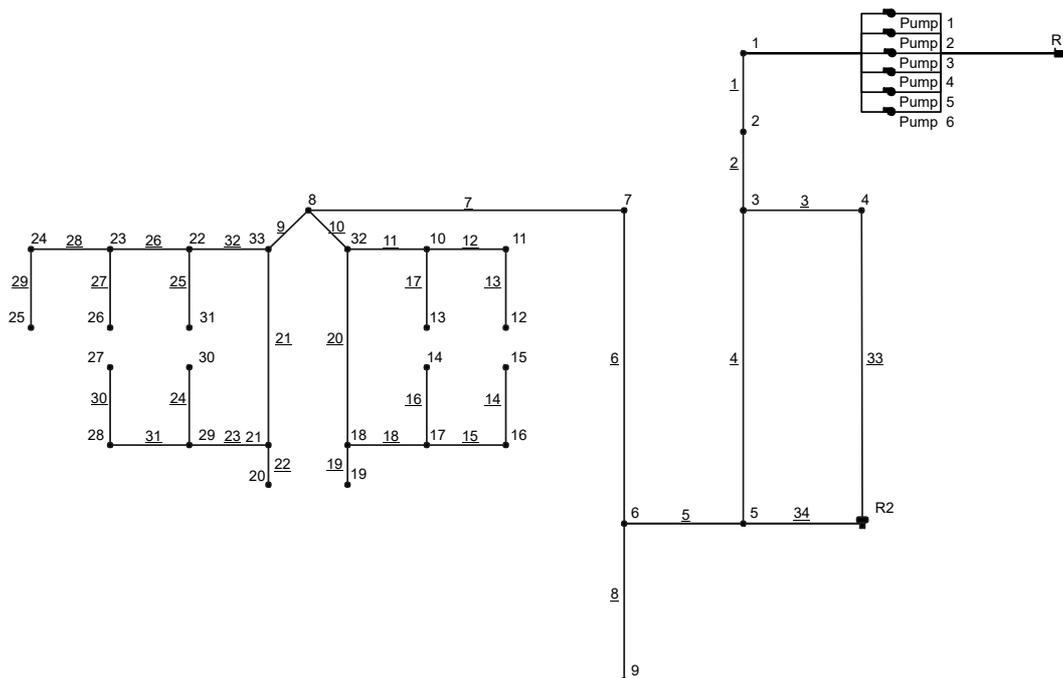
4 ESTUDOS DE CASO

O modelo de otimização desenvolvido foi aplicado a dois sistemas: sistema de distribuição de água de Baghmalek e Sistema Botafogo, que é responsável por parte do abastecimento da Região Metropolitana de Recife, Nordeste do Brasil.

4.1 Rede Baghmalek

O sistema de distribuição de água de Baghmalek (Figura 5) é uma representação complexa e detalhada de uma “rede adutora”, projetada para simular o fornecimento e distribuição de água em um cenário urbano. O sistema é constituído por 33 nós, onde cada uma possui uma elevação específica e padrões de demanda associados, refletindo uma variedade de cenários de consumo dentro da rede. Estas junções são interconectadas por 34 trechos de tubulações de variados comprimentos e diâmetros, que juntas formam o esqueleto da rede, permitindo o fluxo da água entre as diferentes áreas do sistema.

Figura 5 – Esquema da Rede Baghmalek.

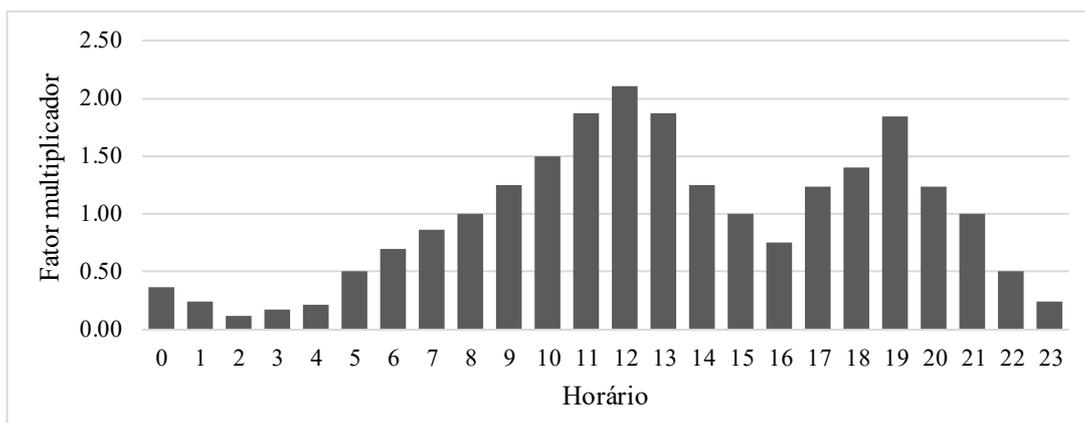


Fonte: Adaptado de Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017)

A Rede Baghmalek exige uma operação cuidadosa e estratégica, onde a eficiência e a resposta às demandas são balanceadas com a necessidade de redução dos custos operacionais. A rede é abastecida por uma estação elevatória composta por seis conjuntos

motor-bomba. Os pontos de demanda da rede adotam o padrão de consumo apresentado na Figura 6, que representam o uso variável de água ao longo do dia, demonstrando assim a dinâmica e a complexidade do comportamento de consumo dos usuários. As Tabelas 1 e 2 apresentam as características da rede.

Figura 6 – Padrão de consumo de água.



Fonte: Autor (2023) com dados de Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017)

Tabela 1 – Informações técnicas dos nós da Rede Baghmalek.

ID Nó	Elevação (m)	Demanda (L/s)
1	745,00	0,00
2	748,73	9,70
3	730,99	10,30
4	739,59	10,70
5	751,78	12,00
6	753,66	9,50
7	747,55	4,00
8	729,88	0,29
9	777,04	8,00
10	729,25	0,38
11	727,00	1,70
12	730,88	1,38
13	731,38	0,82
14	732,00	0,44
15	731,20	0,80
16	733,00	1,90
17	733,25	1,20
18	733,50	0,88
19	760,50	0,16
20	760,50	0,14
21	733,52	0,95
22	733,50	0,91
23	737,70	0,86
24	761,50	1,22
25	762,25	0,91
26	736,25	0,54
27	736,00	0,75
28	737,00	0,65
29	734,00	0,93
30	732,50	0,43
31	732,25	0,42
32	729,25	0,80
33	730,75	0,85

Fonte: Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017)

Tabela 2– Informações técnicas dos trechos da Rede Baghmalek.

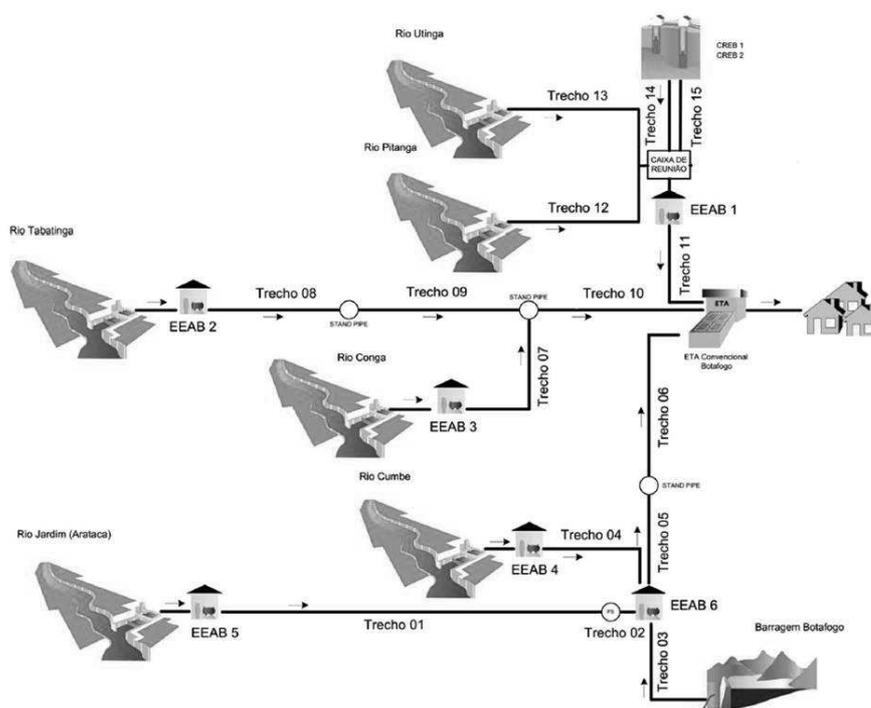
ID Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Coef. de Hazen Williams
1	512,44	322,60	130
2	212,70	254,40	130
3	258,16	113,60	130
4	1112,00	322,60	130
5	454,79	363,60	130
6	401,79	145,40	130
7	986,70	181,80	130
8	705,53	113,60	130
9	35,93	113,60	130
10	48,20	181,80	130
11	39,54	113,60	130
12	50,05	100,00	130
13	80,82	100,00	130
14	81,39	100,00	130
15	48,98	113,60	130
16	75,28	100,00	130
17	81,42	181,80	130
18	41,86	181,80	130
19	43,89	100,00	130
20	178,94	113,60	130
21	179,00	100,00	130
22	43,89	145,40	130
23	40,34	181,80	130
24	72,17	145,40	130
25	80,91	145,40	130
26	49,17	100,00	130
27	81,77	100,00	130
28	52,07	181,80	130
29	78,71	100,00	130
30	78,47	113,60	130
31	50,48	100,00	130
32	40,49	145,40	130
33	573,00	100,00	130
34	1000,00	100,00	130

Fonte: Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017)

4.2 Sistema Botafogo

O estudo de caso adotado é o Sistema Botafogo, inaugurado em 1986, que atende parte da Região Metropolitana do Recife (RMR), abrangendo principalmente os municípios de Igarassu, Cruz de Rebouças, Abreu e Lima, Paulista e Olinda. Este sistema é o único que não está interligado aos grandes anéis da rede de distribuição da RMR.

Figura 7 – Esquema do Sistema Botafogo.



Fonte: Adaptado COMPESA (2021)

Os mananciais, que abastecem este sistema com suas respectivas estações elevatórias de água bruta (EEAB), são:

- Rio Catucá – EEAB 6 Botafogo 1;
- Rio Pitanga - EEAB 1 Monjope;
- Rio Utinga - EEAB 1 Monjope;
- CREB 1 e CREB 2 - EEAB 1 Monjope.
- Rio Tabatinga - EEAB 2 Tabatinga;
- Rio Conga - EEAB 3 Conga;
- Rio Cumbe - EEAB 4 Cumbe;
- Rio Jardim (Arataca) - EEAB 5 Arataca;

A Estação de Tratamento de Água Botafogo, para onde concorrem todas as estações elevatórias de água bruta, está situada no município de Igarassu, na RMR, área norte. É do tipo convencional com capacidade nominal de tratamento de 2,2 m³/s. No entanto, atualmente, a capacidade de tratamento não atinge a vazão nominal de implantação, que, segundo informações técnicas da COMPESA, está entre 1,2 e 1,5 m³/s.

O manancial do Rio Catucá é explorado através da Barragem de Botafogo (ou Barragem Catucá), localizada em Igarassu, que é uma barragem de terra que tem a tomada d'água ligada a EEAB Botafogo 1 através de uma tubulação de FoFo com diâmetro de 1000 mm e 300 m de comprimento. A EEAB 6 Botafogo 1 está a jusante da Barragem Botafogo, também em Igarassu, na margem direita do Rio Catucá, e promove recalque até o Stand-Pipe localizado a 1648 m através de uma tubulação de FoFo com diâmetro de 1000 mm, além do Catucá no seu poço de sucção também recebe água dos Rios Cumbe e Rio Jardim. Possui quatro conjuntos motor-bomba de eixo horizontal, onde cada um do conjunto tem uma vazão de recalque de 700 L/s com uma altura manométrica de 88 mca e uma potência de 750 CV.

O Rio Jardim (Arataca) tem sua captação feita a fio d'água no Rio Jardim, que é afluente do Arataca, onde o nível normal do rio foi elevado com o fechamento, através de comportas, de uma ponte-barragem. É ligado a EEAB 5 Arataca, que foi construída em 1999, tendo sido parte do programa emergencial de obras para garantir o abastecimento d'água em decorrência da estiagem ocorrida em 1998 e 1999. Possui quatro conjuntos motor-bomba de eixo horizontal, onde cada conjunto tem uma vazão de recalque de 300 L/s com uma altura manométrica de 39 mca e uma potência de 350 CV, porém, opera com três conjuntos de acordo com o nível do rio.

O Rio Cumbe possui uma bacia hidrográfica de 35,2 km² e tem sua captação feita através de fio d'água. É explorado através da EEAB 4 Cumbe, que iniciou sua operação em 1994, recalcando o rio até o poço de sucção da EEAB Botafogo 1 através de tubulação, com 600 mm de FoFo e comprimento de 5 km. Tendo três conjuntos motor-bomba do tipo afogado, onde cada conjunto uma vazão de recalque de 240 L/s com uma altura manométrica de 37 mca com uma potência de 200 CV.

O Rio Tabatinga possui uma bacia hidrográfica de 16,3 km² e tem sua captação feita através de fio d'água. É explorada pela EEAB 2 Tabatinga localizada em Igarassu, recalca o rio até um primeiro *stand-pipe*, através de uma tubulação de FoFo de 500 mm e 3200 m de comprimento, e segue depois para um segundo *stand-pipe*, que também receber contribuição da EEAB 3 Conga, e segue através de uma tubulação, com 600 mm

de FoFo e 3 km de comprimento, para a caixa de reunião da Adutora Botafogo. A EEAB tem como quatro conjuntos motor-bomba, onde cada um tem uma vazão de recalque de 300 L/s e uma altura manométrica de 100 mca e potência de 250 CV, mas na condição de serviço opera com três conjuntos de acordo com o nível do rio.

O Rio Conga possui uma bacia hidrográfica de 11,3 km² e sua captação é feita através da EEAB 3 Conga, onde sua captação é feita a fio d'água. A EEAB 3 está situada em Igarassu e recalca o rio até um Stand-Pipe, através de uma tubulação, com 400 mm de FoFo e 600 m de comprimento, onde se junta com a vazão do Rio Tabatinga e segue em uma tubulação, com 600 mm de FoFo e 3000 m de comprimento, até a caixa de reunião da adutora de Botafogo. Com quatro conjuntos motor-bomba, onde cada conjunto possui uma vazão de recalque de 300 L/s com uma altura manométrica de 100 mca e uma potência de 150 CV, mas operando apenas três conjuntos de acordo com o nível de água do rio e devido as condições de transporte da tubulação.

Os Rios Pitanga e Utinga possui uma bacia hidrográfica de 66,02 km² e juntamente com CREB 1 e CREB 2, que são pontos de captação por meio de poços, são explorados através da EEAB 1 Monjope. Os dois rios têm sua captação feita a fio d'água que segue, por gravidade, para caixa de reunião da EEAB 1, que está localizada no município de Igarassu. A elevatória recalca da caixa de reunião até a ETA Botafogo através de uma tubulação de 500 mm de FoFo e comprimento de 5000 m, por meio de dois conjuntos motor-bomba de eixo horizontal, onde cada um possui uma vazão de recalque de 400 L/s com uma altura manométrica de 51 mca e potência de 450 CV, onde os dois conjuntos motor-bomba de eixo horizontal operando de acordo com o nível de água dos Rios Utinga e Pitanga.

Os dados cadastrais do sistema foram obtidos a partir de relatórios e desenhos técnicos disponibilizados pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), concessionária responsável pela operação do sistema. Além da distribuição dos componentes e acessórios presentes na rede (válvulas, bombas e reservatórios), informações como diâmetro dos trechos, especificações das bombas, volume dos reservatórios, bem como suas cotas de entrada e saída e níveis de água mínimos e máximos, foram disponibilizadas. As informações estão reunidas nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Informações técnicas das captações de água do Sistema Botafogo.

Manancial	Vazão (L/s)	Cota de tomada de água (m)	Tipo
Rio Jardim (Arataca)	300	10	Fio d'água
Barragem Botafogo	-	51	Barragem de nível
Rio Cumbe	240	24	Fio d'água
Rio Conga	50	21	Fio d'água
Rio Tabatinga	120	21	Fio d'água
Rio Pitanga	250	14	Barragem de nível
Rio Utinga	100	10	Barragem de nível
CREB 1	12	15	Poço
CREB 2	12	11	Poço

Fonte: Autor (2023) com dados da COMPESA

Tabela 4 – Informações técnicas do sistema de adução para a ETA Botafogo.

ID Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Material do tubo
01	600	23000	Aço
02	600	2300	Aço
03	1000	300	FoFo
04	600	5000	FoFo
05	1000	1648	FoFo
06	1200	10042	FoFo
07	400	600	FoFo
08	500	3200	FoFo
09	500	400	FoFo
10	600	3000	FoFo
11	500	5000	FoFo
12	800	1500	FoFo
13	1000	2000	FoFo
14	200	1200	FoFo
15	200	680	FoFo

Fonte: Autor (2023) com dados da COMPESA

Tabela 5– Informações técnicas das EEAB do Sistema Botafogo.

ID EEAB	Quantidade de bombas	Bombas em funcionamento	Potência (cv)	Vazão (L/s)	Altura manométrica (m)
EEAB 1	2	2	450	400	51
EEAB 2	4	3	250	120	94
EEAB 3	4	3	150	50	135
EEAB 4	3	3	200	240	37
EEAB 5	4	3	350	300	39
EEAB 6	4	4	750	700	88

Fonte: Autor (2023) com dados da COMPESA

5 METODOLOGIA

A pesquisa utilizou técnicas de otimização com algoritmos evolutivos para determinar a melhor solução de regra operacional para os sistemas, com o objetivo de minimizar os custos com energia elétrica, respeitando todas as restrições impostas, como as limitações de atendimento das vazões e restrições físicas e operacionais do sistema.

O ciclo operacional adotado pelo modelo corresponde a um período de 24 horas, onde alterações do estado de cada componente podem ser realizadas a cada hora. Apesar do modelo ser direcionado, originalmente, ao Sistema Botafogo, este poderá ser utilizado em outros sistemas a partir de pequenas modificações.

Há complexidade do problema ocorre devido à existência de muitos parâmetros que podem intervir no processo decisório, como, por exemplo, a capacidade do sistema, variação da demanda de água e condições hidrológicas, tornando assim a análise do sistema um processo complexo. Portanto, só é possível obter um controle operacional otimizado do sistema produtor a partir de soluções buscadas com modelos computacionais baseados em algoritmos matemáticos de otimização. Por outro aspecto, o modelo hidráulico permitirá a realização de simulações do sistema com maior riqueza de detalhes e facilidade de ajustes com rápida resposta, o que permitirá uma melhor análise e precisão nos resultados. Portanto, para que se tenha um bom resultado de otimização do processo, será necessário a junção de um modelo hidráulico com um modelo de otimização.

O modelo de otimização será aplicado em situações que as variáveis de decisão serão modificadas em intervalos de tempo pré-determinados durante um período operacional, a fim de investigar o comportamento do sistema. O problema possui muitas equações de natureza não-linear, portanto, o modelo de otimização terá:

- Capacidade de lidar com restrições, como limitações de recursos, capacidades e restrições operacionais. Essas restrições devem ser incorporadas ao modelo para garantir que as soluções geradas sejam factíveis.
- Flexibilidade para lidar com mudanças nas variáveis de decisão, sendo capaz de lidar com mudanças nas variáveis de decisão ao longo do horizonte operacional, isso significará que o modelo será capaz de considerar diferentes valores das variáveis de decisão em diferentes pontos do horizonte, para que possa gerar soluções ótimas para cada período.

- Capacidade de lidar com equações não-lineares, sendo capaz de lidar com essas equações de forma eficiente e precisa, o modelo deve ser capaz de resolver equações não-lineares complexas para gerar soluções ótimas para o problema e a capacidade de avaliar múltiplos objetivos, o modelo de otimização será capaz de avaliar múltiplos objetivos simultaneamente, como maximizar o lucro e minimizar os custos. Isso permitirá que o modelo de otimização gere soluções que atendam a múltiplos objetivos de forma equilibrada.

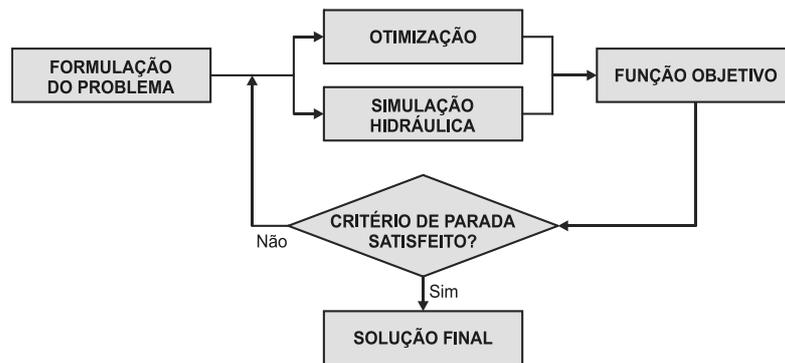
O método de otimização utilizado é o Algoritmo Genético, tendo em vista que é o método que mais se adequa ao problema. Devido aos seus mecanismos específicos de seleção, cruzamento e mutação, os algoritmos genéticos (AG) permitem a criação de sistemas computacionais adaptativos capazes de evoluir soluções para problemas complexos em ambientes dinâmicos. Os AG são particularmente eficazes em problemas de otimização combinatória, onde outras técnicas podem falhar, como a otimização de rotas e redes de distribuição de água. Além disso, seu uso consolidado no meio acadêmico destaca sua eficiência e eficácia na resolução de problemas variados

Para o desenvolvimento da metodologia será elaborado um algoritmo em Python utilizando a integração de duas bibliotecas: JMetalPY e Epanettools. A biblioteca JMetal é um conjunto de classes para resolver problemas de otimização multiobjetivo, a biblioteca é baseada em algoritmos evolutivos, que são técnicas de inteligência artificial inspiradas na seleção natural e evolução biológica e fornecem uma ampla gama de algoritmos evolutivos para resolver problemas de otimização multiobjetivo, incluindo algoritmos genéticos. Além do mais, a biblioteca também oferece recursos para visualização de resultados e análise de desempenho dos algoritmos, bem como a possibilidade de personalização e extensão para atender às necessidades específicas do usuário.

O Epanettools é uma biblioteca de código aberto que fornece funções e classes para acessar e manipular dados de simulação hidráulica de redes de distribuição de água e é baseada no programa de código aberto EPANET. Além disso, é possível criar e modificar redes hidráulicas, simular o comportamento da rede sob diferentes condições de operação, gerar relatórios de resultados e realizar análises de sensibilidade, permitindo também a integração com outras ferramentas e *softwares* para realizar análises mais avançadas, como otimização e análise de incerteza.

A metodologia segue o seguinte fluxo, a cada alternativa operacional é feita a simulação hidráulica a partir da população criada pelo algoritmo genético, posteriormente é feita a análise da função objetivo e verificado o critério de parada, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Etapas do modelo de otimização proposto.



Fonte: Autor (2023)

O critério de parada no algoritmo genético utilizado é definido de duas formas: pelo número máximo de gerações ou pela estabilização das soluções. Especificamente, o algoritmo será interrompido se atingir o número predeterminado de gerações ou se a solução permanecer instável durante um número determinado de iterações, equivalente a 15% do número máximo de gerações. Isso garante que o algoritmo não continue a execução desnecessariamente quando não há mais melhorias significativas nas soluções geradas, otimizando assim o tempo de processamento e garantindo a eficiência do modelo.

5.1 Definição de variáveis e função objetivo

No problema proposto, a função objetivo busca a minimização dos custos de energia elétrica relativos às estações elevatórias do sistema adutor. O custo de energia elétrica da operação de um conjunto motobomba, operando durante um intervalo de tempo, pode ser obtido em função da potência consumida e da tarifa cobrada (Equação 01).

$$C_b = PM \cdot T_e \cdot \Delta t \quad (01)$$

Onde, C_b é o custo energético (R\$), PM a potência motriz (kW), T_e o custo unitário da tarifa de consumo (R\$/kWh) e Δt o intervalo de tempo de operação da bomba (h).

A potência de um conjunto motor bomba é diretamente proporcional a vazão que se deseja elevar a uma determinada altura, além disso, é dependente também do peso específico do líquido bombeado. Porém, apenas uma parte dessa potência é transferida ao fluido devido às perdas no processo. Dessa forma, pode-se representar a potência motriz pela Equação 02.

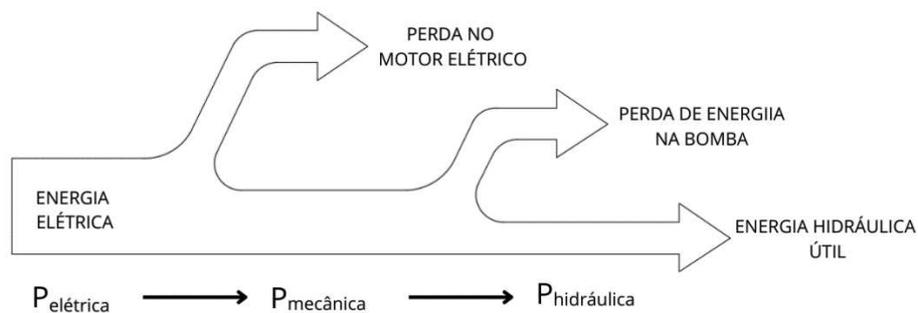
$$PM = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \quad (02)$$

Onde γ o peso específico do líquido (N/m³), Q a vazão recalçada (m³/s), H_m a altura manométrica total (m) e η o rendimento global do conjunto motobomba, que é expresso pela Equação 03.

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_b \quad (03)$$

Onde η_m representa a fração de energia cedida do eixo da bomba da energia recebida pelo motor e η_b a fração da energia cedida pelo rotor que foi recebida pelo eixo da bomba. Esses coeficientes são fornecidos pelos fabricantes dos componentes. A transferência de energias são melhores entendidas a partir da Figura 8.

Figura 8 – Transferência de energia do conjunto motor-bomba.



Fonte: Autor (2023)

A potência motriz de um conjunto motor-bomba também está associada ao ponto de operação das bombas. O deslocamento da curva característica das bombas ocorre quando as condições de operação da bomba são alteradas, como a mudança na velocidade de rotação ou variação da altura manométrica, e essas alterações afetam a vazão e a pressão gerada pela bomba, resultando em um deslocamento da curva. Além disso, o deslocamento das curvas características também afeta o rendimento dos conjuntos motobomba. À medida que a vazão se distancia do ponto ótimo de operação, o rendimento da bomba diminui devido às perdas de energia, como atrito e turbulência. As curvas característica da bomba, vazão *versus* altura manométrica e vazão *versus* rendimento, serão representadas por equações do segundo grau (Equações 04 e 05).

$$H_m = a_1 Q^2 + b_1 Q + c_1 \quad (04)$$

$$\eta = a_2 Q^2 + b_2 Q + c_2 \quad (05)$$

Onde a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 e c_2 são coeficientes de ajustes das curvas, que dependem das características do sistema e da bomba.

Além do mais, tem-se o sistema tarifário de consumo de energia elétrica, que é um modelo utilizado pelas empresas de distribuição de energia para determinar o custo da energia elétrica. Os custos das bombas considerarão duas categorias: consumo e demanda dentro do horário de ponta, e consumo e demanda fora do horário de ponta. O custo no horário de ponta é mais elevado devido aos custos adicionais que as empresas de distribuição têm para atender à demanda nos períodos de maior consumo de energia. Portanto, o custo de bombeamento (C_b) é representado pela soma do custo de consumo da energia elétrica mais o custo de demanda (Equação 06).

$$C_b = \sum_{i=1}^B \sum_{t=1}^T Cc_{it} + \sum_{i=1}^E Cd_i \quad (06)$$

Onde B representa o número total de bombas do sistema, T o número de períodos do ciclo operacional, E o número de estações elevatórias, Cc o custo de consumo de energia elétrica e Cd o custo de demanda.

Dessa forma, temos que a função objetivo, que corresponde ao custo de bombeamento (R\$), será representado pela Equação 07.

$$C_b = \sum_{i=1}^B \sum_{t=1}^T \frac{g \cdot Q_{it} \cdot Hm_{it} \cdot Tc_{it} \cdot \Delta t}{\eta_{it}} + \sum_{i=1}^E \sum_{d=1}^D Td_{id} \cdot Md_{id} \quad (07)$$

Onde i e t representam respectivamente, uma bomba qualquer em um tempo qualquer, g é aceleração da gravidade (m/s^2), Q_{it} é a vazão da bombeada (m^3/s), Hm_{it} é a altura manométrica inserida pela bomba (m), Tc_{it} é a tarifa de consumo (R\$/kWh), η_{it} é o rendimento do conjunto motor bomba, Δt é o intervalo de tempo analisado (h), Td_{id} é a tarifa de demanda (R\$/kW), e Md_{id} é a máxima demanda calculado durante o ciclo operacional (kW).

5.2 Definição da função aptidão

A função de aptidão é uma medida numérica que indica o quão bem uma solução atende aos requisitos ou objetivos do problema em questão, será usada para determinar a probabilidade de cada indivíduo ser selecionado para reprodução ou mutação em gerações futuras, assim ajudará a orientar a busca em direção às soluções melhores e mais eficientes ao longo do processo de otimização.

Problemas de otimização de ciclo operacional possuem diversas restrições físicas, como, por exemplo, a capacidade de recalque de bombas e os volumes totais dos reservatórios, sendo necessário assim a aplicação do método de penalidades. O Método de Penalidades é uma abordagem comum para lidar com restrições em problemas de otimização. Nesse método, as restrições são adicionadas à função de aptidão por meio de termos de penalização, que penalizam as soluções que violam as restrições. A função de aptidão penalizada será otimizada, resultando em soluções que atendam às restrições. Portanto, tem-se um problema restrito tratado como um problema sem restrições, desse modo a função aptidão é resultado da soma entre a função objetivo e os termos da penalidade.

$$\text{Função Aptidão} = \text{Função Objetivo} + \text{Penalidades} \quad (08)$$

Em soluções onde todas as restrições são atendidas, a função de aptidão se iguala à função objetivo. Já em soluções onde há violação de restrições, são adicionadas penalidades expressas em termos financeiros, que resultam em custos adicionais. Dessa

forma, essas penalidades aumentam o valor da função de aptidão, alinhando-a com a unidade de medida da função objetivo.

Para a otimização do sistema em estudo serão consideradas três restrições, que são: o custo de manutenção das bombas, o custo de recuperação do estado inicial e o custo da garantia de demanda.

5.3 Custo de manutenção das bombas

Esse custo pode ser correlacionado com o número de vezes que o status da bomba sofrer alteração, assim quanto mais vezes a bomba for acionada maior será seu desgaste e, conseqüentemente, o seu custo de manutenção. Para esse critério adotou-se que a penalidade só será aplicada em caso da bomba esta desligada em um determinado período e em um intervalo de tempo consecutivo for acionada. Dessa forma, o custo de manutenção das bombas (p_1) pode ser representado pela Equação 09.

$$p_1 = \lambda_1 \sum_{b=1}^B \sum_{t=1}^T N(b, t) \quad (09)$$

Onde o λ_1 é o coeficiente de penalidade a ser aplicado na restrição, N o número de vezes que a bomba acionada, B o número total de bombas e T o número de intervalos de tempo.

5.4 Custo de recuperação do estado inicial

Ao final de um ciclo operacional de 24 horas, o sistema deve retornar ao seu estágio original, ou seja, apresenta as mesmas condições hidráulicas, fazendo com que se tenha continuidade dos ciclos operacionais subsequentes. Portanto, os reservatórios devem ter o estado final igual ao estado inicial. Para impor, essa restrição calculasse o custo necessário de bombeamento para que se retome os níveis iniciais dos reservatórios, este custo leva em consideração o volume de água necessário para que se tenha a mesma condição inicial, assim sendo diretamente proporcional a diferença de nível entre o início e final da simulação. Dessa forma, calculasse essa diferença de volume (Df_i) (Equações 10 e 11).

$$Df_i = A_i \cdot \Delta h \quad (10)$$

$$\Delta h = h_i - h_f \quad (11)$$

Onde A_i é a área da seção transversal do reservatório (m^2), h_i o nível inicial do reservatório e h_f o nível final do reservatório (m). Em casos em que o $\Delta h \leq 0$ não há necessidade de a restrição ser aplicada, pois significa que temos um nível final igual ou maior que o nível inicial do reservatório. Dessa forma, pode-se obter um valor que é diretamente proporcional ao custo de bombeamento para retomar esse volume a partir do cálculo da penalidade representado pela Equação 12.

$$p_2 = \lambda_2 \sum Df_i \quad (12)$$

5.5 Custo de garantia de demanda

Para mensurar este custo, é analisado todos os nós do sistema adutor e caso algum apresente uma pressão negativa, é interpretado que houve uma descontinuidade no abastecimento de água na rede. É realizada a verificação em todos os nós a jusante do reservatório em todos os tempos t da simulação, haja vista que a penalidade é diretamente proporcional ao quanto mais cedo na simulação a rede de abastecimento encontra problemas de abastecimento, dessa forma, o cálculo da função custo pode ser calculada pela seguinte Equação 13.

$$p_3 = \lambda_3 (24 - tp) \quad (13)$$

Onde λ_3 representa o grau de penalidade para restrição e tp o tempo da simulação onde ocorre a falha de abastecimento.

Portanto, conclui-se que a função aptidão é a soma do custo de bombeamento com o custo das três restrições impostas, chegando Equação 14.

$$FA = C_b + p_1 + p_2 + p_3 \quad (14)$$

As restrições físicas da hidráulica, que são importantes para o funcionamento do sistema, estão englobadas no próprio EPANET, como, por exemplo, os limites de armazenamento dos reservatórios.

5.6 Coeficientes de penalidade

Uma das vantagens do método de penalidades é que este pode ser usado para lidar com restrições de qualquer tipo, incluindo restrições lineares e não lineares, restrições de igualdade e desigualdade, restrições de integridade e restrições combinatórias.

Os coeficientes de penalidades são os parâmetros que controlam o efeito da penalização da função objetivo adotada. Esses coeficientes são usados para ajustar a magnitude da penalidade imposta às soluções que violam as restrições do problema, de forma que soluções viáveis sejam favorecidas em relação a soluções inviáveis. A escolha dos coeficientes de penalidades é fundamental para o sucesso da técnica de penalidades. Se o valor dos coeficientes for muito alto, as soluções viáveis próximas as não viáveis podem ser desconsideradas no processo de otimização, levando a uma solução não otimizada. Se for muito baixo, soluções inviáveis ainda podem ser consideradas pelo algoritmo de otimização, resultando em soluções ótimas não factíveis.

Este trabalho não tem como objetivo avaliar o desempenho computacional do algoritmo genético, portanto, a metodologia para a definição dos coeficientes de penalidades adotada será o método de tentativa e erro, o que pode tornar o modelo desenvolvido menos eficiente computacionalmente, mas continuar obtendo resultados que sejam viáveis operacionalmente a sistemas reais. No entanto, existem uma classificação de importância das penalidades, fazendo com que se tenham restrições que mais impactam nos resultados é que sejam necessário maiores coeficientes de penalidade. Portanto, é mais importante que no sistema exista abastecimentos com a garantia de atendimento a demanda, fazendo assim com que o coeficiente λ_3 tenha maior valor, posteriormente para a garantia de continuidade dos ciclos operacionais otimizados é necessário que se tenha sempre o estado final do sistema o mais próximo possível do inicial, isto faz com que o coeficiente λ_2 seja o segundo maior coeficiente de penalidade, consequentemente o λ_1 seja o menor valor entre os demais.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Rede Bagmalek

A fim de validar o modelo proposto, este foi aplicado a um estudo de caso da literatura – a rede de distribuição de Baghmalek. A escolha desse sistema como substrato para a validação é justificada pela complexidade estrutural que esta apresenta. A proposta de validação do modelo através desta rede visa verificar sua capacidade intrínseca de otimizar a operação de sistemas adutores em face de cenários variados. Estas aplicações do modelo pretendem, sobretudo, assegurar a efetividade das estratégias operacionais recomendadas em diferentes contextos, corroborando a adaptabilidade e a eficiência do modelo em resposta a distintos desafios operacionais. Ademais, a aplicação do modelo às configurações da rede de Baghmalek permite uma avaliação comparativa robusta. Esta análise comparativa é crucial para o entendimento da performance e confiabilidade do modelo, assegurando que as soluções geradas se alinhem com os objetivos de maximização da eficiência operacional e minimização dos custos energéticos.

A validação do modelo na rede Baghmalek se apresenta, portanto, como uma etapa preliminar e fundamental deste estudo. Os resultados obtidos nesse processo não apenas sustentam a credibilidade do modelo desenvolvido, mas também fornecem *insights* valiosos para sua aplicação subsequente no Sistema Botafogo, que permanece como um objetivo primário desta pesquisa.

O modelo desenvolvido foi configurado para balancear a exploração do espaço de busca e a convergência eficaz em direção às soluções ótimas. Assim, buscamos garantir que o modelo não apenas explore amplamente as possíveis soluções, mas também refine sua busca pelas melhores opções de forma eficiente. A população inicial do AG foi definida em 200 indivíduos, refletindo uma diversidade significativa de soluções potenciais para iniciar o processo de otimização. O número total de gerações foi estabelecido em 300, fornecendo um amplo horizonte temporal para que o algoritmo evoluísse e refinasse as soluções.

As taxas de cruzamento e mutação, configuradas respectivamente em 0,7 e 0,5, desempenham papéis críticos na dinâmica do algoritmo genético. A taxa de cruzamento elevada favorece a combinação de características entre pares de soluções, promovendo a geração de novos indivíduos que herdaram atributos de ambos os pais, potencialmente levando a um avanço na busca por eficiência. Por outro lado, a taxa de mutação incentiva

a introdução de variações aleatórias nas soluções, uma estratégia essencial para evitar o aprisionamento em mínimos locais e explorar mais amplamente o espaço de soluções.

Adicionalmente, tem-se os parâmetros específicos para a condição de parada do algoritmo, visando assegurar que a otimização não se prolongue além do necessário. Um limite de estagnação foi estabelecido em 15% do número total de gerações, que resulta em um valor de 45 gerações, servindo como um critério para interromper o algoritmo caso não ocorram melhorias significativas na função aptidão das soluções. O limiar de melhoria considerado significativo foi definido em 0,01, uma margem que equilibra a necessidade de progresso mensurável com a sensibilidade a ganhos incrementais que podem ser cruciais para alcançar a otimização. O contador de gerações sem melhoria significativa e o registro do melhor *fitness* da última geração são mecanismos de controle que ajudam a monitorar o progresso e determinar o momento adequado para concluir o processo de otimização.

Na Rede Bagmalek é importante destacar que Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017) incluíram o custo de manutenção das bombas diretamente na função objetivo. Portanto, uma parcela da função objetivo é composta pela soma das vezes que cada bomba é ativada, ponderada pela importância individual da bomba no contexto do sistema, refletindo o impacto no custo de manutenção total. Por outro lado, no modelo proposto, aborda-se o custo de manutenção de maneira indireta, por meio da aplicação de coeficientes de penalidade à função de custo. Desse modo sendo mais importante a análise comparativa qualitativa, mas a comparação de resultados quantitativos serve também como uma comparação de menor importância para os resultados.

As penalidades são impostas com base na frequência de ativação das bombas, implicando um custo de manutenção associado a cada acionamento. Esta abordagem foi adotada para proporcionar maior flexibilidade no ajuste do impacto da manutenção no custo operacional total, mantendo a ênfase na minimização dos custos energéticos e considerando a manutenção das bombas. Ambas as estratégias almejam estender a vida útil dos equipamentos e reduzir os custos de manutenção no longo prazo, porém o modelo com penalidades apresenta uma alternativa eficiente para a gestão dos impactos de manutenção nas decisões operacionais.

Assim, a calibração dos coeficientes de penalidade no modelo desenvolvido foi cuidadosamente ajustada para alinhar-se com os resultados apresentados por Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017). Essa calibração criteriosa permite que o modelo atual reproduza um comportamento operacional semelhante, embora utilize uma abordagem

distinta no tratamento do custo de manutenção das bombas. Dessa maneira, assemelha-se às soluções eficientes e custo-efetivas observadas no referido estudo, mesmo com a implementação de mecanismos de otimização que diferem em sua concepção e execução.

Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017) identificou que, mesmo com variações no número de ativações das bombas, os custos de manutenção podem ser reduzidos significativamente sem um aumento proporcional nos custos de energia. Os resultados mostram que operar mais bombas durante períodos de tarifas baixas de energia não é sempre a estratégia mais eficiente devido a outras restrições do sistema, como a capacidade e localização dos reservatórios, a demanda espacial e os padrões de variação. Portanto, exploraram dois cenários de teste distintos para otimização do escalonamento de bombas em sistemas de abastecimento de água. No primeiro cenário, focou-se em minimizar o número de ativações das bombas para reduzir os custos de manutenção, resultando em uma estratégia operacional conservadora. No segundo cenário, permitiu-se um maior número de ativações das bombas, visando explorar uma possível redução nos custos de energia, apesar do aumento potencial nos custos de manutenção.

Para validar a flexibilidade e a aplicabilidade do modelo de otimização desenvolvido, foram realizados ajustes nos coeficientes de penalidade da função de aptidão para cada um desses cenários. Essencialmente, a definição desses coeficientes de penalidade é instrumental para o balanceamento das soluções geradas pelo modelo, incentivando a aderência às restrições críticas enquanto se busca a otimização do consumo energético. É importante destacar que a escolha desses valores não é rígida; estes podem e devem ser ajustados de acordo com as características específicas e as necessidades do sistema em análise. A flexibilidade na configuração dos coeficientes permite uma customização do modelo para atender às variadas exigências de diferentes sistemas adutores, assegurando que o modelo permaneça relevante e aplicável em uma ampla gama de contextos operacionais.

Para a comparação dos resultados no primeiro cenário, onde focou-se em minimizar o número de ativações das bombas, adotou-se um valor maior para o coeficiente de custo de manutenção de bombas (λ_1), no segundo cenário o valor do coeficiente foi menor permitindo assim um maior número de ativações das bombas, no entanto com o intuito de garantir o abastecimento em toda a rede o coeficiente de garantia de demanda (λ_3) tem seu valor muito maior que os demais (ver Tabela 6).

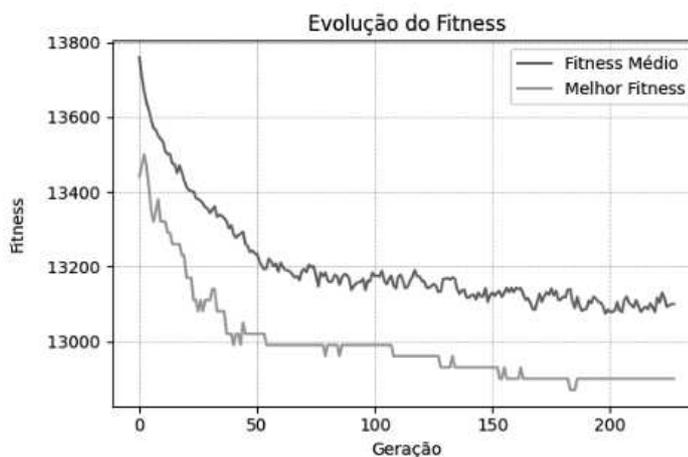
Tabela 6 – Valores adotados para as penalidades no Cenário 1 e 2.

Penalidade	Cenário 1	Cenário 2
λ_1	100	30
λ_2	100	100
λ_3	10000000	10000000

Fonte: Autor (2023)

A Figura 9 representa a evolução e convergência das soluções geradas pelo algoritmo genético ao longo das gerações de simulação para a Rede Baghmalek no primeiro cenário. A linha laranja, indicando o “Melhor *Fitness*”, mostra a pontuação da solução mais eficaz em cada geração, revelando uma tendência de melhoria significativa nos estágios iniciais e uma estabilização à medida que o algoritmo progride. A linha azul, que representa o “*Fitness* Médio” da população de soluções, também começa alta e depois decresce, convergindo para um valor que sugere um equilíbrio entre as soluções encontradas. Foram realizadas mais de 100 simulações para obter o melhor ajuste dos coeficientes de penalidade, assegurando que os valores escolhidos fossem os mais adequados para a otimização desejada.

Figura 9 – Evolução e convergência da Rede Baghmalek para o primeiro cenário.



Fonte: Autor (2023)

O conceito de “*fitness*”, que é o valor da função aptidão, neste contexto é uma medida de quão bem uma solução particular atende aos objetivos do modelo. No caso deste estudo, um valor menor de “*fitness*” indica um custo operacional mais baixo e, portanto, uma solução mais desejável. O declínio acentuado no início do gráfico sugere

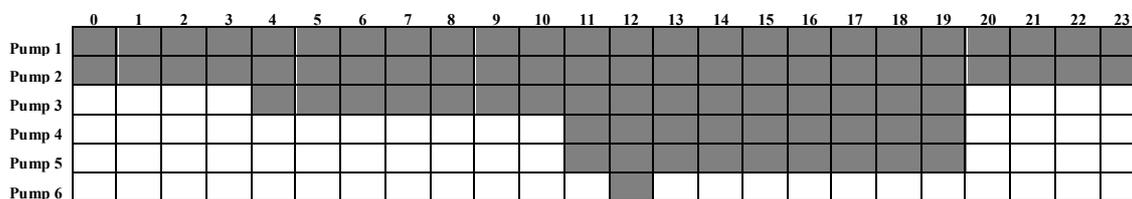
uma rápida adaptação das soluções iniciais em direção a soluções mais promissoras. À medida que o algoritmo avança, a melhoria no “*fitness*” se torna mais gradual, indicando que as soluções estão se aproximando de um ótimo local ou global.

A convergência das linhas do “Melhor *Fitness*” e do “*Fitness* Médio” ao longo das gerações demonstra que a população de soluções está se tornando mais homogênea em termos de qualidade, com menos variação no desempenho entre as soluções individuais. Isto é um sinal de que o modelo desenvolvido está efetivamente explorando e refinando o espaço de soluções, focando em regiões que oferecem as operações mais eficientes do sistema adutor em termos de custos energéticos, respeitando as restrições operacionais.

Desse modo, o gráfico ilustra não apenas a evolução do processo de otimização, mas também a capacidade do algoritmo de convergir para soluções que potencialmente representam as estratégias operacionais mais eficazes para o sistema adutor testado. Este resultado é um indicativo da robustez do modelo de otimização, confirmando sua validade ao oferecer estratégias operacionais que podem ser aplicadas com confiança em situações reais.

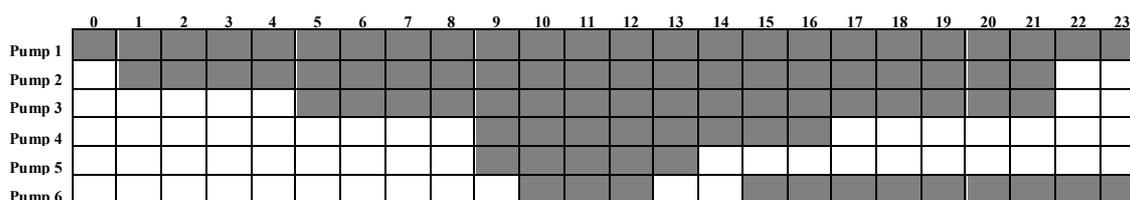
As Figuras 10 e 11 apresentam os ciclos operacionais das bombas determinados por Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017) e pelo modelo desenvolvido, respectivamente. Nesta visualização, cada célula indica o estado operacional de uma bomba em um determinado momento: uma célula hachurada significa que uma bomba está ativa (ligada), enquanto uma célula não hachurada indica que a bomba está inativa (desligada).

Figura 10 – Ciclo operacional da Rede Baghmalek.



Fonte: Adaptado de Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017)

Figura 11 – Ciclo operacional obtido pelo modelo proposto.



Fonte: Autor (2023)

Ao comparar os resultados obtidos, identifica-se uma correspondência no comportamento operacional das bombas entre os dois cenários analisados. É evidente que, durante os períodos de pico de demanda, o sistema se ajusta para aumentar a ativação das bombas, assegurando assim a capacidade de atendimento às necessidades hídricas aumentadas. Paralelamente, observa-se uma estratégia consciente de otimização nos períodos em que a tarifa energética é elevada, particularmente entre 19h e 23h, quando o modelo procura minimizar o número de bombas em funcionamento. Tal abordagem reflete a eficiência modelo desenvolvido no sentido de não apenas atender à demanda por água, mas também controlar e reduzir os custos operacionais associados ao bombeamento, evidenciando a capacidade do modelo em harmonizar os requisitos de fornecimento de água com a gestão econômica do sistema.

Em termos de custo, a análise comparativa entre os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido e os apresentados por Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017) evidência algumas semelhanças e diferenças notáveis nas estratégias de operação das bombas. O modelo proposto apresenta um maior número de ativações das bombas, o que sugere uma metodologia de penalidade que pode estar ponderando outros fatores operacionais ou custos de maneira distinta em comparação ao estudo referência.

Tabela 7 – Comparação do consumo de energia elétrica e dos custos diários da rede Baghmalek - Cenário 1.

Modelo	Número de acionamentos	Total de horas de operação das bombas		Energia consumida (kWh/dia)	Custo da energia (R\$/dia)
		Horário fora ponta	Horário de ponta		
NSGA-II (Makaremi, Haghghi e Ghafouri, 2017)	4	68	16	1770,60	431,10
Modelo proposto	6	71	16	2030,43	498,60

Fonte: Autor (2023)

No modelo desenvolvido, observa-se um ligeiro aumento no número de vezes que as bombas são acionadas, bem como uma variação no consumo energético ao longo do dia. Essas diferenças podem ser atribuídas às especificidades nas metodologias de penalização empregadas em cada estudo. Enquanto Makaremi, Haghighi e Ghafouri, (2017) pode ter um sistema de penalidades mais rigoroso quanto ao número de acionamentos, visando minimizar a manutenção, o modelo desenvolvido pode ter adotado uma abordagem que busca um equilíbrio mais flexível entre os custos de energia e manutenção, e a confiabilidade do abastecimento de água.

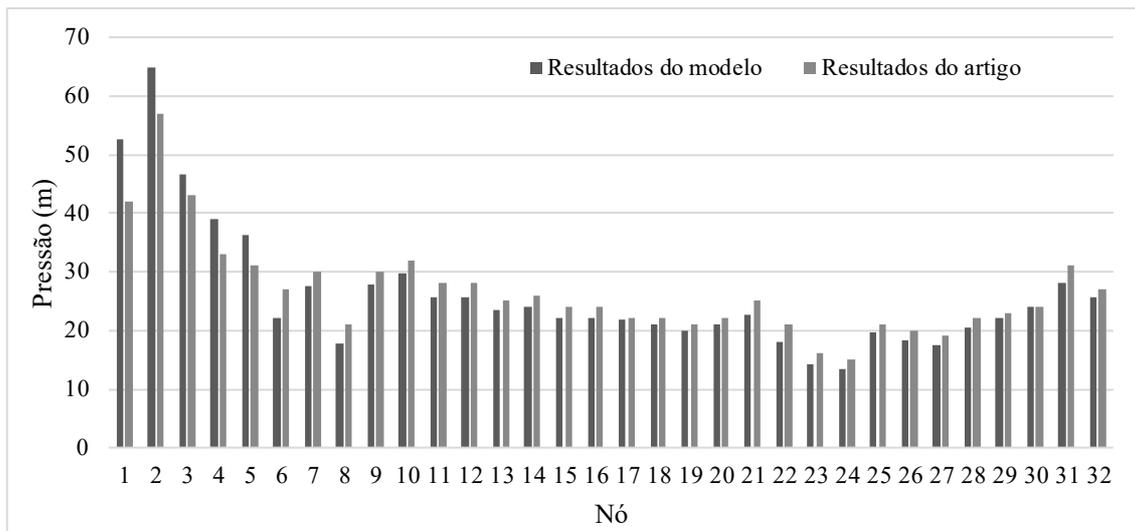
Os resultados energéticos e financeiros dos dois modelos apresentam valores próximos, indicando que, embora as estratégias operacionais sejam diferentes, ambas conseguem alcançar um equilíbrio entre o consumo de energia e o custo operacional. Isso demonstra uma flexibilidade na gestão operacional dos sistemas de bombeamento, onde a adaptação das penalidades e a calibração de parâmetros do modelo podem ser ajustadas conforme as especificidades e prioridades de cada sistema adutor.

Com base nestas observações, é possível afirmar que o modelo tem a capacidade de oferecer soluções operacionais viáveis e competitivas quando comparado com metodologias consolidadas na literatura. Contudo, é importante salientar que ajustes nos coeficientes de penalidade e na função aptidão são fundamentais para alinhar o modelo às condições e objetivos específicos de cada aplicação prática.

A comparação entre os modelos, em termos de pressão mínima em diversos nós da rede, revela uma consistência nos perfis de pressão (Figura 12). No gráfico, é possível notar que as pressões mínimas registradas pelos modelos são semelhantes. As estratégias de operação de bombas, embora distintas em termos de frequência de ativação, não comprometem a capacidade do sistema de manter níveis de pressão adequados. Os resultados reforçam a viabilidade do modelo desenvolvido como uma ferramenta confiável para a gestão operacional em sistemas de distribuição de água. A análise de pressão é um indicador crucial da funcionalidade do modelo e sua capacidade de replicar e melhorar estratégias existentes.

Embora a consistência geral entre os perfis de pressão dos dois modelos seja clara, diferenças pontuais podem ser atribuídas ao tratamento diferenciado da penalidade associada às falhas de pressão. Enquanto o artigo aborda a manutenção da pressão com uma metodologia específica, o modelo desenvolvido aplica coeficientes de penalidade específicos para o controle de pressão do sistema.

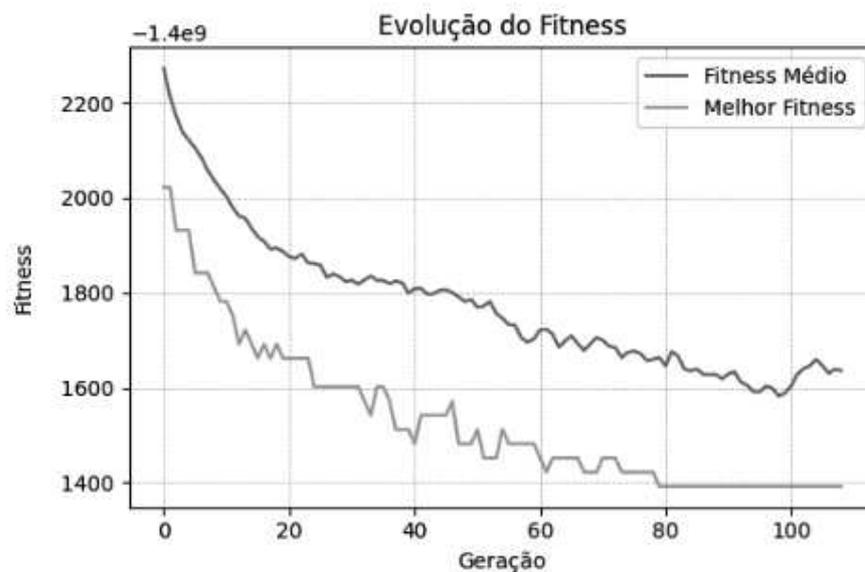
Figura 12 – Comparação dos resultados do Cenário 1 - pressão mínima nos nós da rede.



Fonte: Autor (2023)

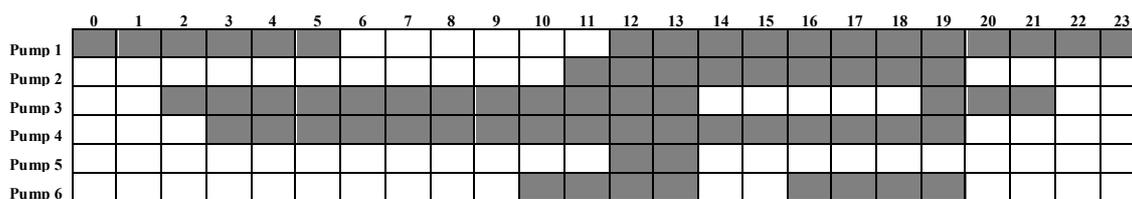
No segundo cenário, onde foi permitido um maior número de ativações das bombas, a Figura 13 ilustra a convergência na busca por soluções. As Figuras 14 e 15 mostram, respectivamente, o ciclo operacional das bombas para o segundo cenário da rede Baghmalek e os resultados obtidos a partir do modelo desenvolvido. A Figura 16 apresenta as pressões mínimas nos nós da rede.

Figura 13 – Evolução e convergência do fitness da Rede Baghmalek para o Cenário 2.



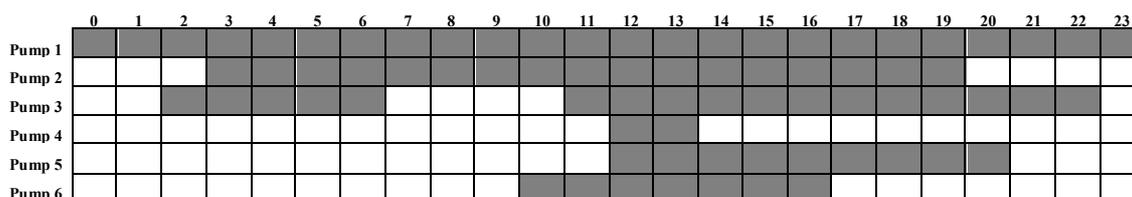
Fonte: Autor (2023)

Figura 14 – Ciclo operacional da Rede Baghmalek.



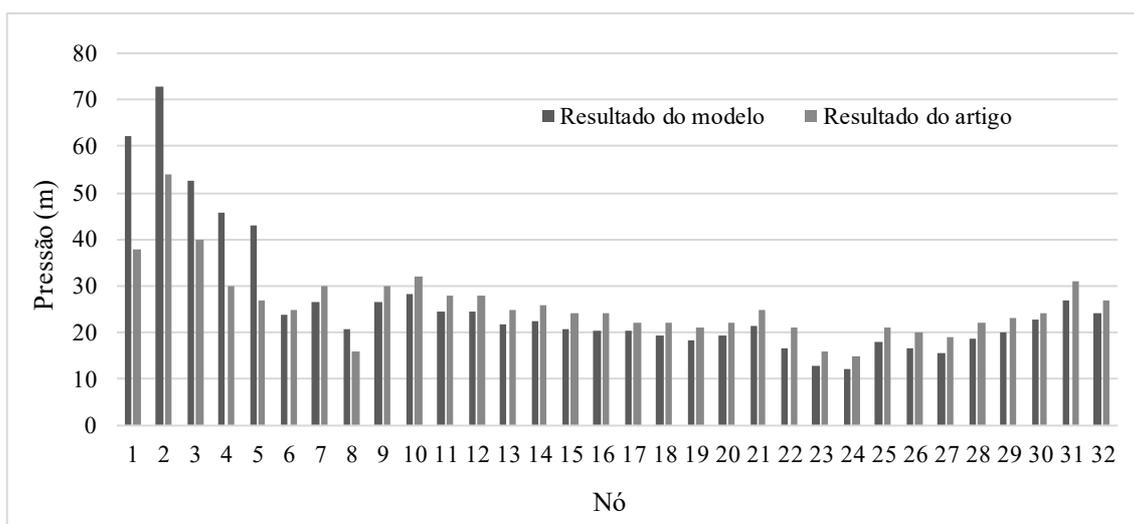
Fonte: Adaptado de Makaremi, Haghghi e Ghafouri (2017)

Figura 15 – Ciclo operacional obtido a partir do modelo de otimização proposto.



Fonte: Autor (2023)

Figura 16 – Comparação dos resultados do Cenário 2 - pressão mínima nos nós da rede.



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 8 apresenta a comparação dos resultados para o Cenário 2. Considerando as análises realizadas e os parâmetros discutidos anteriormente, conclui-se que os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido são satisfatórios quando comparados ao estudo de referência. Apesar das metodologias distintas, especialmente em relação ao tratamento das penalidades associadas às falhas de pressão e ao número de acionamentos das bombas, o modelo desenvolvido demonstrou uma capacidade equivalente de otimizar as operações de bombeamento, mantendo os níveis de pressão dentro dos limites desejáveis e resultando em um desempenho comparável em termos de custo e eficiência energética.

Tabela 8 – Comparação do consumo de energia elétrica e dos custos diários da rede Baghmalek - Cenário 2.

Modelo	Número de acionamentos	Total de horas de operação das bombas		Energia consumida (kWh/dia)	Custo da energia (R\$/dia)
		Horário fora ponta	Horário de ponta		
NSGA-II (Makaremi, Haghghi e Ghafouri, 2017)	8	56	14	1.596,70	403,10
Modelo proposto	7	64	12	1.510,56	386,23

Fonte: Autor (2023)

7.2 Sistema Botafogo

Após a validação do modelo de otimização utilizando a Redes Baghmalek, a próxima etapa foi a sua aplicação ao Sistema Adutor de Botafogo. A abordagem detalhada anteriormente forneceu as bases necessárias para ajustar o modelo às características específicas do estudo de caso, permitindo uma análise focada na eficácia da otimização em um cenário real. Deste modo, as análises e os resultados discutidos a seguir refletem diretamente a aplicação do modelo ao Sistema Adutor de Botafogo, destacando as melhorias operacionais e as economias potenciais alcançadas.

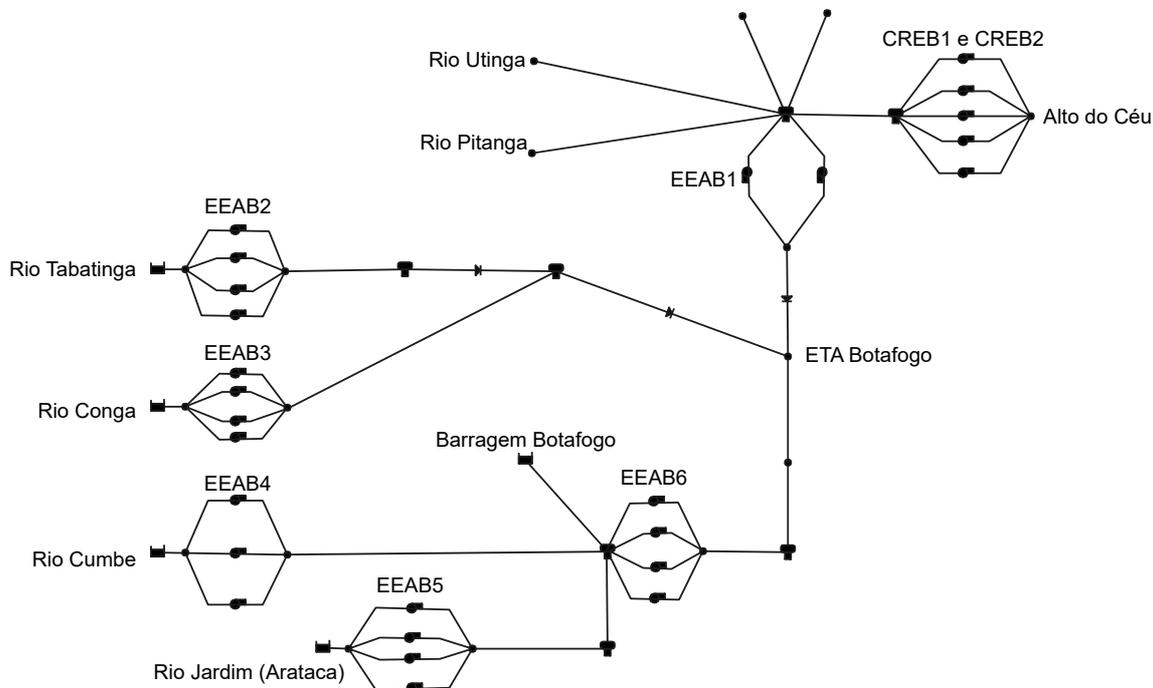
As captações a fio d'água do sistema adutor foram simuladas no EPANET como reservatórios de nível constante. Essa configuração é motivada pela falta de dados de estudos hidrológicos para previsão precisa das vazões de captação ao longo do tempo de simulação. Com a introdução dos reservatórios, buscamos tornar o sistema menos restrito e mais flexível para a otimização.

A ausência de dados detalhados de estudos hidrológicos nos levou a adotar essa abordagem, que permite uma maior liberdade na definição dos cenários operacionais. Os reservatórios de nível constante permitem uma simulação mais dinâmica do comportamento do sistema, possibilitando a exploração de diferentes estratégias de operação e avaliação de seu desempenho em condições variadas.

A vazão constante nas tomadas a fio d'água tornava o sistema muito rígido para otimização, limitando a capacidade de ajuste das operações. Isso comprometia a aplicação do modelo, uma vez que não conseguia capturar adequadamente a dinâmica do sistema em situações reais. A partir de estudos hidrológicos mais detalhados, será possível definir

limites de valores de vazão que podem ser captados dos reservatórios inseridos, proporcionando uma base mais sólida para as simulações e análises subsequentes.

Figura 17 – Sistema Adutor de Botafogo.



Fonte: Autor (2023)

Foram identificadas combinações específicas de operação das bombas que prometem não apenas atender à demanda de água de forma consistente, mas também minimizar os custos operacionais associados, principalmente aqueles relacionados ao consumo de energia.

A primeira análise realizada foi o cálculo de perda de carga para uma vazão unitária ao longo do trajeto da captação até a estação de tratamento, abrangendo todas as estações elevatórias do Sistema Botafogo. Os resultados permitem avaliar o custo hidráulico da água de acordo com a fonte de captação, que corresponde à perda de carga para uma vazão unitária.

Entre as estações elevatórias que abastecem a ETA, observou-se que a EEAB4 apresenta o menor custo hidráulico, característica que se destaca no contexto do Sistema Botafogo. Por outro lado, a EEAB5 é aproximadamente 4,6 vezes mais custosa em termos hidráulicos do que a EEAB4, sugerindo uma maior resistência ao fluxo de água nessa estação. Similarmente, a EEAB3 apresenta um custo hidráulico cerca de 1,3 vezes maior que o da estação mais econômica, enquanto a EEAB2 é aproximadamente o dobro.

Tabela 9 – Comparação dos custos hidráulicos.

Estação elevatória	Custo Hidráulico
EEAB2	2,0 x EAAB4
EEAB3	1,3 x EAAB4
EEAB5	4,6 x EEAB4

Fonte: Autor (2023)

Para análise dos resultados, foram avaliadas três alternativas de operação (ciclos operacionais). A primeira corresponde à operação plena do sistema, onde todas as estações elevatórias trabalharam de maneira ininterrupta durante as 24 horas de simulação. As outras duas alternativas foram obtidas a partir do modelo desenvolvido, divergindo apenas no valor do coeficiente de penalidade do custo de manutenção das bombas. As configurações adotadas são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Características das soluções.

Alternativa	Descrição	Coefficiente de penalidade		
		Manutenção das bombas	Garantia de demanda	Recuperação do estado inicial
1	Situação operacional atual	-	-	-
2	Otimização com menor penalidade do custo de manutenção	500	10.000.000	30
3	Otimização com maior penalidade do custo de manutenção	5.000	10.000.000	30

Fonte: Autor (2023)

Os valores atribuídos aos coeficientes de penalidade foram escolhidos com base nas características hidráulicas do sistema em questão. A escolha desses valores reflete a importância relativa de cada aspecto do problema e visa alcançar resultados alinhados com os objetivos da otimização. O primeiro coeficiente de penalidade atribuído está relacionado à manutenção das bombas. Essa decisão foi fundamentada na compreensão da natureza do sistema, que se concentra principalmente nas estações elevatórias. Nesse contexto, a manutenção das bombas desempenha um papel crucial na operação eficiente do sistema, garantindo confiabilidade do sistema. Portanto, ao atribuir um valor

substancial a este coeficiente, busca-se incentivar o AG a minimizar o número de acionamentos das bombas, reduzindo assim a necessidade de manutenção e seus custos associados.

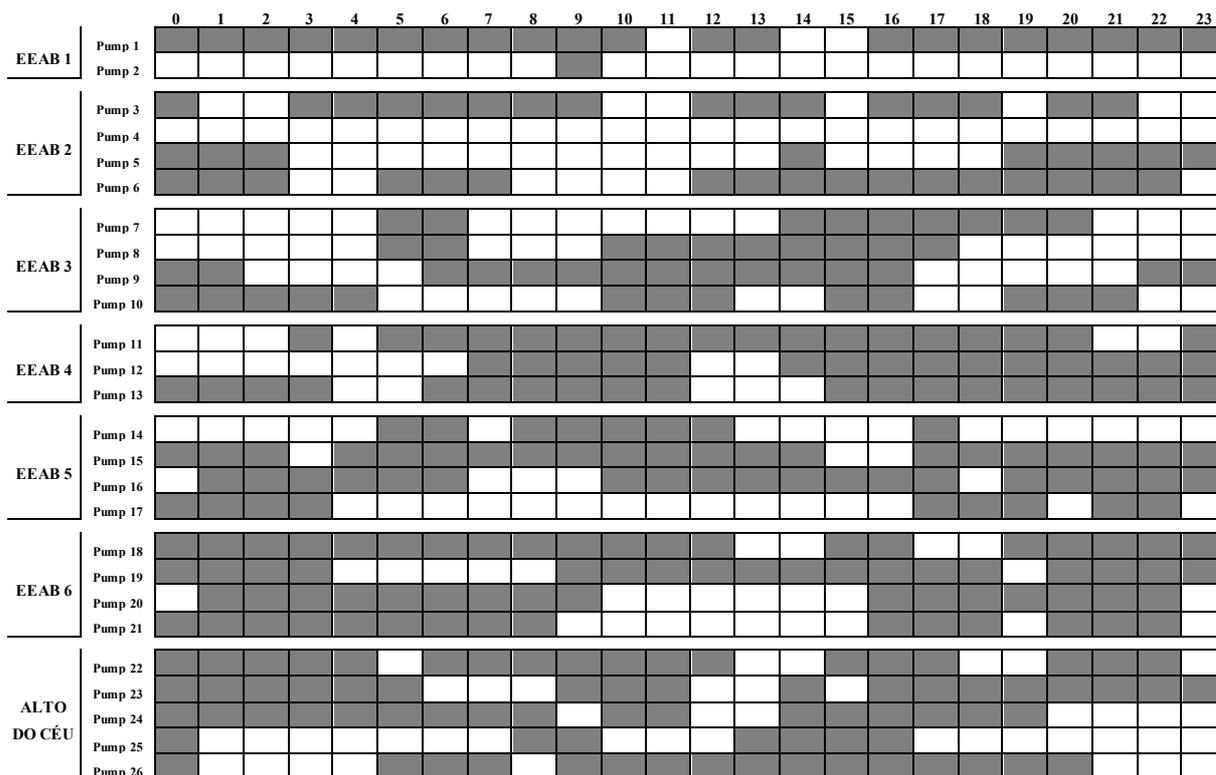
Em segundo lugar, o coeficiente de penalidade relacionado à garantia de demanda foi estabelecido em um valor consideravelmente mais alto, atingindo 10 milhões. Essa escolha reflete a prioridade absoluta atribuída à garantia de abastecimento de água. Dada a natureza crítica do fornecimento de água, especialmente em contextos urbanos, é fundamental assegurar que não haja interrupções no serviço, independentemente das condições operacionais. Portanto, ao atribuir um valor tão alto a este coeficiente, visa-se garantir que o AG priorize fortemente o atendimento pleno da demanda, evitando qualquer falta de abastecimento.

Por fim, o coeficiente de penalidade relacionado à recuperação do estado inicial, que tem uma relativa menor importância desse aspecto para o sistema. Embora seja importante garantir a estabilidade e a eficiência, sua influência é a menos significativa em comparação com a manutenção das bombas e a garantia de demanda, pois a grande maioria das captações são feitas a partir de tomada a fio d'água. O valor atribuído a este coeficiente busca equilibrar sua importância com os outros aspectos do problema, incentivando o modelo a considerar a recuperação do estado inicial, mas sem comprometer os objetivos prioritários de minimização de custos e garantia de abastecimento.

É importante ressaltar que os valores dos coeficientes de penalidade podem ser ajustados de acordo com a demanda específica do sistema otimizado, proporcionando flexibilidade para adaptar o modelo às condições variáveis e desafiadoras.

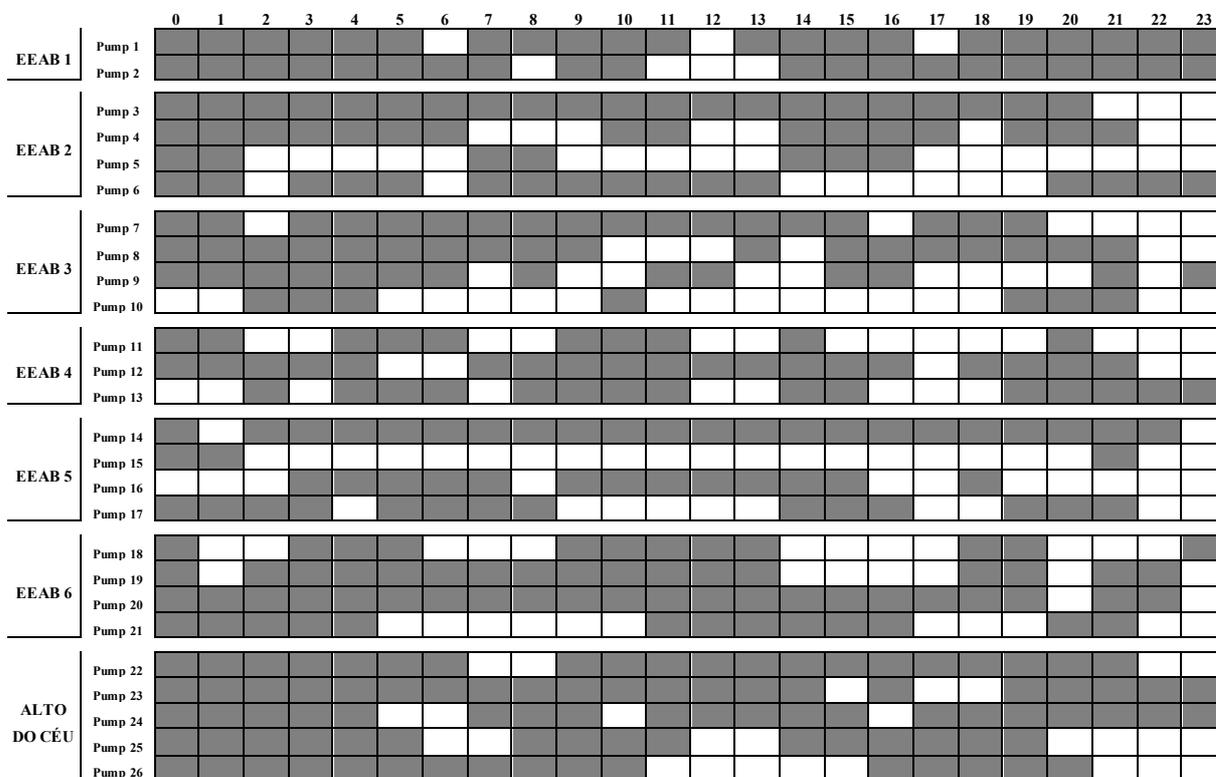
Os ciclos operacionais resultantes podem ser analisados nas Figuras 18 e 19. As porcentagens do volume total bombeado de cada estação elevatória estão apresentadas na Tabela 11. Na primeira alternativa, sem otimização, a EEAB4 bombeia 34% do volume total, enquanto as EEAB2 e EEAB3 apresentam valores de 26% e 29% do volume bombeado, respectivamente. A EEAB5, com o custo hidráulico mais elevado, contribui com apenas 12%.

Figura 18 – Ciclo operacional otimizado da Alternativa 2.



Fonte: Autor (2023)

Figura 19 – Ciclo operacional otimizado da Alternativa 3.



Fonte: Autor (2023)

Tabela 11 – Características das soluções.

Estação elevatória	Volume Bombeado		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
EEAB2	26%	20%	25%
EEAB3	29%	25%	27%
EEAB4	34%	39%	34%
EEAB5	12%	16%	14%
Total	100%	100%	100%

Fonte: Autor (2023)

Na segunda alternativa, a EEAB4 aumentou sua participação para 39%. Isso resulta em uma redução no volume bombeado pela EEAB2 e EEAB3. A EEAB5 aumentou para 16%. Na terceira simulação, EEAB4 manteve o volume bombeado de 34% do total, enquanto EEAB3 e EEAB2 ajustam-se para 27% e 25%, respectivamente.

Para a simulação e análise dos sistemas adutores, foram considerados os valores de tarifas de energia elétrica conforme a tabela de tarifas do Grupo A3 - Serviço Público (NI Serv água, Esgoto e Saneamento). Os valores utilizados foram: Consumo Ativo na Ponta com TUSD de R\$ 0,06/kWh, TE de R\$ 0,53/kWh, totalizando uma tarifa de R\$ 0,59/kWh; Consumo Ativo Fora Ponta com TUSD de R\$ 0,06/kWh, TE de R\$ 0,32/kWh, totalizando uma tarifa de R\$ 0,38/kWh. Além disso, foram consideradas as tarifas para Demanda Ativa na Ponta de R\$ 19,08/kW, Demanda Fora Ponta de R\$ 12,36/kW, Ultrapassagem na Ponta de R\$ 38,16/kW e Ultrapassagem Fora Ponta de R\$ 24,72/kW.

Tabela 12 - Valores utilizados das tarifas.

Descrição	TUSD (R\$/kWh)	TE (R\$/kWh)	Tarifa Total (R\$/kWh)	Tarifa (R\$/kW)
Consumo na Ponta	0.06	0.53	0.59	-
Consumo Fora Ponta	0.06	0.32	0.38	-
Demanda na Ponta	-	-	-	19.08
Demanda Fora Ponta	-	-	-	12.36
Ultrapassagem na Ponta	-	-	-	38.16
Ultrapassagem Fora Ponta	-	-	-	24.72

Fonte: Adaptado NEOENERGIA (2023)

O consumo de energia elétrica e os custos de cada alternativa estão descritos nas Tabelas 12 e 13. De acordo com os resultados, observa-se uma redução significativa nos custos operacionais das alternativas otimizadas em comparação com a operação padrão. A Alternativa 2 se destacou especialmente, reduzindo o consumo de energia para 1621 MWh e alcançando uma economia de 35,26% nos custos totais em relação à Alternativa 1. Da mesma forma, a Alternativa 3 também mostrou eficácia ao registrar uma economia de 31,91%, com um consumo de 1.691 MWh. Ambas as alternativas demonstram como ajustes estratégicos podem levar a operações mais econômicas e eficientes.

Tabela 13 – Energia consumida e custos mensais de cada alternativa.

Alternativa	Energia total consumida mensal (MWh)	Custo mensal (R\$)			Economia
		Consumo	Demanda	Total	
1	2280	3.045.687,11	316.173,20	3.361.860,31	-
2	1621	2.179.105,21	306.300,42	2.485.405,63	35,26%
3	1691	2.265.115,19	283.436,80	2.548.551,98	31,91%

Fonte: Autor (2023)

Tabela 14 – Consumo de energia elétrica e custos diários das estações elevatórias para cada alternativa.

Alternativa	EEAB	Número de acionamentos	Energia consumida (kWh/dia)	Custo da energia (R\$/dia)
1	EEAB1	0	4.409,6	1.470,47
	EEAB2	0	9.783,4	3.278,56
	EEAB3	0	10.776,7	3.606,60
	EEAB4	0	4.239,1	1.422,04
	EEAB5	0	1.907,3	637,91
	EEAB6	0	35.111,3	11.756,59
	Alto do Céu	0	9.781,9	3.341,49
	Total	0	76.009,2	25.513,67
2	EEAB1	3	3.984,9	1.429,53
	EEAB2	8	5.107,0	1.747,12
	EEAB3	9	6.126,9	2.043,65
	EEAB4	7	3.310,7	1.129,47
	EEAB5	10	1.882,7	630,42
	EEAB6	8	24.239,5	8.084,81
	Alto do Céu	12	9.383,8	3.172,90
	Total	57	54.035,4	18,237,90
3	EEAB1	8	4.527,5	1.523,39
	EEAB2	12	6.972,9	2.305,78
	EEAB3	11	7.200,3	2.412,27
	EEAB4	9	3.053,3	1.005,42
	EEAB5	10	1.798,7	604,58
	EEAB6	5	24.517,3	8.055,51
	Alto do Céu	9	8.302,6	2.860,65
	Total	64	56.372,7	18.767,61

Fonte: Autor (2023)

O modelo operacional utilizado para implementar as alternativas otimizadas oferece uma adaptabilidade notável, permitindo ajustes em resposta às prioridades de penalidades. Esta flexibilidade é essencial para responder a mudanças nas políticas energéticas ou tarifárias, garantindo que as estações elevatórias possam continuar operando de maneira eficiente e econômica sob diversas condições de mercado.

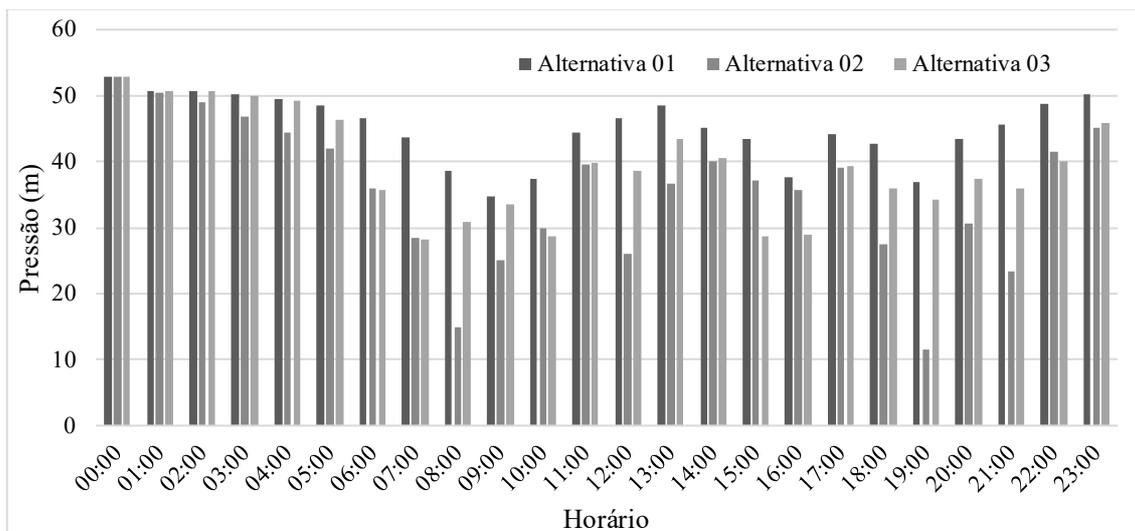
A aplicação de um coeficiente de manutenção mais alto na Alternativa 3 resultou em uma operação das bombas com menos interrupções. Isso implica que as bombas operaram mais continuamente, evitando frequentes ciclos de desligamento e racionamento, o que, embora possa resultar em um custo de energia um pouco maior devido ao funcionamento constante, também reduz o desgaste associado aos ciclos de ligar e desligar, potencialmente prolongando a vida útil das bombas.

Esse modelo operacional, ajustado para refletir diferentes prioridades do sistema, destaca a necessidade de uma análise cuidadosa e adaptativa. A escolha de como configurar os coeficientes de penalidade deve ser alinhada com as prioridades estratégicas do sistema, como redução de custos de manutenção, eficiência energética, ou minimização de interrupções operacionais. Portanto, é fundamental que os gestores do sistema ajustem esses coeficientes com base em uma compreensão clara das implicações de cada configuração, garantindo que a estratégia selecionada maximize os benefícios enquanto atende às necessidades operacionais e financeiras do sistema.

Para a análise da pressão é necessário analisar especificamente os pontos Alto do Céu e ETA Botafogo, pois são os únicos dois pontos de consumo no sistema. Avaliar a pressão apenas nesses pontos permite um foco claro na avaliação da capacidade do sistema de atender adequadamente às necessidades onde é mais crucial, otimizando assim a gestão de recursos e a eficiência operacional. As Figuras 20 e 21 apresentam os valores de pressão nas alternativas ao longo de todo o tempo de simulação.

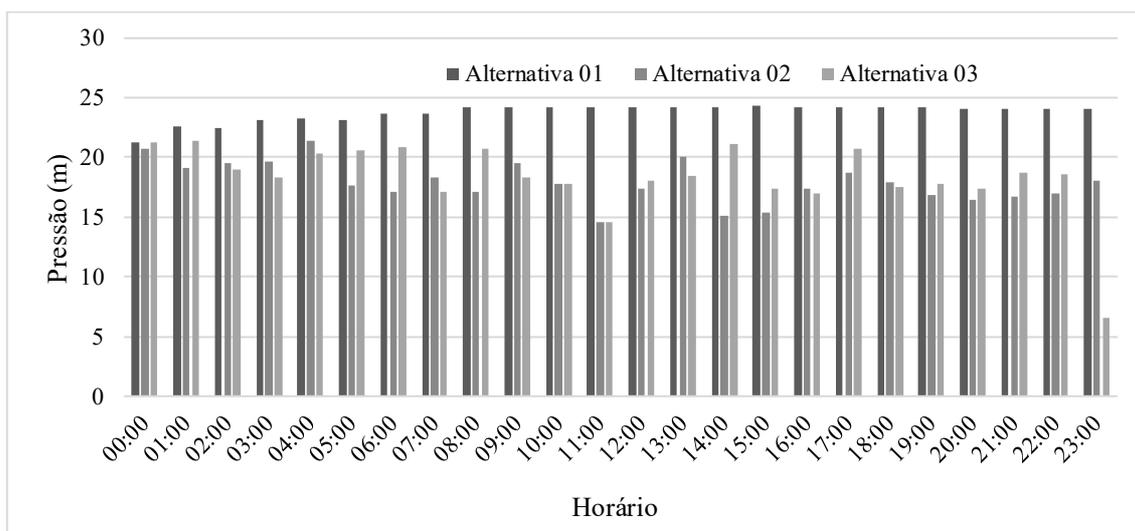
A demanda por água na estação Alto do Céu tem picos noturnos e vespertinos, diminuindo consideravelmente em outras horas. Este comportamento é um fator crucial no planejamento da operação das bombas para assegurar que a pressão seja suficiente para atender a demanda sem desperdício de recursos. As pressões obtidas indicam que, em geral, as Alternativas 2 e 3 conseguem manter a pressão acima desse limite crítico durante toda a simulação, que é uma pressão mínima de 5 mca para as simulações, pois o ponto final de bombeamento é uma ETA. Embora em algumas horas, especialmente nas primeiras horas da manhã, a pressão se aproxime desse limite.

Figura 20 – Pressão ao longo da simulação no ponto de consumo do Alto do Céu.



Fonte: Autor (2023)

Figura 21 – Pressão ao longo da simulação ETA Botafogo.



Fonte: Autor (2023)

Na operação atual, a pressão se mantém consistentemente alta ao longo do dia no ponto de consumo do Alto do Céu, refletindo uma operação que não está otimizada para a variabilidade da demanda. Isso sugere uma falta de otimização no ciclo operacional, visto que manter a pressão alta durante períodos de baixa demanda resulta em um gasto desnecessário de recursos. Essa constância na pressão, embora possa parecer benéfica, na realidade, indica um uso excessivo de energia e uma oportunidade perdida para economia.

Nas alternativas de otimização, as variações na pressão ao longo do dia alinham-se mais estreitamente com os padrões de demanda. Essa gestão adaptativa da pressão garante que a energia é usada de forma mais eficiente, aumentando a pressão durante os picos de demanda e reduzindo-a quando a demanda cai, mantendo-se sempre acima do nível mínimo necessário.

Na ETA Botafogo, a demanda é constante, o que permite uma gestão de pressão mais uniforme ao longo do dia. Todas as alternativas operacionais mostram uma capacidade consistente de manter a pressão bem acima do limite mínimo de necessário para uma operação eficaz. Isso indica que as operações na ETA Botafogo são bem otimizadas para a demanda constante, maximizando a eficiência sem comprometer a entrega de água.

A análise do comportamento de pressão em relação à demanda variável mostra que as Alternativas 2 e 3 proporcionam uma gestão de recursos mais dinâmica e ajustada às necessidades reais do sistema. Isso não só otimiza o uso de energia, mas também garante que os recursos são utilizados de maneira mais sustentável, adaptando-se às variações naturais na demanda ao longo do dia. A operação atual do Sistema Botafogo, por sua vez, embora forneça estabilidade, faz isso ao custo de uma eficiência reduzida, indicando uma área potencial para melhorias na otimização operacional. Portanto, as estratégias operacionais obtidas com o modelo desenvolvido mostram uma capacidade satisfatória de atender à penalidade de demanda imposta.

A avaliação da recuperação do estado inicial dos reservatórios pode ser realizada a partir das Tabelas 14 e 15. A escolha de uma penalidade mais baixa para a recuperação do estado inicial reflete uma estratégia intencional que visa otimizar a flexibilidade e a eficiência de custos nas operações das estações elevatórias. Esta decisão permite maior manejo dos reservatórios em resposta às variações diárias de demanda, sem a necessidade de restauração imediata dos níveis de água após cada uso, promovendo uma operação mais econômica e menos rígida. Entretanto, é importante notar que essa abordagem pode ser ajustada dependendo das prioridades do gestor do sistema. Se a rápida recuperação do estado inicial for mais crítica, por exemplo, em sistemas que não podem tolerar variações prolongadas sem impactar o serviço ou a segurança, pode-se optar por aplicar um coeficiente de penalidade mais alto. Isso asseguraria uma resposta mais rápida após interrupções, alinhando o modelo operacional com as necessidades específicas e as exigências de confiabilidade do sistema.

Tabela 15 – Níveis dos reservatórios ao longo do ciclo operacional - Alternativa 2.

Tempo	Res. 5	Res. 6	Res. 12	Res. 13	Res. 25	Res. 20	Res. 23
00:00	5,00	10,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
01:00	8,26	8,1	2,96	6,44	2,74	8,55	3,92
02:00	8,91	8,73	4,24	4,93	6,2	7,44	0,43
03:00	9,32	9,08	0,24	1,33	8,74	6,74	0,88
04:00	9,63	9,32	2,58	7,14	7,64	6,66	1,62
05:00	9,84	9,47	3,74	8,49	5,02	7,59	2,63
06:00	9,99	9,57	0,39	9,35	4,56	8,21	1,34
07:00	9,86	9,41	1,02	1,84	9,85	6,94	0,03
08:00	7,88	8,98	6,37	5,48	8,88	6,81	3,25
09:00	8,25	7,51	1,95	2,44	7,87	6,78	0,73
10:00	7,60	6,76	0,43	3,88	8,73	6,73	0,43
11:00	7,05	6,29	0,46	1,95	8,74	6,63	0,34
12:00	7,00	6,45	2,3	4,63	9,73	5,72	0,77
13:00	7,07	6,64	1,57	1,51	8,41	6,25	1,6
14:00	7,29	6,95	0,00	9,5	8,42	6,41	2,37
15:00	7,25	6,8	0,46	0,32	8,55	7,22	0,29
16:00	7,03	6,5	1,49	2,13	8,92	6,91	0,02
17:00	4,69	5,8	7,07	6,08	8,88	6,83	3,61
18:00	4,93	4,89	1,24	1,42	8,94	6,63	0,43
19:00	4,94	4,42	0,25	2,35	8,66	6,66	0,45
20:00	4,53	3,76	2,48	0,40	9,66	6,5	0,64
21:00	2,85	3,78	5,09	4,39	8,88	6,86	1,32
22:00	3,64	3,22	1,24	5,87	8,23	7,01	0,33
23:00	3,95	3,73	0,10	0,00	8,66	6,55	0,21

Fonte: Autor (2023)

Tabela 16 – Níveis dos reservatórios - Alternativa 3.

Tempo	Res. 5	Res. 6	Res. 12	Res. 13	Res. 25	Res. 20	Res. 23
00:00	5,00	10,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
01:00	8,27	8,15	3,18	4,74	2,79	8,79	2,16
02:00	8,97	8,78	0,91	4,87	8,42	6,38	2,54
03:00	9,47	9,21	0,00	4,57	8,42	6,45	3,01
04:00	9,82	9,52	0,00	9,92	8,53	6,5	3,31
05:00	10,07	9,69	0,35	0,11	8,50	6,52	1,71
06:00	10,2	9,79	3,05	1,17	8,50	6,72	0,49
07:00	10,17	9,66	0,00	6,07	8,8	6,72	0,16
08:00	9,94	9,34	0,08	0,61	8,74	6,63	0,67
09:00	9,52	8,73	0,00	6,8	8,81	6,72	0,37
10:00	8,86	8,00	0,00	4,5	8,75	6,73	0,03
11:00	8,59	6,15	0,00	1,42	0,57	9,78	0,48
12:00	7,75	7,11	0,00	1,77	7,15	7,61	0,76
13:00	5,45	7,37	5,80	9,24	9,00	6,84	2,01
14:00	5,99	6,47	2,17	2,49	9,27	6,96	0,75
15:00	6,58	6,01	2,81	3,37	9,16	7,01	0,73
16:00	6,58	5,92	0,38	3,76	9,15	6,69	0,04
17:00	6,20	5,37	0,81	7,36	8,45	6,25	0,76
18:00	5,99	5,48	0,00	5,19	9,77	6,49	0,25
19:00	5,83	5,27	0,00	1,83	8,75	6,78	0,27
20:00	5,31	4,09	0,17	0,68	8,92	6,93	0,2
21:00	4,92	4,4	2,88	0,87	8,48	6,50	0,63
22:00	5,00	4,57	0,61	0,55	8,47	6,50	1,18
23:00	5,57	4,95	2,7	2,19	8,48	6,51	1,97

Fonte: Autor (2023)

Adicionalmente, observa-se a Alternativa 2 apresenta um período operacional das bombas mais extenso, a recuperação dos níveis dos reservatórios mostrou um desempenho superior. Isso se deve ao maior número de bombas que continuam ativas até o final do ciclo operacional, facilitando uma recuperação mais eficaz e rápida do estado inicial.

8 CONCLUSÕES

Este estudo propôs e validou um modelo computacional avançado para otimizar a operação de sistemas de abastecimento de água, com foco específico no Sistema Adutor de Botafogo. Os objetivos específicos delineados no início foram atingidos com sucesso, demonstrando a eficácia do modelo em proporcionar estratégias operacionais eficientes, reduzindo os custos com energia elétrica e garantia das pressões adequadas no sistema.

Utilizando a biblioteca JMetal em conjunto com o simulador EPANET, o estudo desenvolveu um robusto modelo de otimização baseado no método do algoritmo genético. Este modelo foi aplicado não apenas ao Sistema Adutor de Botafogo, mas também a rede Baghmalek, adotada anteriormente na literatura. A aplicabilidade e a eficácia do modelo foram confirmadas pela sua capacidade de adaptação e de gerar resultados significativos em diferentes cenários, destacando sua robustez e flexibilidade.

Os resultados obtidos neste estudo não apenas validam a abordagem proposta, como também abrem caminho para futuras investigações que possam integrar variáveis hidrológicas ao modelo de otimização. Essa evolução é fundamental para avançar na gestão eficiente de sistemas de abastecimento de água, assegurando a sustentabilidade dos recursos hídricos e a eficácia no fornecimento de água à população.

A integração do modelo com análises hidrológicas surge como uma recomendação crucial para futuras pesquisas em sistemas com múltiplas captações de água bruta através de tomadas a fio d'água. A consideração dessas variáveis adicionais poderá enriquecer ainda mais a precisão e a aplicabilidade do modelo, especialmente em face das variações hidrológicas e suas implicações na operação dos sistemas adutores.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). Energy and Water. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/energy-and-water>. Acesso em: 25 maio 2024.

AHMED, N.; SARMA, D. Application of artificial intelligence in water distribution system optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 147, n. 8, p. 04021042, 2021.

ANGELAKIS, A. N.; ZHENG, X. Y. Evolution of water supply, sanitation, wastewater, and stormwater technologies globally. *Water*, v. 7, n. 2, p. 455-463, 2015.

BARROS FILHO, E. G. *et al.* Intelligent system for control of water distribution networks. *Water Supply*, v. 18, n. 4, p. 1270-1281, 2017.

BRITANNICA. Water-supply system summary. *Encyclopaedia Britannica*. Disponível em: <https://www.britannica.com/summary/water-supply-system>. Acesso em: 10 março 2024.

BROWN, C.; RAY, P. A.; GHILE, Y. Resilience and water resources management: A review. *Water Resources Research*, v. 57, n. 2, p. e2020WR029562, 2021.

CARIÇO, N.; RAMOS, H. M. Redes inteligentes e machine learning na gestão eficiente dos sistemas de distribuição. *Journal of Water Resources Management*, v. 35, n. 3, p. 123-135, 2023.

CASSIOLATO, M. C.; BRAGALLI, C.; RAVAGNANI, M. A. S. Optimization of installation and energy costs in water distribution systems with unknown flow directions. *Blue-Green Systems*, v. 4, n. 1, p. 87-99, 2022.

CHEN, Y.; ZHAO, X.; ZHANG, L. Optimization of the operation of water distribution systems with emphasis on the joint optimization of pumps and reservoirs. *Water Supply*, v. 21, n. 2, p. 765-777, 2021.

CHIANG, H. *et al.* IoT-Based Water Monitoring Systems: A Systematic Review. *Water*, v. 14, n. 22, p. 3621, 2022.

CIMORELLI, L.; D'ANIELLO, G.; COZZOLINO, R. Leakage reduction in WDNs through optimal setting of PATs with a derivative-free optimizer. *Journal of Hydroinformatics*, v. 22, n. 4, p. 713-723, 2020.

CIMORELLI, L. *et al.* Optimization of the operation of water distribution systems with a genetic algorithm. *Water Supply*, v. 23, n. 3, p. 1094–1108, 2023.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO (COMPESA). PSB Vol. I - Informações gerais - Botafogo: informações gerais e declaração de classificação da barragem quanto à categoria de risco e ao dano potencial associado. 2019.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO (COMPESA). Relatório preliminar – TASK 3: EEAB Botafogo 1. Energy Efficiency Study, 2021.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO (COMPESA). Relatório preliminar – TASK 3: EEAB Botafogo 2. Energy Efficiency Study, 2021.

CONSÓRCIO ENGECORPS E GEOAMBIENTE. Desenho técnico: Sistema Integrado Botafogo / Paulista. 2009. Nº 0000.

DEB, K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Hoboken: Wiley-Interscience, 2001.

DORIGO, M.; STÜTZLE, T. Ant colony optimization. Cambridge: MIT Press, 2004.

EGITO, T. B. do; AZEVEDO, J. R. G.; BEZERRA, S. T. M. Optimization of the operation of water distribution systems with emphasis on the joint optimization of pumps and reservoirs. *Water Supply*, v. 23, n. 3, p. 1094-1105, 2023.

ELSAYED, S. M.; SARKER, R. A.; ESSAM, D. L. A new genetic algorithm for solving optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 27, p. 57-69, 2014.

EUSUFF, M. M.; LANSEY, K. E. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129, n. 3, p. 210-225, 2003.

FILO, A. Artificial Intelligence Methods in Hydraulic System Design. *Energies*, v. 16, n. 8, p. 3320, 2023.

GEN, M.; CHENG, R. Genetic Algorithms and Engineering Design. New York: Wiley-Interscience, 2000.

GIACOMELLO, C.; KAPELAN, Z.; NICOLINI, M. Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 139, n. 2, p. 175-183, 2013.

GIUDICIANNI, C.*et al.* Overview of energy management and leakage control systems for smart water grids and digital water. *Modelling*, v. 1, p. 134–155, 2020.

GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading: Addison-Wesley, 1989.

HANG, H.; ZHANG, Y.; WANG, J. Optimization of water distribution systems considering reservoir utilization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 144, n. 10, p. 04018060, 2018.

HELMBRECHT, J.; PASTOR, M.; MOYA, C. Smart Solution to Improve Water-energy Nexus for Water Supply Systems. Springer, 2017.

HOLLAND, J. H. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

HUSSAIN, A.; MUHAMMAD, Y. S. Trade-off between exploration and exploitation with genetic algorithm using a novel selection operator. *Complex & Intelligent Systems*, v. 6, n. 1, p. 1-14, 2020.

KOO, K; GNAWALI, K; YUM, K. Optimization of Water Distribution Networks Using Genetic Algorithm Based SOP–WDN Program. *Water*, v. 14, n. 6, p. 851, 2022.

- LANSEY, K. E.; AWUMAH, K. Optimal pump operations considering pump switches. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 1, p. 17-35, 1994.
- LI, Z.; *et al.* Comparison of Searching Behaviour of Three Evolutionary Algorithms Applied to Water Distribution System Design Optimization. *Water*, v. 12, n. 16, p. 6225, 2020.
- LIN, M.; TSAI, J.; YU, C. A Review of Deterministic Optimization Methods in Engineering and Management. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2012, 2012.
- LOWE, M.; QIN, R.; MAO, X. A Review on Machine Learning, Artificial Intelligence, and Smart Technology in Water Treatment and Monitoring. *Water*, v. 14, n. 9, p. 1384, 2022.
- MAKAREMI, Y.; HAGHIGHI, A.; GHAFOURI, H. R. Optimization of pump scheduling program in water supply systems using a self-adaptive NSGA-II; a review of theory to real application. *Water Resources Management*, v. 31, n. 9, p. 2879–2894, 2017.
- MARLOW, D. R.; MOGLIA, M.; COOK, S.; BEALE, D. J. Towards sustainable urban water management: A critical reassessment. *Water Research*, v. 47, n. 20, p. 7150-7161, 2013.
- NEOENERGIA. Tarifas de Energia Elétrica Grupo A - Abril 2022. Disponível em: https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Documents/tarifas/NEOENERGIA_PERNAMBUCO_TARIFAS_ENERGIA_EL_ETRICA_GRUPO_A_ABRIL_2022_REH_3032.pdf. Acesso em: 21 jul. 2024.
- PUUST, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A.; KOPPEL, T. A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, v. 7, n. 1, p. 25-45, 2010.
- RAMOS, H. M. *et al.* Smart Water Grids and Digital Twin for the Management of System Efficiency in Water Distribution Networks. *Water*, v. 15, n. 6, p. 1129, 2023.
- RIBEIRO, J. M. A.; ANCHIETA, T. F. F.; LIMA, G. M.; BRENTAN, B. M. Análise de risco de ruptura de redes de distribuição de água via teoria de redes complexas. *Journal of Water Resources Management*, v. 36, n. 4, p. 567-580, 2023.
- ROSSMAN, L. A. EPANET 2: Users manual. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2000. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>. Acesso em: 23 maio 2024.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.
- SILVA, C. A.; CONSTANTINO, N.; REEKIE, L. J. Drinking water pump station design and operation for energy efficiency. The Water Research Foundation, 2015. Disponível em: <https://www.waterrf.org/research/projects/drinking-water-pump-station-design-and-operation-energy-efficiency>. Acesso em: 23 maio 2024.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Ministério das Cidades. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>. Acesso em: 20 out. 2023.

SOHAIL, A.; IDREES, M.; SAJJAD, M.; IFTIKHAR, S.; TUNC, S. Computational framework to explore the impact of environmental stress on epidemics. *Biomedical Engineering Applications, Basis and Communications*, v. 32, n. 1, p. 2050047, 2021.

SOUZA, D.; GUARDA, E.; SAUER, I.; TATIZAWA, H. Energy efficiency indicators for water pumping systems in multifamily buildings. *Energies*, v. 14, n. 21, p. 7152, 2021.

TAYFUR, G. Soft Computing in Water Resources Engineering. *Water Resources Management*, v. 31, n. 10, p. 3001-3016, 2017.

TZANAKAKIS, V. A.; PARANYCHIANAKIS, N. V.; ANGELAKIS, A. N. Water supply and water scarcity. *Water*, v. 12, n. 9, p. 2347, 2020.

YANG, C.; ZHANG, E.; SUN, D.; SHI, W.; CHEN, Y. Design Optimization of Hydraulic Machinery Based on ISIGHT Software: A Review of Methods and Applications. *Water*, v. 15, n. 11, p. 2100, 2023. D

ZOU, J.; ZHOU, W. Optimization of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms: A Comprehensive Review. *Water Resources Management*, v. 37, p. 512-530, 2023.