



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TUANE BATISTA DO EGITO

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM ÊNFASE NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE BOMBAS E OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS**

Recife

2022

TUANE BATISTA DO EGITO

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM ÊNFASE NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE BOMBAS E OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo

Coorientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra

Recife
2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

- E29o Egito, Tuane Batista do.
Otimização de sistemas de distribuição de água com ênfase na eficiência energética de bombas e operação de reservatórios / Tuane Batista do Egito. 2022.
135 f: figs., quads., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.
Coorientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.
Inclui referências e apêndices.
1. Engenharia civil. 2. Rede de distribuição de água. 3. Regras operacionais. 4. Algoritmo genético. 5. Eficiência energética. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de (Orientador). II. Bezerra, Saulo de Tarso Marques (Coorientador). III. Título.
- UFPE
- 624 CDD (22. ed.)
- BCTG / 2022 - 386

TUANE BATISTA DO EGITO

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM ÊNFASE NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE BOMBAS E OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 18/08/2022

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. José Almir Cirilo (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes (examinador externo)
Universidade Federal da Paraíba

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Elizabeth Amaral Pastich Gonçalves (examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Leidjane Maria Maciel de Oliveira (examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho à Deus, aos meus pais, as minhas irmãs, aos meus professores e a todos os meus amigos que direta e indiretamente contribuíram para eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus que me deu força e sabedoria para realizar esse trabalho tão importante para minha vida.

Aos meus pais Gilvan e Deneide, meus maiores incentivadores e que sempre acreditaram na educação como ferramenta de transformação e nunca mediu esforços para que eu chegasse até aqui.

A todos os meus professores, em especial ao professor José Roberto Azevedo, pela confiança e paciência em todo o processo deste trabalho e ao professor Saulo de Tarso pelas contribuições tão importantes para a pesquisa.

As minhas irmãs Tacila e Thayse que sempre estiveram comigo em cada etapa desse processo e me ajudaram para conclusão desse projeto.

A todos meus amigos que de forma direta e indiretamente contribuíram para a realização desse feito, em especial Batystuta Rocha, Iracleide Araújo e Patrícia Vidal por todo apoio e incentivo.

A Universidade Federal de Pernambuco e seus funcionários pela oportunidade e recursos oferecidos.

RESUMO

Os custos com energia elétrica para bombeamento em sistemas de distribuição de água representam a maior parte das despesas operacionais para o setor. Trazer melhorias para aumentar eficiência desses sistemas, e consequentemente redução desses custos, tem sido um dos grandes objetivos de diversos pesquisadores e técnicos da área de abastecimento de água. A grande quantidade de elementos, que podem mudar de estado (ligado/desligado) a qualquer momento, gera uma gama de possibilidades que dificulta a determinação de qual esquema operacional é mais eficiente. Definir as melhores regras de operação para sistemas de bombeamento é muitas vezes uma atividade complexa, por essa razão todos os elementos que compõem o sistema devem ser levados em consideração no momento da otimização. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um modelo de otimização para sistemas de distribuição de água que combina o uso eficiente de reservatórios com a melhor regra operacional para acionamento de sistemas de bombeamento. Utilizando o Algoritmo Genético junto com o simulador hidráulico EPANET e nova ferramenta *toolkit* WNTR, o modelo desenvolvido visa minimizar os custos operacionais com energia elétrica nos sistemas de abastecimento. Trabalhando com duas redes teste conhecidas no meio acadêmico, os resultados obtidos indicaram uma redução de aproximadamente 30% dos custos. Desta forma é possível constatar que o aproveitamento de toda a infraestrutura do sistema de distribuição de água, principalmente as de armazenamento de água, é possível reduzir os custos de energia elétrica do sistema como um todo.

Palavras-chaves: rede de distribuição de água; regras operacionais; algoritmo genético; eficiência energética.

ABSTRACT

Electricity costs for pumping in water distribution systems represent the majority of operating expenses for the sector. Bringing improvements to increase the efficiency of these systems, and consequently reducing these costs, has been one of the great goals of several researchers and technicians in the water supply area. The large number of elements, which can change state (on/off) at any time, generates a range of possibilities that makes it difficult to determine which operational scheme is more efficient. Defining the best operating rules for pumping systems is often a complex activity, for this reason all elements that make up the system must be taken into account when optimizing. In this context, the present work presents an optimization model for water distribution systems that combines the efficient use of reservoirs with the best operational rule for activating pumping systems. Using a Genetic Algorithm together with the EPANET hydraulic simulator and the new WNTR toolkit, the model developed aims to minimize operating costs with electrical energy in the supply systems. Working with two test networks known in academia, the results obtained indicated a reduction of approximately 30% in costs. In this way, it is possible to verify that the use of the entire infrastructure of the water distribution system, especially those for water storage, it is possible to reduce the electricity costs of the system as a whole.

Keywords: water distribution network; operational rules; genetic algorithm; energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do consumo e das despesas com energia elétrica das empresas prestadoras de serviço em saneamento de 2009 a 2019.....	22
Figura 2 - Representação explícita para programação de bombas.	29
Figura 3 - Representação implícita do acionamento das bombas pelo nível do reservatório...	30
Figura 4 - Fluxograma do algoritmo genético.	37
Figura 5 - Exemplo de codificação binária.....	41
Figura 6 - Exemplo de codificação real simplificada.	41
Figura 7 - Fluxograma da integração otimização com a simulação.	55
Figura 8- Exemplo de aplicação das regras operacionais no EPANET.	62
Figura 9 - Layout da rede teste Van Zyl <i>et al.</i> (2004)	66
Figura 10 - Padrão de demanda da rede Van Zyl <i>et al.</i> (2004).....	67
Figura 11 - Padrão da tarifa energética aplicada a rede Van Zyl <i>et al.</i> (2004).....	68
Figura 12 - Topologia da rede de distribuição Any Town (modificada).....	69
Figura 13 - Padrão de demanda da rede Any Town (modificada).....	72
Figura 14 - Tarifa energética da rede Any Town (modificada).....	73
Figura 15 - Comportamento do Tanque A para uma simulação de 10 dias.	76
Figura 16 - Comportamento do Tanque B para uma simulação de 10 dias.....	76
Figura 17 - Comportamento do Tanque A para a 1ª simulação.....	77
Figura 18 - Comportamento do Tanque B para a 1ª simulação.....	78
Figura 19 - Comportamento do Tanque A para a 2ª simulação.....	78
Figura 20 - Comportamento do Tanque B para a 2ª simulação.....	78
Figura 21 - Comportamento do Tanque A para a 3ª simulação.....	79
Figura 22 - Comportamento do Tanque B para a 3ª simulação.....	79
Figura 23 - Comportamento do Tanque A para a 4ª simulação.....	79
Figura 24 - Comportamento do Tanque B para a 4ª simulação.....	80
Figura 25 - Comportamento do Tanque A para a 5ª simulação.....	80
Figura 26 - Comportamento do Tanque B para a 5ª simulação.....	80
Figura 27 - Comportamento da BOMBA 1 antes (a) e depois (b) da otimização.	81
Figura 28 - Comportamento da BOMBA 2 antes (a) e depois (b) da otimização.	81
Figura 29 - Comportamento da BOMBA 3 antes (a) e depois (b) da otimização.	82
Figura 30 - Comportamento dos Tanques 65 (a), 265 (b) e 165 (c), antes da otimização.	84
Figura 31 - Comportamento dos Tanques 65 (a), 265 (b) e 165 (c), após a otimização.	86

LISTRA DE QUADROS

Quadro 1 - Experiências da aplicação da otimização em sistemas de abastecimento de água.	51
Quadro 2 - Instruções de controles simples e significados.....	62
Quadro 3 - Fator de demanda da rede Van Zyl <i>et al.</i> (2004).....	67
Quadro 4 - Tarifa energética aplicada a rede Van Zyl <i>et al.</i> (2004).....	68
Quadro 5 - Fator de demanda da Any Town (Modificada).	73
Quadro 6 - Tarifa energética aplicada a Any Town (modificada).....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Subpacotes do WNTR.	33
Tabela 2 - Classes do subpacote de rede do WNTR.....	34
Tabela 3 - Classes de simulação do WNTR.	35
Tabela 4 - Valores dos coeficientes das funções de penalidade.	61
Tabela 5 - Parâmetros de entrada do algoritmo genético.	63
Tabela 6 - Características dos nós da rede Any Town (modificada).....	70
Tabela 7 - Características das tubulações da rede Any Town (modificada)	71
Tabela 8 - Parâmetros de entrada do Algoritmo Genético.	74
Tabela 9 - Relatório de energia para a simulação antes da otimização.	75
Tabela 10 - Valores dos custos diários totais para cada execução da otimização para a rede Van Zyl <i>et al.</i> (2004).	77
Tabela 11 - Relatório de energia para a simulação antes da otimização.	83
Tabela 12 - Relatório de energia para a simulação após de otimização.	85
Tabela 13 - Comparação dos resultados para Rede Van Zyl <i>et al.</i> (2004).	87
Tabela 14 - Comparação dos resultados para Any Town (modificada).	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.1	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	20
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR DE SANEAMENTO	21
2.2	OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	23
2.2.1	Técnicas de otimização aplicadas em sistemas de abastecimento de água.....	23
2.2.2	Representação do problema de otimização	29
2.2.3	Simulação hidráulica para problemas de otimização em sistema de abastecimento de água	31
2.3	ALGORITMOS GENÉTICOS	35
2.3.1	Introdução	35
2.3.2	Componentes estruturais de um Algoritmo Genético	36
2.3.2.1	População inicial.....	38
2.3.2.2	Função de avaliação	38
2.3.2.3	Operadores genéticos	38
2.3.2.4	Critério de parada.....	40
2.3.2.5	Codificação	40
2.4	OTIMIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	42
3	METODOLOGIA.....	54
3.1	MODELAGEM PROPOSTA	54
3.1.1	Estrutura do modelo de otimização.....	54
3.1.2	Formulação matemática do modelo	55
3.1.2.1	Definição das variáveis	56
3.1.2.2	Função objetivo.....	56
3.1.2.3	Restrições do problema.....	58
3.1.2.4	Função de aptidão	60
3.1.3	Regras e controles operacionais de um sistema de abastecimento de água.....	61
3.1.4	Módulo otimizador.....	63

3.1.4.1	Algoritmo genético	63
4	APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	65
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	65
4.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA 1 – REDE TESTE HIPOTÉTICA VAN ZYL <i>et al.</i> (2004).	65
4.3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA 2 – REDE ANY TOWN (MODIFICADA).....	68
4.4	PARÂMETROS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS	73
4.5	RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO DA REDE VAN ZYL <i>et al.</i> (2004).	75
4.5.1	Simulação antes da otimização	75
4.5.2	Resultados depois da otimização	76
4.6	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DA REDE ANY TOWN (MODIFICADA)	82
4.7	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	86
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	89
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A - OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF PUMPING SYSTEMS AND RESERVOIRS OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS WITH EMPHASIS IN ENERGY EFFICIENCY	101
	APÊNDICE B - OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS WITH EMPHASIS ON THE JOINT OPTIMIZATION OF THE PUMPING SYSTEMS AND RESERVOIRS AIMING AT ENERGY EFFICIENCY	116

1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são cruciais para o desenvolvimento sustentável de qualquer região. A combinação entre mudanças climáticas, crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças no estilo de vida tem contribuído para aumento do consumo deste recurso pela sociedade. Sob esse aspecto, a crise hídrica e energética ocasionada por esses fatores tem sido listada como um dos três maiores riscos globais do século, tornando uma questão urgente a ser resolvida (ZHANG *et al.*, 2020; ZHEN *et al.*, 2020). Promover o uso sustentável desses recursos tem sido uma escolha inevitável para os gestores responsáveis pelos sistemas de abastecimento de água.

A escassez hídrica tem tornado a captação de água nos mananciais disponíveis para áreas urbanas cada vez mais oneroso, devido às grandes distâncias entre as novas fontes de captação e as cidades, com isso os sistemas de distribuição de água estão se tornando cada vez maiores e mais complexos. São raros os sistemas que operam apenas por gravidade, sendo necessário a utilização de estações elevatórias dotadas de conjuntos motor-bomba para recalcar a água a diversos pontos do sistema, resultando em elevados custos com energia elétrica.

Carvalho e Gomes (2012) apontam que sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário são responsáveis por aproximadamente 3% da energia consumida no mundo, onde 90% dessa energia se deve a utilização de equipamentos motor-bomba das estações elevatórias desses sistemas. Luna *et al.*, (2019) reforçam a informação, afirmando que o consumo de energia elétrica do setor da água a nível mundial representou 120 Mtep (tonelada equivalente de petróleo - aproximadamente 1,4GWh) em 2014, correspondendo a 4% do consumo total de eletricidade global.

Segundo Gomes (2009a) os custos de operação de sistemas elevatórios em redes de distribuição de água tem uma acentuação significativa nos últimos anos. Isso se deve a redução dos subsídios dados pelo poder público, no Brasil e no mundo, para a diminuição dos custos dos insumos água e energia, principalmente nas tarifas energéticas aumentando os custos energéticos nas empresas concessionárias de abastecimento de água.

No Brasil, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, ano base 2020 (SNIS, 2021), o consumo de energia elétrica das companhias de saneamento foi de 12,4 TWh, o que representa uma despesa significativa na sua gestão e operação. Em média, é consumido 0,73 kWh para cada metro cubo fornecido pelas empresas de saneamento brasileiras. Portanto, o uso eficiente da energia elétrica, permite uma redução

dos custos, melhor aproveitamento da infraestrutura civil e eletromecânica existente, além de postergar a aplicação de recursos para ampliação dos sistemas.

A redução de custos operacionais e perdas de energia em estações de bombeamento, e o uso de estratégias de gestão inteligente, como programação otimizada de bombas, são opções atraentes para empresas de água e autoridades de gestão (HELMBRECHT *et al.*, 2017; CIMORELLI *et al.*, 2020a). Porém, é importante ressaltar que o combate ao excesso de consumo de energia, não deve comprometer a qualidade no serviço de abastecimento.

Abdallah e Kapelan (2017) asseguram que a minimização dos custos com energia em sistemas de distribuição de água não é obtida apenas operando as bombas durante os períodos de baixa tarifa elétrica, mas também perto dos seus melhores pontos de eficiência, ou seja, uma bomba pode ter custos menores se operar durante um período de alta tarifa elétrica, mas com alta eficiência, em vez de funcionar durante um período de tarifa elétrica reduzida, mas com baixa eficiência.

No entanto, a operacionalização dos sistemas de abastecimento de água é uma atividade complexa. O grande número de elementos que pode ter seus estados (ligado/desligado, aberto/fechado) alterados a cada momento, gera uma gama de possibilidade operacionais, fazendo com que os técnicos tenham grande dificuldade em operacionalizar o sistema, onde muitas vezes essas decisões operacionais ficam vinculadas, apenas, à experiência desses profissionais, que raramente detêm conhecimento sobre a eficiência hidráulica e energética desses sistemas (PEDROSA FILHO, 2006; COSTA; DE CASTRO; RAMOS, 2010).

Devido à complexibilidade, o emprego de métodos de otimização se apresenta como uma ferramenta importante e adequada para aumentar a eficiência energética e, com isso, diminuir os custos com energia elétrica e a interferência humana nas decisões. Encontrar a solução ideal para esse tipo de problema não linear, com várias restrições, por meio de métodos determinísticos tradicionais, se limita a sistemas relativamente pequenos, que possuem espaços de busca reduzidos (ABKENAR *et al.*, 2015). Para problemas de larga escala, diversos estudos demonstram que os algoritmos meta-heurísticos fornecem uma abordagem mais eficiente para a busca de soluções ótimas.

A otimização não deve se restringir apenas a operação das bombas baseadas no tempo, é essencial ter uma visão macroeconômica de todo o sistema levando em consideração todos os elementos que o compõem, em especial os reservatórios. O acionamento das bombas, levando em consideração os níveis dos reservatórios, apresentam uma maior confiabilidade do sistema, pois é possível adaptar a operação das bombas a variabilidade das demandas, tendo uma

otimização quase em tempo real, por essa razão são frequentemente preferidos pelos operadores (MARCHI; SIMPSON; LAMBERT, 2016).

Chang *et al.* (2018) apontam que estudos anteriores verificaram a utilização dos reservatórios e suas características hidráulicas, e constataram que apenas 37,6% da capacidade total de armazenamento é utilizada na operação dos sistemas. Geralmente os reservatórios são projetados para manter sua operação no seu nível máximo, forçando os sistemas de bombeamento a acionarem várias vezes, proporcionando um consumo alto de energia elétrica.

Luna *et al.* (2019) também ressaltam que a seleção de níveis ideais dos reservatórios de nível variado (RNV) para controlar a operação da bomba tem apresentado bons resultados na minimização dos custos de energia. Pesquisas mostram que o uso de níveis otimizados economizou 20% do consumo de energia quando comparado a níveis de tanque fixos.

Com isso, é importante levantar que, para uma melhor eficiência de um sistema de abastecimento de água, não se deve apenas considerar uma otimização operacional do funcionamento das bombas, mas também um melhor aproveitamento de todo o sistema, principalmente dos reservatórios, a fim de obter uma economia maior no consumo de energia elétrica.

Dessa forma o uso eficiente de todos os elementos que compõem o sistema de distribuição de água, principalmente os reservatórios e bombas, juntamente com a otimização das operações desses elementos, é capaz de trazer uma redução significativa dos custos com energia elétrica para as empresas concessionárias responsáveis pelo setor.

À vista disso, essa pesquisa visa mostrar que o aproveitamento de toda a estrutura de um sistema de abastecimento de água, principalmente do volume útil dos reservatórios, tem influência significativa no consumo energético dos sistemas de bombeamento fazendo com que eles sejam menos solicitados e, conseqüentemente, minimizando os custos de operação (custo de energia). Num primeiro momento, é determinada a política ótima de armazenamento de cada tanque, que será imposta por uma restrição ao problema e, posteriormente, é feito o escalonamento ótimo das bombas por meio da aplicação do algoritmo genético.

1.1 JUSTIFICATIVA

O consumo elevado de energia elétrica pelas bombas é ocasionado por operarem de maneira deficiente e ineficiente. A maioria dos sistemas de bombeamento existentes são superdimensionados (muitos deles em mais de 20%), o que justifica a importância de abordar e corrigir essa ineficiência e desperdício de energia. Além de levar em consideração a crescente

consciência ambiental, que exige uma maior eficiência energética dos sistemas de abastecimento, portanto, um controle de bomba ideal (BAGLOEE; ASADI; PATRIKSSON, 2018).

Na maioria das empresas de abastecimento de água, a operação das bombas de um sistema não utiliza regras operacionais bem definidas, geralmente são determinadas de acordo com o conhecimento e experiência do operador, que muitas vezes se utilizam de parâmetros limitantes para definir qual a melhor estratégia operacional. A escolha de determinada operação pode descartar outras opções com melhores resultados operacionais para o sistema.

Segundo López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008), encontrar a programação ótima das bombas em um sistema de abastecimento de água é uma tarefa difícil para os gerentes desses sistemas. Isto pode ser devido a variação do consumo de água, a complexidade inerente dos sistemas e a estrutura tarifária de energia, que variam ao longo do dia de acordo com a demanda.

A redução com os custos total no bombeamento nos sistemas de abastecimento de água pode ser realizada por vários caminhos. Uma alternativa é a programação cuidadosa da operação das bombas, mudando a carga de trabalho para períodos de tarifa elétrica mais barata, trazendo como resultado a redução do consumo de energia elétrica. Outra alternativa, seria o bombeamento da água quando os níveis dos reservatórios estão mais baixos combinando as operações de diferentes bombas de forma mais eficiente.

Na abordagem voltada a otimização da programação das operações, o objetivo principal é definir o status de funcionamento das bombas (ligada ou desligada) em um determinado horário ao longo do dia. Embora os níveis dos reservatórios não sejam responsáveis pelo acionamento das bombas, a água é mantida dentro da faixa de volume específico para garantir o abastecimento. A aplicação dessa abordagem tem mostrado resultados importantes por diversos autores (PRASAD; LÓPEZ-IBÁÑEZ; PAECHTER, 2008; GIACOMELLO *et al.*, 2013; COSTA *et al.*, 2015).

Já na abordagem voltada ao nível dos reservatórios, as bombas são acionadas quando a água atinge seu nível mínimo e são desligadas quando atinge o nível máximo. A seleção dos níveis ótimos que determina as melhores regras operacionais para o acionamento das bombas é realizada por meio de um algoritmo de otimização, é também realizada levando em consideração a variação de preços da tarifa energética ao longo do dia, essa abordagem tem mostrado resultados promissores em algumas pesquisas como (VAN ZYL *et al.*, 2004; ALVISI; FRANCHINI, 2016; MARCHI; SIMPSON; LAMBERT, 2016).

Dependendo da rede em estudo, ambas as abordagens mostram resultados promissores. Geralmente os resultados apresentados pela programação de bombas são menores que o

controle por nível dos reservatórios, ele pode explorar melhor o período tarifário fora de pico e bombear durante o período tarifário de pico apenas quando for estritamente necessário. No entanto, requer um bom conhecimento das demandas de água e, devido à sua incerteza, o controle por nível dos reservatórios são frequentemente preferidos a fim de garantir uma maior confiabilidade do sistema. Para adaptar as operações da bomba à variabilidade das demandas, também é possível otimizar seu controle em tempo quase real (MARCHI; SIMPSON; LAMBERT, 2016; LUNA *et al.*, 2019).

Perante o exposto, é possível afirmar que a otimização nos sistemas de abastecimento de água não deve se restringir apenas ao funcionamento das bombas, um plano de eficiência energética pontual pode trazer resultados promissores, porém incompletos, por isso é importante ter uma visão macro de todo o sistema, considerando todos os elementos que o compõem. A utilização de níveis ideais dos reservatórios para controlar a operação da bomba foi bem-sucedida na minimização dos custos de energia. Pesquisas mostram que o uso de níveis otimizados economizaram 20% do consumo de energia quando comparado a níveis de tanque fixos (LUNA *et al.*, 2019).

Na busca de melhores respostas para a otimização, a combinação das abordagens dos níveis ótimos para acionamento e a programação das bombas mostra-se ser uma boa solução, apesar de poucas aplicações de ambas técnicas simultaneamente e de grande esforço computacional. Em algumas dessas abordagens, diferentes níveis de acionamento são usados durante diferentes períodos do dia, com o objetivo de reduzir a operação de bombeamento durante a tarifa de pico de eletricidade, mas ao mesmo tempo maximizar o bombeamento no período de tarifa fora de pico com esquemas de programação aprimorados (BLINCO *et al.*, 2016; LUNA *et al.*, 2019).

Outro fator importante é que o uso de ferramentas de monitoramento de sistema, hidroinformática, análise de dados, simulação, algoritmos de otimização, são aspectos essenciais que podem desempenhar um papel significativo na eficiência do sistema e apoiar a decisão em estruturas integradas de água e energia (LUNA *et al.*, 2019).

Apesar de inúmeras publicações nos últimos 30 anos, os problemas de otimização operacional em sistemas de distribuição de água estão longe de ser resolvidos. Isso se deve a complexidade do problema, a não precisão das formulações matemáticas do problema, ao número de variáveis envolvidas, e as especificidades de cada sistema, e também a falta de consenso sobre o melhor método de otimização que forneça a solução ótima global em um curto tempo computacional (ABDALLAH; KAPELAN, 2019).

Diante dessa problemática, o presente trabalho apresenta um modelo de otimização que combina o uso eficiente dos reservatórios de nível variado com a regras operacionais de acionamento dos sistemas de bombeamento. Utilizando o algoritmo genético, o modelo visa minimizar os custos operacionais com energia elétrica dos sistemas de distribuição de água, determinando estratégias de operação tanto nos reservatórios quanto nas estações elevatórias através da otimização. O método foi escolhido por ser uma técnica de simples implementação e com bons resultados em problemas semelhantes e bastante difundida no meio acadêmico principalmente em pesquisas na área de Recursos Hídricos.

Essas ações visam minimizar os custos operacionais com energia elétrica nesses sistemas, garantindo o atendimento a demanda e boa a prestação do serviço de fornecimento de água ao usuário final. Com isso alguns benefícios poderão ser vistos, como:

- Redução dos custos com manutenção de equipamentos, pois haverá uma redução no acionamento das bombas.
- Redução do valor da tarifa de água repassada ao usuário final, já que haverá uma redução dos gastos com energia elétrica para o abastecimento.
- Aplicação de procedimentos mais automatizados e mais controlados, não dependendo apenas da experiência do operador, evitando falhas humanas no processo.
- Redução de novos investimentos na operacionalização das redes de abastecimento, mediante que sua implantação não requer grandes custos de instalação.

1.1 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma ferramenta computacional que seja capaz de estabelecer estratégias operacionais para o acionamento das bombas de um sistema distribuição de água, garantindo que o uso otimizado dos reservatórios será respeitado, e trazendo como resultado uma redução dos custos com energia elétrica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo computacional baseado no método de otimização Algoritmo Genético para definir as melhores estratégias operacionais no sistema;
- Aplicar o modelo de otimização interligando o simulador hidráulico EPANET para avaliar o desenvolvimento de uma rotina operacional aplicável a qualquer sistema de distribuição de água.
- Analisar e interpretar os resultados obtidos para verificar se houve redução dos custos energéticos com a aplicação do modelo de otimização;
- Analisar a aplicação do modelo a outros modelos de rede para comprovar a sua eficácia.

2 REVISÃO DA LITERATURA

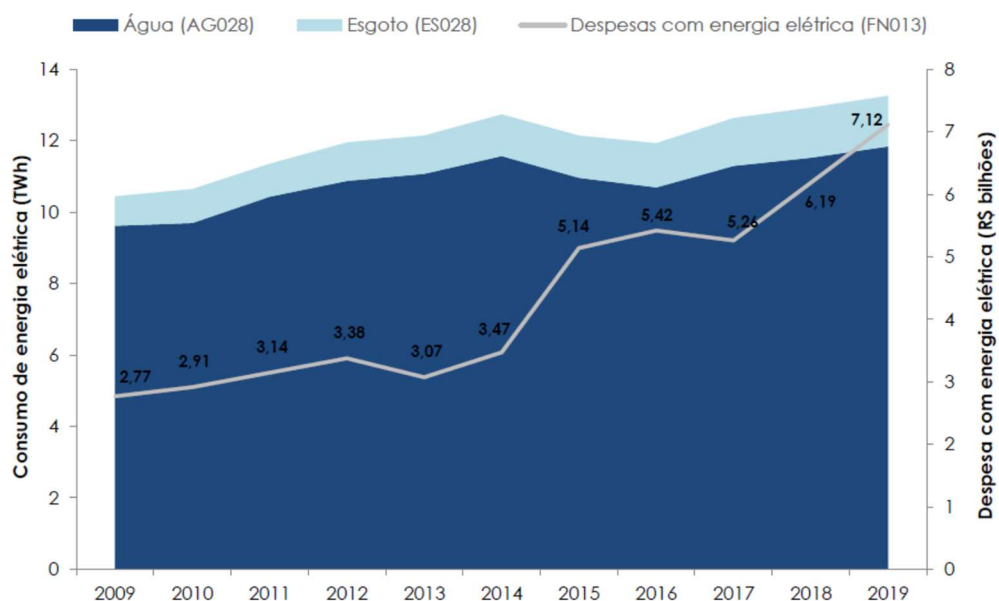
2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR DE SANEAMENTO

O setor de saneamento é responsável por uma parcela expressiva do consumo de energia elétrica. Segundo Cimorelli *et al.* (2020a), grande parte da demanda mundial de energia é destinada a estações de bombeamento em sistemas de abastecimento de água e redes de distribuição, o que corresponde a aproximadamente 4% do consumo total de eletricidade global. Nos Estados Unidos, o consumo anual líquido é de aproximadamente 75 bilhões de kWh, o que equivale a US \$ 4 bilhões (GIACOMELLO *et al.*, 2013; LUNA *et al.*, 2019).

No Brasil, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, ano base 2020 (SNIS, 2021), o setor de saneamento tem apontado uma tendência de crescimento no consumo de energia elétrica. Isso ocorre devido ao aumento no consumo de água, resultado da escassez hídrica e do aumento da população nos grandes centros, tornando necessário o aumento do volume de água produzido e exigindo sistemas de abastecimento mais complexos para o transporte e produção desses volumes de água. Dados de 2019, mostram que no Brasil, as despesas com energia elétrica das empresas prestadoras de serviço de saneamento atingiram o valor de R\$ 7,12 bilhões, com consumo de 13,9 TWh, onde 12,4 TWh foram utilizados para o abastecimento de água (SNIS, 2021).

Em 2015, houve um aumento substancial (em torno de 50%) das despesas das companhias brasileiras com energia quando comparado ao ano de 2014. O que justifica esse aumento foram os reajustes tarifário e o sistema de bandeiras que entraram em vigor neste ano, reforçando a importância de uma adequada gestão no setor energético pelos prestadores de serviço. No ano de 2018, as despesas com energia elétrica aumentaram em torno de 18% em comparação a 2017, em 2019 esses custos aumentaram em 15%, isso se deve aos reajustes nas tarifas de energia elétrica para serviços públicos de água e esgoto, a ampliação dos serviços de água e esgoto e a criação de novos sistemas. A Figura 1 explica melhor os dados supracitados mostrando a evolução do consumo e as despesas com energia elétrica das empresas de saneamento entre os anos de 2009 a 2019 (SNIS, 2020).

Figura 1- Evolução do consumo e das despesas com energia elétrica das empresas prestadoras de serviço em saneamento de 2009 a 2019



Fonte: SNIS (2020, p.100).

Outro fator que contribui para que os gastos com energia se tornem uma das principais despesas operacionais das empresas de saneamento é o aumento das tarifas. Esses gastos representam 30% dos custos totais, onde 95% desses custos estão relacionados as instalações de bombeamento (SNSA, 2018). Isso é decorrência das múltiplas crises energéticas de diferentes durações e faixas geográficas associadas as condições climáticas e a falta de investimento no setor que impactam diretamente no sistema hidrelétrico dominante no país (HUNT *et al.*, 2022).

Várias condições contribuem para esse excesso consumo de energia em sistemas de abastecimento de água: estações de elevatórias trabalhando de forma ineficiente, projetos inadequados de rede, falta de manutenção, tubos antigos com alta perda de carga, gargalos na rede de abastecimento, excesso de pressão nas redes e estratégias de operação ineficientes, dentre estas a ineficiência das estações elevatórias é a que mais se destaca. Diante da atual problemática, tem se cobrado das empresas de saneamento, grandes esforços no âmbito técnico, organizacional e financeiro, decorrência dos elevados custos com a produção e água e com energia elétrica, que é utilizada nas estações elevatórias para atender a demanda de consumo de água da população (FELDMAN, 2009; CAMBOIM; SILVA; GOMES, 2014).

A redução de custos operacionais e perdas de energia em estações de bombeamento, e o uso de estratégias de gerenciamento inteligentes, como programação otimizada de bombas,

são opções atraentes para empresas de água e autoridades de gerenciamento (HELMBRECHT; PASTOR; MOYA, 2017; CIMORELLI; D'ANIELLO; COZZOLINO, 2020b). Menke *et al.* (2015) afirmam que o controle da operação das bombas, de um sistema de abastecimento de água, pode trazer uma economia entre 10 a 20 % nos custos com energia elétrica.

Diante do cenário de uma crescente demanda por energia elétrica, o desenvolvimento e aplicação de ferramentas que incentivem o uso racional de energia elétrica e o combate as perdas de água por parte das empresas de saneamento tem crescido. As técnicas de supervisão e controle têm demonstrado excelentes resultados com relação à eficiência nos sistemas de abastecimento. Esses parâmetros têm interferência direta com os custos operacionais, o que mostra que o aumento da eficiência no setor de saneamento gera reduções significativas com relação aos custos e ao desperdício de água.

2.2 OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.2.1 Técnicas de otimização aplicadas em sistemas de abastecimento de água

Definir regras operacionais otimizadas é encontrar a melhor resposta para a operação de bombas e válvulas durante um período de tempo específico, geralmente 24 horas, onde todas as demandas devem ser atendidas e as condições de pressão na rede sejam satisfeitas, trazendo como resultado uma minimização dos custos operacionais.

Para Lansey e Awuhmah (1994), o grande desafio da otimização é fornecer um cronograma de operação da bomba, para o horizonte de planejamento, que tenha o menor custo de energia, limitando o seu número de acionamentos. Os autores afirmam que é possível obter uma economia no custo de energia a partir do uso adequado das bombas em conjunto com as vazões de entrada e saída dos tanques de armazenamento gerando um custo operacional mais baixo.

Para López-Ibáñez (2009), o problema de otimização do acionamento das bombas é difícil de resolver, devido ao seu grande espaço de busca, aos altos requisitos computacionais, à natureza não-linear e descontínua das redes de abastecimento e à diversidade e complexidade dos sistemas de distribuição de água no mundo real.

Uma vantagem da otimização nos sistemas de abastecimento é que medidas para aumentar a eficiência energética não precisam de uma intervenção estrutural. Pode ser implantado sem a necessidade de grandes investimentos, e os benefícios econômicos são vistos

em curto prazo (VILANOVA; BALESTIERI, 2014). Os autores colocam que a otimização operacional de um sistema de abastecimento de água pode ser realizada em quatro etapas:

1. Definição do problema de otimização (função objetivo);
2. Realização da modelagem computacional dos sistemas;
3. Calibração e validação do modelo hidráulico;
4. Simulação dos procedimentos de otimização.

Mas, otimização em sistemas de abastecimento não deve se restringir apenas a operação das bombas. Um plano de eficiência energética pontual pode trazer resultados promissores, porém incompletos, por isso, é relevante ter uma visão macro de todo o sistema, levando em consideração todos os elementos que o compõem. A avaliação do uso otimizado dos reservatórios de armazenamento de água tem sido levantada por vários pesquisadores. Chang *et al.* (2018) apontam que estudos anteriores verificaram a utilização dos reservatórios e suas características hidráulicas, e constataram que apenas 37,6% da capacidade total de armazenamento é utilizada. Geralmente, os reservatórios são projetados para manter sua operação no seu nível máximo, forçando os sistemas de bombeamento a acionarem várias vezes, proporcionando um consumo alto de energia elétrica.

Para um sistema de abastecimento ser considerado eficiente é necessário que todas as unidades operem de forma sistemática, principalmente os sistemas de armazenamento e de elevação da água. Com o melhor aproveitamento de todo o volume útil dos reservatórios é possível diminuir o número de partidas das bombas, e assim, obter uma economia maior no consumo de energia elétrica de todo o sistema.

Apesar de inúmeras publicações nos últimos 30 anos, os problemas de otimização operacional em sistemas de distribuição de água estão longe de serem resolvidos (ABDALLAH; KAPELAN, 2019). Isso se deve a complexidade do problema, a não precisão das formulações matemáticas do problema, ao número de variáveis envolvidas, e as especificidades de cada sistema. Os autores afirmam que ainda não há consenso sobre o melhor método de otimização que forneça a solução ótima global em um curto tempo computacional. Portanto, conhecimento de técnicas de otimização é fundamental para se encontrar a solução de problemas tão complexos.

Seguindo a ideia exposta anteriormente, Sarbu *et al.*, (2019, p.11) afirmam que:

Para resolver um problema de otimização, é necessário conhecer algumas técnicas de cálculo adequadas. As várias técnicas de otimização diferem, em essência, no modo de percorrer uma sequência de pontos no campo admissível e nos procedimentos que servem para acelerar a convergência para a solução pesquisada.

Os mesmos autores descrevem as técnicas de otimização em duas categorias essenciais:

1. Técnicas de otimização determinística: baseadas fundamentalmente no cálculo do gradiente da função objetivo e/ou avaliação de funções;
2. Técnicas de otimização heurística (estocástica): baseadas geralmente em pesquisas investigativas e fenômenos naturais ou mesmo em inteligência artificial. Pesquisas heurísticas que usam a função heurística de maneira estratégica são chamadas de métodos meta-heurísticos.

As técnicas determinísticas mais frequentemente aplicadas para a otimização são a programação linear, programação não linear, programação não linear inteira e programação dinâmica. Porém, a utilização dessas técnicas em rede reais é limitada devido à complexidade das resoluções das equações que garantem o equilíbrio da rede, à dificuldade de generalizar suas aplicações em qualquer sistema de abastecimento e ao excessivo tempo computacional necessário para seu desenvolvimento (COSTA; DE CASTRO; RAMOS, 2010).

Diante dessa dificuldade, os métodos meta-heurísticos surgem como uma alternativa para solucionar os problemas de otimização em sistemas de abastecimento. São métodos estocásticos que visam encontrar a solução do problema a partir de regras de probabilidade, dessa forma, a busca não é só feita na vizinhança, com isso eleva-se a chance de encontrar um ponto ótimo global. Todavia, o número de avaliações da função objetivo é superior ao requerido pelos métodos determinísticos para encontrar a solução ótima.

Voss (2000) define meta-heurística como uma técnica, que consiste em uma regra ou um conjunto de regras, que busca por boas soluções a um custo computacional razoável e em pouco tempo. Uma heurística fornece uma boa solução para relativamente pouco esforço, mas não garante a precisão dos resultados, e sim um conjunto de soluções possíveis para o problema.

Na década de 90, a otimização em sistemas de abastecimento de água sofreu uma forte mudança com a aplicação das meta-heurísticas. Na pesquisa operacional, uma meta-heurística é uma estratégia projetada para produzir um algoritmo de pesquisa parcial (heurística) que pode fornecer a solução ideal para um problema de otimização geralmente com dados incompletos ou imperfeitos, sendo definida como um algoritmo de alto nível, projetado para resolver desafios complexos de otimização (AWE; OKOLIE; FAYOMI, 2019).

Os métodos meta-heurísticos têm a vantagem de serem adequados, porém mais utilizados para resolver problema de otimização em sistemas de abastecimento. Embora, em

alguns casos com certo grau de complexidade, a solução ótima global não possa ser encontrada (o que é uma desvantagem conhecida), a vantagem é a capacidade de encontrar boas soluções aproximadas para o ótimo real em um período de tempo razoável e muito útil em grandes espaços de busca analiticamente complexos (LUNA *et al.*, 2019).

Devido a essas características, os métodos de otimização que utilizam meta-heurísticas se destacam quando comparados a otimização determinística, isso porque eles são capazes de resolver problemas complexos de otimização que nenhum algoritmo determinístico específico é capaz de resolver e por essa razão foi o método selecionado para o desenvolvimento dessa pesquisa.

As meta-heurísticas podem ser divididas em dois grupos. Algoritmos evolucionários, que se baseiam no comportamento coletivo de sistemas auto organizados, são geralmente bio-inspirados, como por exemplo, os algoritmos genéticos, otimização de enxame de partículas e otimização de colônias de formigas. E algoritmo de busca por vizinhança, que trabalham com uma única solução e investigam a melhor solução em sua vizinhança por meio de busca local. Exemplo desse algoritmo são Busca Tabu, *Greed Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP* e *Simulated Annealing*.

Na área de recursos hídricos, as meta-heurísticas tem sido, extensivamente, usada para diversas finalidades como na calibração de modelos, nos projetos e operações de sistemas de abastecimento de água entre outros (MAIER *et al.*, 2014). Dentre os métodos mais utilizados, se destacam os Algoritmos Genéticos. Esse algoritmo utiliza os princípios naturais de evolução para solucionar problemas, a forma de busca envolve várias gerações nas quais são melhoradas as características de potenciais soluções como na biologia.

Para comprovar a importância dos Algoritmos Genéticos para os recursos hídricos vários autores, como Savic (1997a) e Van Zyl *et al.* (2004), abordaram em suas pesquisas a otimização da operação das bombas em sistemas de abastecimento de água utilizando o algoritmo genético híbrido. Savic (1997b) utilizou uma abordagem de modelo multiobjetivo para aprimorar os resultados obtidos com os algoritmos genéticos. Já Van Zyl *et al.* (2004) utilizaram um modelo híbrido onde o algoritmo genético tradicional trabalhou em conjunto com o método de busca direta *Hillclimber*, os resultados obtidos demonstraram maior agilidade e melhores resultados quando aplicados na rede de distribuição de água em estudo.

Outros algoritmos evolucionários de otimização, também muito utilizados na engenharia, são os baseados em algoritmos de enxames, conhecida como Inteligência das Colônias ou Inteligência Coletiva. Estes algoritmos têm apresentado resultados significativos proporcionados por sua simplicidade, robustez e flexibilidade. Eles utilizam um método

construtivo para a obtenção da população inicial (possíveis soluções) e uma técnica de busca local para melhorar a solução da população, considerando que os indivíduos (soluções) dessa população são evoluídos de acordo com regras específicas que leve em consideração a troca de informações entre os indivíduos. Esse processo conduz a população a encontrar a solução ótima do problema.

As técnicas mais difundidas de otimização baseada na Inteligência de enxames são a otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization – PSO*) e a otimização por colônia de formigas (*Ant Colony Optimization – ACO*). O PSO é uma técnica de otimização estocástica baseada em exames. O algoritmo simula o comportamento social do animal, incluindo insetos, rebanhos, pássaros e peixes, onde esses exames trabalham de maneira cooperativa para encontrar comida, e cada membro dos enxames continua alterando o padrão de busca de acordo com as experiências de aprendizado próprios e de outros membros. A ideia principal do PSO é pesquisar simultaneamente grandes regiões no espaço de busca da solução da função objetivo a ser otimizada (WANG; TAN; LIU, 2017). Algumas pesquisas em recursos hídricos utilizaram o PSO como técnica de otimização. Suribabun e Neelakantan (2006) aplicaram o algoritmo para otimização de projetos de dimensionamento de redes de distribuição de água. Izquierdo *et al.* (2008) utilizaram o PSO para o projeto de redes e para detecção de vazamentos nas tubulações.

O algoritmo ACO é um método de otimização de inspiração biológica que se baseia no comportamento das formigas para otimizar o caminho entre o ninho e uma fonte de alimento. Essas formigas seguem uma trilha formada pelo depósito de uma substância química chamada feromônio que foi previamente colocada por outras formigas, quanto maior a quantidade de feromônio na trilha maior a probabilidade das demais formigas escolherem essa trilha. Maier *et al.* (2001) e Zheng *et al.* (2017) aplicaram o ACO para otimizar projetos de redes de abastecimento de água. Zecchin *et al.* (2006) realizaram um estudo sobre os parâmetros do ACO utilizados na otimização de redes. Ostfeld e Tubaltzev (2008) produziram parâmetros de projeto e operacionais de um sistema de abastecimento de água otimizado através do ACO, mas não introduziram nenhum cronograma de bombeamento. Já López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008) e Hashemi, Tabesh e Ataekia (2013) aplicaram o ACO para otimizar a operação das bombas em redes de abastecimento de água, e Jalali, Afshar e Mariño (2006) utilizaram o algoritmo na otimização da operação dos reservatórios dos sistemas.

O Algoritmo Genético (AG) é um método de otimização evolutiva amplamente utilizado em pesquisas relacionadas a área de recursos hídricos, principalmente, no dimensionamento de redes e na otimização operacional das bombas. Em vários trabalhos, como Deb (1999), Van Zyl

et al. (2004), Costa, Castro e Ramos (2010), Odan *et al.* (2014), Cimorelli *et al.* (2020a, 2020b), o AG tem se mostrado bastante adequado para lidar com problemas dessa natureza.

O AG tem se mostrado como um método eficiente para otimização de problemas não lineares, principalmente quando aplicados em sistemas de distribuição de água complexos. Esse algoritmo é inspirado na teoria da evolução de Darwin. Ele utiliza uma técnica de otimização baseada em populações usando representações codificadas de soluções. Depois de gerar uma população inicial aleatória, o AG determina a adequação de cada solução potencial, simulando-as e avaliando em uma função objetivo. Em muitos problemas de otimização, a função objetivo é baseada no custo, mas também pode ser formulada para outros objetivos. Todas as soluções, então, passam por operadores genéticos com base em princípios evolutivos - normalmente seleção, cruzamento e mutação - para produzir a próxima geração de soluções. Este processo é repetido para convergir em soluções ótimas ou quase ótimas. (BLINCO *et al.*, 2016; BAGLOEE; ASADI; PATRIKSSON, 2018).

O problema de programação da bomba em sistemas de abastecimento pode ser abordado como um problema paramétrico, onde cada parâmetro se refere ao acionamento da bomba por hora, que se ajusta muito bem à estrutura do algoritmo genético. O AG trabalha usando uma estrutura cromossômica onde cada cromossomo é composto pelas variáveis de decisão que determinam o estado de cada bomba (liga/desliga) definida a cada intervalo de tempo ou de acordo com os níveis de água nos reservatórios do sistema. Cada solução possível, conhecida como indivíduo, é definida por um conjunto de variáveis de decisão, ou seja, a definição do estado de todas as bombas do sistema para todas as etapas de tempo (24 h) (VAN ZYL *et al.* 2004; LUNA *et al.*, 2019).

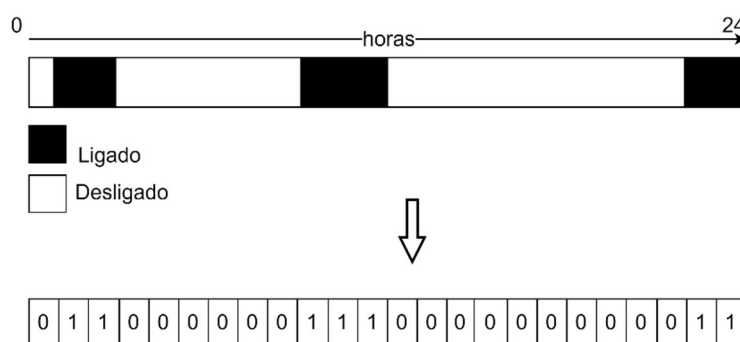
A aplicação do AG na otimização de sistemas de distribuição de água tem se mostrado significativamente melhor do que outras técnicas de otimização em relação a solução final e eficiência iterativa, e ainda são competitivos quando comparados com outros métodos de otimização hoje (BLINCO *et al.*, 2016). Pesquisas recentes demonstram que o uso do AG é capaz de fornecer excelentes soluções (e.g., LUNA *et al.*, 2019; CIMORELLI *et al.*, 2020a; CHEN *et al.*, 2021). Diante do exposto, a ferramenta de otimização, no qual foi desenvolvido este trabalho, é o Algoritmo Genético, pois além das vantagens acima ditas, ele é de fácil manipulação e adequação ao problema da pesquisa.

2.2.2 Representação do problema de otimização

As operações das bombas foram geralmente definidas dentro de um horizonte de tempo específico, 24 horas. Para apresentar estas operações, cada bomba recebeu uma representação específica que descreve uma sequência de variáveis de decisão como solução do problema de operação dentro deste horizonte de tempo.

A grande parte dos problemas operacionais de sistema de abastecimento são representados explicitamente ou implicitamente. As representações explícitas são aquelas que dividem o período de operação em vários intervalos de tempo e cada estado de acionamento da bomba é definido pela variável X_{bomba} , que determina se a bomba está desligada ou ligada a cada hora durante um dia de operação, ou seja, para o valor X igual a zero (0) define-se que a bomba está desligada, para o valor de X igual a um (1) a indicação é de que a bomba está ligada. A dimensão do espaço de busca para a solução do problema desse tipo é definida como $2^{(N \times T)}$, onde N é o número de bombas e T o tempo de análise (PRASAD; LÓPEZ-IBÁÑEZ; PAECHTER, 2008). Por exemplo, para um sistema com 2 bombas e um horizonte de análise de 24 horas o tamanho do espaço de busca é $2^{(2 \times 24)}$, totalizando em aproximadamente $2,82 \times 10^{14}$ possíveis soluções para o problema. A Figura 2 apresenta uma representação binária que define uma programação de bomba explícita baseada no tempo de acionamento.

Figura 2 - Representação explícita para programação de bombas

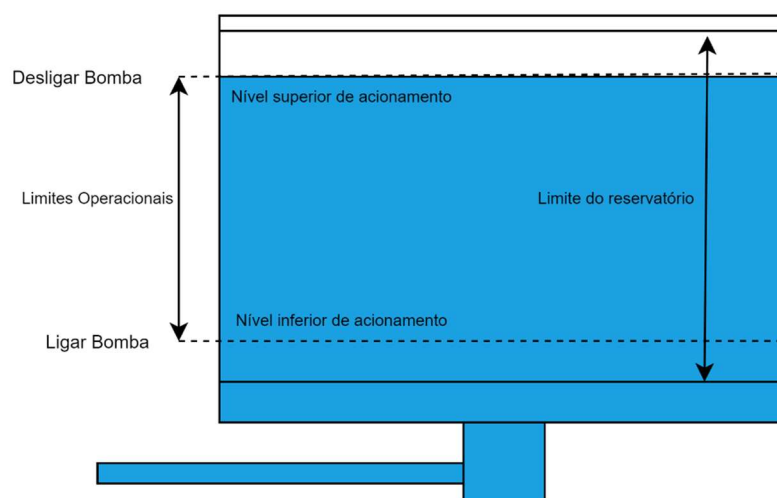


Fonte: Autor (2022).

Na representação implícita o funcionamento das bombas é definido em função das propriedades de outros elementos da rede, geralmente, os níveis de água dos reservatórios são utilizados para acionar a operação das bombas. O acionamento por nível dos reservatórios foi

usado para manter o nível de água dentro de uma faixa de operação, isto é, uma bomba é ligada quando o nível de água do reservatório atinge um limite inferior de operação e é desligada quando atinge o limite superior. Como as tarifas de energia são normalmente divididas em períodos de pico e períodos fora de pico, para cada período da tarifa é determinado um par de níveis de acionamento. A Figura 3 abaixo apresenta os níveis de acionamento e a faixa de operação do reservatório.

Figura 3 - Representação implícita do acionamento das bombas pelo nível do reservatório



Fonte: Autor (2022).

A representação explícita baseada no tempo de acionamento provou, em alguns trabalhos (LÓPEZ-IBÁÑEZ; PRASAD; PAECHTER, 2008; GIACOMELLO; KAPELAN; NICOLINI, 2013b; COSTA *et al.*, 2015), ter melhores resultados que a representação implícita baseada no acionamento das bombas pelo nível dos reservatórios. Isso ocorre porque é possível ter um maior controle no acionamento das bombas no período de tarifa mais baixo, ou seja, fora de pico, porém requer um bom conhecimento prévio das demandas de consumo. O acionamento por nível dos reservatórios são mais robustos e exigem uma estimativa menos precisa da previsão de demandas, as bombas serão acionadas para evitar o esvaziamento dos tanques para que os usuários não sofram interrupção do serviço. A desvantagem é o fato de serem um controle passivo e responderem apenas à hidráulica da rede, as bombas podem bombear mais do que o necessário no período da tarifa de pico e não no período fora do pico. Como geralmente há uma grande diferença entre o custo de energia elétrica no período fora de ponta e o período de ponta, o bombeamento excessivo no período tarifário de alto custo tem um grande efeito nos custos operacionais (MARCHI; SIMPSON; LAMBERT, 2016).

2.2.3 Simulação hidráulica para problemas de otimização em sistema de abastecimento de água

A simulação hidráulica é uma maneira de reproduzir o comportamento de uma rede real através de ferramentas computacionais. Essas ferramentas utilizam modelos matemáticos dos quais são capazes de representar satisfatoriamente os processos físicos, químicos e biológicos do sistema a ser estudado. Os sistemas de abastecimento de água não podem ser tratados como um laboratório de ensaios. Para isso, alguns operadores utilizam modelos de simulação hidráulica para diagnosticar as consequências de manobras nos componentes do sistema.

Com o avanço dos recursos computacionais, os simuladores vêm se aprimorando e estão sendo utilizados com maior frequência pelos operadores de sistemas de abastecimento de água, beneficiando a produtividade do trabalho e a precisão das análises solicitadas. Cunha (2009) aponta que no mercado existem diversos software de modelagem hidráulica como H2ONET, H2OMap Water, WaterCAD, Pipe2018, EPANET, etc. Sendo o EPANET o mais difundido por ser de domínio público e de fácil manipulação com diversas linguagens de programação.

O EPANET permite o acesso ao código fonte através do *toolkit* que consiste em uma biblioteca de funções de vínculo dinâmico (*Dynamics Link Library - DLL*) que auxiliam os programadores a realizarem o desenvolvimento de aplicações específicas, de acordo com as suas necessidades. A ferramenta *toolkit* permite a iteração entre os algoritmos de otimização elaborados em diversas linguagens de programação (Basic 6.0, Basic .NET, MATLAB, C #, Python e C ++) com as rotinas de cálculo do próprio simulador (NIÑO *et al.* 2018).

Existem outras ferramentas capazes de acessar o código fonte do EPANET, esse acesso é feito através dos componentes de software, chamados de plug-ins, que adicionam um recurso específico a um programa de computador existente. Eles permitem que desenvolvedores adicionem novos recursos para ampliar a funcionalidade de um aplicativo, fornecendo recursos extras que são atraentes em muitos campos (SELA; HOUSH, 2019). A tecnologia de plug-in é atraente porque mantém a interface original do programa enquanto adiciona novas funcionalidades. Um benefício importante dos plug-ins é a análise hidráulica aprimorada que supera a limitação de modelagem orientada pela demanda da versão atual do EPANET.

A Interface de Programação de Aplicativos (*Application Programming Interface - API*), *Water Network Tool for Resilience – WNTR* (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018), lançada pelo *Sandia National Labs (SNL)*, está incluída entre um dos novos *toolkits* de análise hidráulica. O WNTR se tornar acessível a partir do ambiente do usuário do EPANET por meio de um plug-in, melhorando os recursos de análise hidráulica que ele possui atualmente. Em tal

configuração, o EPANET atua como um intérprete da entrada-saída do WNTR (SELA; HOUSH, 2019).

O WNTR é um pacote Python projetado para simular e analisar a resiliência de redes de distribuição de água. A *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*, em parceria com *Sandia National Laboratories (SNL)*, desenvolveu o WNTR para integrar aspectos críticos da modelagem de resiliência para sistemas de distribuição de água em uma única estrutura de software. O WNTR possui uma API que é flexível e permite alterações na estrutura e nas operações da rede, juntamente com a simulação de incidentes disruptivos e ações de recuperação (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018).

Embora o EPANET inclua alguns recursos para modelar e analisar a resiliência do sistema de distribuição de água, o WNTR foi desenvolvido para estender ainda mais esses recursos. O WNTR fornece uma plataforma flexível para modelar uma ampla gama de incidentes perturbadores e estratégias de reparo, e simulação hidráulica de demanda para sistemas em condições de baixa pressão.

O WNTR é fundamentado no EPANET, portanto é necessário que os usuários tenham conhecimento prévio em hidráulica e modelagem de rede de dutos pressurizados antes de usar o WNTR. Além disso, o programa é compatível com pacotes de computação científica amplamente usados para Python, incluindo Numpy e Scipy para computação numérica eficiente, Pandas para análise de série temporal, NetworkX para topografia e análise da estrutura da rede, juntamente com Matplotlib e Plotly para gráficos e animações de alta qualidade. A combinação dessas ferramentas com a análise hidráulica e da qualidade da água permite que os usuários tenham uma maior facilidade e flexibilidade para criar análises personalizadas em sistemas de distribuição de água (KLISE *et al.*, 2017).

O modelo de rede de água usado no WNTR foi criado diretamente de um arquivo de entrada de modelo de rede de água formatado em EPANET INP. A estrutura e as operações da rede podem ser modificadas no WNTR e o modelo de rede de água WNTR resultante foi salvo de volta em um arquivo EPANET INP. Essa compatibilidade permitiu a alternância entre EPANET e WNTR (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018).

a) Estrutura do software

O WNTR é um pacote Python que possui vários subpacotes, cada subpacote contém classes, métodos e funções. As classes são usadas para gerar modelos de rede de água e executar simulações (KLISE *et al.* 2017). A Tabela 1, lista os subpacotes do WNTR.

Tabela 1 - Subpacotes do WNTR

SUBPACOTES	DESCRIÇÃO
Epanet	Contém a classe de compatibilidade EPANET 2.00.12 e métodos para WNTR.
Metrics	Contém funções para calcular a resiliência, incluindo hidráulica, qualidade da água, segurança da água e métricas econômicas. Métodos para calcular métricas topográficas estão incluídos no módulo <code>wntr.network.graph</code> .
Network	Contém classes e métodos para definir um modelo de rede de água, controles de rede, opções de modelo e representação gráfica da rede.
Scenario	Contém classes e métodos para definir cenários de desastres e curvas de fragilidade/sobrevivência.
Sim	Contém classes e métodos para executar simulações hidráulicas e de qualidade da água usando o modelo de rede de água.
Graphics	Contém funções para gerar gráficos.
Utils	Contém funções auxiliares.

Fonte: Klise *et al.* (2017).

b) Modelo de rede de água

No subpacote *network* inclui as classes que definem o modelo de rede de água, os controles e sua representação gráfica. Esses modelos podem ser construídos de arquivos INP e depois configurados para arquivos EPANET. A Tabela 2 apresenta todas as classes que são utilizadas pelo WNTR para configurar o modelo.

Tabela 2 - Classes do subpacote de rede do WNTR

CLASSES	DESCRIÇÃO
WaterNetworkModel	Classe para gerar modelos de rede de água, incluindo métodos para ler e gravar arquivos EPANET INP e acessar/adicionar/remover/modificar componentes de rede. Esta classe se vincula a classes de rede adicionais listadas abaixo para definir componentes de rede, controles e opções de modelo.
Junction	Classe para definir cruzamentos. Junções são nós onde as linhas se conectam. A água pode entrar ou sair da rede em uma junção.
Reservoir	Classe para definir reservatórios.
Tank	Classe para definir tanques. Os tanques são nós com capacidade de armazenamento.
Pipe	Classe para definir tubos. Tubos são linhas que transportam água.
Pump	Classe para definir bombas. As bombas são elos que aumentam a carga hidráulica.
Valve	Classe para definir válvulas. As válvulas são elos que regulam a pressão ou fluxo.
Curve	Classe para definir curvas. As curvas são pares de dados que representam uma relação entre duas quantidades. As curvas são usadas para definir curvas de bomba, eficiência, perda de carga e volume.
Source	Classe para definir fontes. As fontes definem a localização e as características de uma substância injetada diretamente na rede.
Demands	Classe para definir várias demandas por junção.
Pattern	Classe para definir padrões. Demandas, níveis de reservatório, horários de bombas e fontes de qualidade da água podem ter padrões associados a eles.
Control	Classe para definir controles. Os controles definem uma única ação com base em uma única condição.
Rule	Classe para definir regras. As regras podem definir várias ações e várias condições.
Options	Classe para definir opções de modelo, incluindo a duração da simulação e o intervalo de tempo.

Fonte: Klise *et al.* (2017).

c) Simuladores

O subpacote *sim* inclui as classes que executam as simulações hidráulicas de água no modelo de rede. A Tabela 3, lista essas duas classes.

Tabela 3 - Classes de simulação do WNTR

CLASSES	DESCRIÇÃO
EpanetSimulator	Ao usar o EpanetSimulator, o modelo de rede de água é gravado em um arquivo EPANET INP que é usado para executar uma simulação EPANET. Isso permite que o usuário execute simulações EPANET, enquanto aproveita as opções de análise adicionais no WNTR.
WNTRSimulator	O WNTRSimulator usa solucionadores Python personalizados para executar simulações hidráulicas por demanda e inclui modelos para simular vazamentos de tubos. O simulador inclui um modelo algébrico, que pode ser estendido para simular componentes ou comportamentos adicionais em modelos de rede de água. O WNTRSimulator não realiza simulações da qualidade da água.

Fonte: Klise *et al.* (2017).

Por essa facilidade de iteração entre o EPANET e o Python, a utilização desse software foi primordial para o desenvolvimento da pesquisa, considerando também a sua facilidade de manipulação dos dados e dos resultados simulados, quando comparado a ferramenta *Toolkit EPANET2*, muito usado por outros pesquisadores.

2.3 ALGORITMOS GENÉTICOS

2.3.1 Introdução

Os Algoritmos Genéticos (AG) é um método de otimização evolucionário, difundido por Goldberg e Holland (1989), pertencem a uma classe de algoritmo não determinístico que se baseia na Teoria da Evolução de Darwin, para solucionar problemas. A metodologia AG é fundamentada na mecânica da seleção natural, que combina a sobrevivência do mais apto com o intercâmbio de informações aleatórias entre os membros de uma “população” de soluções possíveis. A ideia principal do AG é uma atualização recorrente da população de soluções potenciais de uma solução individual em particular (VAN ZYL *et al.*, 2004; ALLAWI *et al.*, 2019).

Nesta técnica as soluções candidatas do problema coincidem com os indivíduos de uma população. A informação sobre os indivíduos é codificada por uma *string* chamada de cromossomo que é formado por genes. Esses cromossomos normalmente são compostos por representações binárias onde cada bit (gene) representa uma variável de decisão, e cada cromossomo é uma possível solução do problema. É uma técnica de busca aleatória, mas utiliza

de informações dinâmicas adicionais para orientar a pesquisa para o ponto ótimo, explorando eficientemente as informações históricas para encontrar novas soluções com expectativa de melhor performance (PEDROSA FILHO, 2006; ABKENAR *et al.*, 2015; CIMORELLI; D'ANIELLO; COZZOLINO, 2020b).

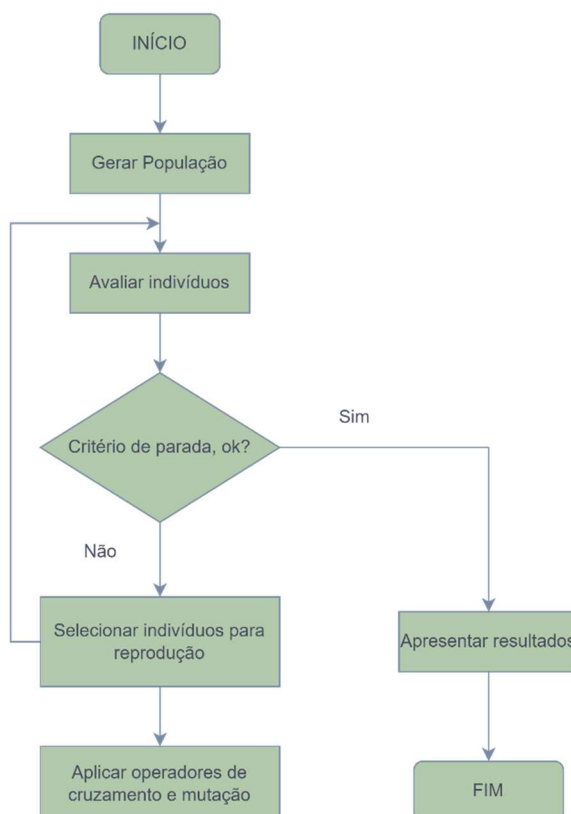
O AG trabalha com uma população inicial de indivíduos gerada aleatoriamente, através delas são selecionados novos cromossomos, ou seja, novas soluções para o problema, o processo de evolução de novos cromossomos é chamado de iteração. O algoritmo utiliza um operador de seleção que escolhe novos cromossomos atualizando a nova população com base na função objetivo do problema. Essa função é quem determina a qualidade de cada indivíduo como solução do problema, ou seja, a sua aptidão. Baseado na definição de Darwin para a evolução, aquele indivíduo com maior aptidão tem mais probabilidade de sobreviver e transmitir suas características para as próximas gerações, isto é, as soluções candidatas mais aptas com a função objetivo serão as que possivelmente possam ser a solução do problema.

Para a escolha das melhores soluções são utilizados os operadores de seleção. Eles se baseiam no conceito de “sobrevivência do mais apto” como o descrito na Teoria da Evolução de Darwin, e seleciona por meio da probabilidade as melhores soluções candidatas de acordo com a função objetivo. Os operadores de seleção utilizados no Algoritmo Genético são a seleção, cruzamento e mutação, estes serão descritos com mais detalhes na próxima seção.

2.3.2 Componentes estruturais de um Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos seguem uma estrutura onde cada etapa define um componente responsável por melhorar a solução a partir do seu refinamento até final do processo. A Figura 4 representa um fluxograma de cada etapa que o compõe. No primeiro momento, uma população inicial de cromossomos (as possíveis soluções do problema) é gerada aleatoriamente. Na próxima etapa, esses cromossomos são avaliados com base na função objetivo e as restrições do problema. O passo seguinte é avaliar se o critério de parada definido foi satisfeito, caso negativo, os cromossomos da geração serão selecionados através de um método de seleção, passam por um operador genético e um novo conjunto de soluções é gerada. Esse ciclo se repete até que o critério de parada do algoritmo seja respeitado (HILTON; CULVER, 2000; PINHO 2013).

Figura 4 - Fluxograma do algoritmo genético



Fonte: Autor (2022).

Para esclarecer cada etapa da estruturação do AG é importante explicar seus principais elementos a partir das seguintes definições:

- Cromossomo: conjunto de caracteres formada pelas variáveis de decisão do problema e representa uma possível solução do problema;
- Gene: unidade que compoem o conjunto de caracteres do cromossomo e que representa a variável de decisão do problema;
- População: formada por um conjunto de cromossomos onde cada cromossomo é uma possível solução do problema, ou seja, um conjunto de soluções;
- Geração: é a atividade executada pelo AG para avaliar cada solução do conjunto de soluções;
- Função de aptidão: é composta pela função objetivo em conjunto com as restrições do problema que será otimizada, essa função é responsável em avaliar as soluções até encontrar a melhor resposta para otimização.

2.3.2.1 População inicial

É o processo que determina o grupo de indivíduos do ciclo inicial do algoritmo. Pode ser gerada de maneira aleatória, onde existe a possibilidade da população não explorar todo o espaço de busca, sendo necessário um número maior de indivíduos. Ou pode ser determinada por meio de uma heurística, onde as características do problema são levadas em consideração. Neste caso, o AG pode encontrar boas soluções em pouco tempo. Porém, por ter um espaço de busca reduzido, a solução encontrada pode não ser a melhor.

2.3.2.2 Função de avaliação

A avaliação da população é realizada pela função de aptidão. Esta função é forma utilizada pelo o AG para determinar a qualidade de cada indivíduo como possível solução do problema (PINHO, 2013).

A função de aptidão representa o problema e o objetivo a ser alcançado. Para problemas restritivos, esta função é formada pela função objetivo e o somatório das penalidades referentes a cada restrição. Ela é responsável por grande parte do tempo computacional da otimização devido ao cálculo de cada solução possível de cada população em consecutivas gerações.

2.3.2.3 Operadores genéticos

Segundo Pedrosa Filho (2006) o contínuo refinamento de cada solução ocorre a partir da aplicação dos operadores genéticos a população atual em cada geração. Os principais operadores que compõem o AG são: seleção, cruzamento e mutação.

a) Seleção:

A seleção (ou reprodução) é o operador genético responsável por escolher a melhor sequência de indivíduos de um cromossomo dentro de uma população com base nos valores da função de aptidão. Geralmente é o primeiro operador aplicado em uma população. O processo seleção faz com que aqueles indivíduos que codificam estruturas bem-sucedidas produzam cópias com mais frequência tendo uma maior probabilidade de participar das futuras gerações. Segundo Katoch, Chauhan e Kumar (2020), os principais métodos de seleção são:

- **Roleta**: o método mapeia todos os possíveis indivíduos em uma roleta de maneira proporcional com o seu valor de aptidão. A roleta é girada aleatoriamente para selecionar soluções específicas que participarão da formação da próxima geração;
- **Classificação**: é uma forma modificada do método da Roleta, ele utiliza as classificações em vez do valor de aptidão. As classificações são atribuídas de acordo com o seu valor de aptidão para que cada indivíduo tenha a chance de ser selecionada de acordo com suas classificações. Este método reduz as chances da solução convergir prematuramente a solução para mínimos locais;
- **Torneio**: Nesta técnica os indivíduos são selecionados de acordo com seus valores de aptidão em uma roleta estocástica em pares. Após a seleção, os indivíduos com maior valor de aptidão são adicionados ao cromossomo da próxima geração, onde cada indivíduo é comparado com todos os $n-1$ outros indivíduos até atingir a população final de soluções;
- **Elitismo**: técnica de seleção proposta para melhorar o desempenho do método da Roleta. Garantindo que o indivíduo elitista em uma geração seja sempre propagado para a próxima geração. Se o indivíduo com o maior valor de aptidão não estiver presente na próxima geração após o procedimento de seleção normal, então o elitista também é incluído na próxima geração automaticamente.

b) Cruzamento (Crossover):

É utilizado após a operação de seleção, para recombinar dois cromossomos a fim de obter um cromossomo melhor. Nesta operação, o processo de recombinação cria indivíduos diferentes nas gerações sucessivas, misturando o material de dois indivíduos da geração anterior (VERICAT *et al.*, 2011).

Katoch, Chauhan e Kumar (2020), apontam que os três operadores mais comuns são:

- **Cruzamento de ponto único:** um ponto de cruzamento é selecionado aleatoriamente. As informações genéticas de dois pais que estão além desse ponto serão trocadas entre si. O primeiro segmento do cromossomo pai é unido com o segmento final do segundo cromossomo pai dando origem ao cromossomo filho;
- **Cruzamento de dois pontos ou k-pontos:** dois ou mais pontos de cruzamento aleatórios são selecionados e as informações genéticas dos pais serão trocadas de acordo com os cromossomos criados;
- **Cruzamento uniforme:** O cromossomo pai não pode ser decomposto em segmentos, ele pode ser tratado como cada gene separadamente, ou seja, os genes são repassados aos novos indivíduos através de uma máscara de cruzamento com a mesma probabilidade.

c) **Mutação:**

A mutação adiciona novas informações aleatoriamente ao processo de pesquisa genética, evitando que o algoritmo fique preso em ótimos locais. É um operador que introduz diversidade na população sempre que a mesma tende a se tornar homogênea devido ao uso repetido dos operadores de reprodução e cruzamento (VERICAT *et al.*, 2011).

2.3.2.4 Critério de parada

Nos processos de otimização, na maioria das vezes, os critérios de parada são determinados quando uma solução ótima local é obtida. Nos algoritmos evolucionários, como os Algoritmos Genéticos, os critérios de parada são determinados por outros parâmetros como a limitação do número de gerações produzidas, o tempo computacional de processamento, e/ou a convergência do algoritmo, ou seja, quando o resultado encontrado da função de aptidão em cada geração tem um valor aproximado.

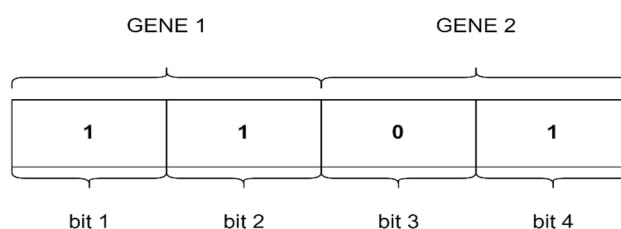
2.3.2.5 Codificação

Na maioria dos problemas computacionais, a codificação do problema desempenha um papel importante na otimização, ela gera um grande impacto no desempenho de busca das

melhores soluções. Cada problema apresenta a sua codificação própria de acordo com o seu domínio. Quanto mais adequado ao problema for a codificação, maior a qualidade dos resultados obtidos.

Nos AG existem duas codificações bastante utilizadas na otimização, a codificação binária (ou clássica) e a codificação real. Na codificação binária os genes (também chamados de bits) são representados pelos valores 0 e 1, cada bit representa as características da solução. Ela fornece uma implementação mais rápida e mais fácil de utilizar e manipular, além de ser mais simples de ser analisada. Porém para problemas com parâmetros contínuos esta representação não se apresenta como mais adequada, pois exigirá um maior esforço computacional e consequentemente mais tempo (PINHO, 2013; KATOCH; CHAUHAN; KUMAR, 2020). A Figura 5 apresenta uma amostra simples de uma codificação binária.

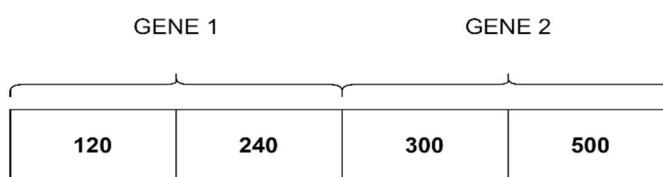
Figura 5 - Exemplo de codificação binária



Fonte: Autor (2022).

Na codificação real, o gene ou cromossomo é representada por uma sequência de valores reais. Este esquema de codificação pode ser útil para resolver os problemas nos quais valores mais complicados são usados. Os valores dos genes são mantidos dentro de um intervalo estabelecido pelas variáveis que eles representam. Naturalmente para cada representação deve haver operadores genéticos correspondentes. Na codificação real a ação dos operadores genéticos se dá em forma de funções matemáticas, diferentemente da codificação binária que trabalha com bits 0 e 1 (PEDROSA FILHO, 2006). A Figura 6 exemplifica uma codificação real simplificada.

Figura 6 - Exemplo de codificação real simplificada.



Fonte: Autor (2022).

Após a exposição do esquema básico para a implantação dos Algoritmos genéticos e suas principais habilidades é possível afirmar que o AG tem despontado como um método probabilístico de grande potencial na resolução de problemas que exigem grande combinação de soluções, como os problemas otimização de sistemas de abastecimento de água. Tem sido amplamente aplicado na comunidade científica, e tem se mostrado bem adequado para lidar com esse tipo de problema (ABKENAR *et al.*, 2015; LUNA *et al.*, 2019). No dimensionamento ótimo de rede destacam-se diversos autores (PRASAD; PARK, 2004; VAIRAVAMOORTHY; ALI, 2005; ZHENG; SIMPSON; ZECCHIN, 2011; RECA; MARTÍNEZ; LÓPEZ, 2017) assim como na área operacional (VAN ZYL *et al.*, 2004; COSTA; DE CASTRO; RAMOS, 2010; CIMORELLI; D'ANIELLO; COZZOLINO, 2020b; KARAMI *et al.*, 2020). Por essa razão este algoritmo foi implantado no problema dessa pesquisa.

2.4 OTIMIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos voltados a otimização em sistemas de abastecimento de água enfatizando a relevância do tema proposto no meio acadêmico tanto âmbito nacional quanto internacional.

Desde a década de 1970, várias pesquisas tem sido realizadas abordando a otimização operacional em redes de abastecimento de água, com foco principal na operação de bombas das bombas de um sistema (MALA-JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2018). A partir da década de 90, as pesquisas voltadas a otimização em redes de distribuição de água vêm se aprimorando, os primeiros trabalhos utilizaram técnicas determinísticas de otimização, mas com o passar dos anos e o avanço das técnicas computacionais outras técnicas de otimização vem sendo aplicadas e mostrando melhores resultados. A seguir será exposto uma cronologia de algumas pesquisas nessa área e que serviram de inspiração para esse trabalho.

Zessler e Shamir (1989) aplicaram a otimização em um sistema de abastecimento de água com oito reservatórios e sete estações de bombeamento utilizando um método Programação Dinâmica iterativa para encontrar a operação ótima das bombas. Dadas as demandas previstas para 24 horas, as condições iniciais e finais dos reservatórios, as propriedades hidráulicas de todos os componentes do sistema e a tarifa variável de energia ao longo do dia, o algoritmo percorre iterativamente as etapas de tempo (hora do dia) e subsistemas de rede, até encontrar um cronograma ótimo de operação das bombas.

Jowitt e Germanoupoulos (1992) mostraram que a programação linear, sujeita a um conjunto de premissas necessárias, pode ser usada para a solução do problema ótimo de

programação de bombas em uma rede de abastecimento de água, levando em consideração os encargos unitários e máximos de demanda. O método foi aplicado com sucesso a uma rede existente, para a qual se constatou que produzia reduções significativas nos custos de bombeamento. Os requisitos de tempo de computação foram considerados modestos, indicando a adequação do método para uso no controle em tempo real.

Lansey e Awuhmah (1994) utilizaram a programação dinâmica para determinar os cronogramas ideais de operação de bombas para sistemas de distribuição de água. Além de minimizar o custo de consumo de energia, o modelo inclui uma restrição para limitar o número de bombas que são ativadas durante o período de planejamento, dessa forma é possível, também, reduzir os custos com manutenção.

Yu, Powell e Sterling (1994) trabalharam com um método baseado em programação não linear para determinar a operação ideal de sistemas de distribuição de água com várias estações de bombeamento e reservatórios. O problema foi formulado e resolvido para que, dadas as demandas previstas para as próximas 24 horas, as condições iniciais e finais nos reservatórios, a unidade e a carga máxima de demanda de eletricidade e as restrições nas propriedades hidráulicas de todos os componentes do sistema, sejam otimizadas e o cronograma de bombeamento seja encontrado.

Ormsbee e Reddy (1995) também utilizaram a programação não linear para definir estratégias de operação de sistema de abastecimento de água, mas com uma vantagem adicional de fornecer várias soluções para o problema de controle, fornecendo ao operador do sistema maior flexibilidade na seleção de uma política específica.

Nitivattananon, Sadowski, Quimpo (1996) desenvolveram um modelo programação dinâmica de otimização para gerar horários de bombeamento em operação em tempo real para um complexo sistema de abastecimento de água considerando as principais dificuldades impostas por uma tarifa complexa, cargas de demanda e outras restrições físicas. O modelo decompõe no espaço e no tempo o sistema em vários subsistemas e os períodos de planejamento em períodos operacionais. As descargas das bombas são discretizadas e dispostas por métodos heurísticos para reduzir o número de vezes que as bombas são ligadas. Na operação em tempo real, a demanda mensal de faturamento é estimada por um modelo de longo prazo e então incorporada em um modelo de curto prazo para obter uma programação diária ótima em um tempo computacional relativamente curto.

Savic *et al.* (1997b) apresentaram um modelo multiobjetivo para programação de bombas utilizando os Algoritmos Genéticos para programação de bombas em sistemas de abastecimento de água. Os dois objetivos considerados são a minimização dos custos de energia

e manutenção. O acionamento da bomba é introduzido como uma medida substituta do custo de manutenção. O algoritmo multiobjetivo é comparado ao AG de objetivo único, com ambas as técnicas aprimoradas usando hibridização com um algoritmo de busca local.

Cembrano *et al.* (2000) desenvolveram uma ferramenta de controle ótimo utilizando a Programação Não – Linear, integrada a um Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados – SCADA para determinar a operação ótima de uma rede de distribuição de água de Zona de Sintra em Portugal.

Boulos *et al.* (2001) apresentaram um novo modelo de gestão, H2ONET Scheduler, para controle e operação ótimos de sistemas de distribuição de água. O modelo proposto faz uso dos algoritmos genéticos para determinar automaticamente a política de operação de bombas de menor custo para cada estação de bombeamento no sistema de distribuição de água, satisfazendo os requisitos de desempenho hidráulico desejados. O modelo resultante pode ser usado efetivamente para avaliar várias programações, otimizar as compensações de armazenamento/bombeamento, melhorar a eficiência operacional e garantir operações mais confiáveis.

Almeida e Barboza (2002) propuseram um modelo hidráulico de otimização utilizando dois algoritmos de programação não-linear associado a um algoritmo de programação inteira para obter políticas operacionais ótimas em sistemas de distribuição de água em período estendido de 24 horas, o modelo proposto faz a avaliação das influências das condições iniciais de reservação de um sistema de distribuição de água com relação ao consumo de energia elétrica associada às operações de um sistema de bombeamento de água. Os resultados mostraram uma redução de 36% do consumo de energia elétrica além de ser uma ferramenta de apoio a de decisão operacional.

Van Zyl *et al.* (2004), apresentaram um modelo híbrido de otimização que combina o Algoritmo Genético com o método de busca *Hillclimber*. As estratégias *Hillclimber* complementam os AGs por serem eficientes em encontrar um ótimo local. O método híbrido mostrou-se superior ao AG puro em encontrar uma boa solução rapidamente, tanto quando aplicado a um problema de teste quanto a um grande sistema de distribuição de água existente.

López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2005) apresentaram uma nova proposta abordando a eficiência energética como um problema multiobjetivo com várias alternativas para uma solução ótima, ou seja, para uma maior eficiência do sistema de abastecimento de água, não se deve apenas a minimizar o custo com o bombeamento, mas levar em consideração outras alternativas, que em conjunto podem trazer maiores e melhores resultados. A proposta

apresentada tem dois objetivos a serem alcançados: minimizar os custos com bombeamento e maximizar o tempo mínimo de parada.

Zecchin *et al.* (2006) utilizaram o *Ant Colony Optimazion* - ACO para otimização do dimensionamento de redes de abastecimento de água reduzindo os custos com implementação de novas adutoras, como também a substituição de alguns condutos de diâmetros menores sem comprometer o abastecimento.

Jalali, Afshar e Mariño (2006) empregaram o algoritmo ACO para determinar o volume ótimo de entrada de água do reservatório em vários intervalos de tempo, considerando a operação do reservatório um horizonte finito. Os autores apresentaram versões melhoradas do algoritmo ACO clássico para operação de um único e de múltiplos reservatórios.

Pedrosa Filho (2006) desenvolveu um modelo computacional, OTIMIZE, de apoio a decisão visando definir a melhor estratégia diária dos estados das bombas e válvulas de um sistema adutor real, o Sistema Adutor Marés localizado na cidade de João Pessoa, Paraíba. O modelo trouxe como resultado a minimização dos custos com energia elétrica utilizando Algoritmos Genéticos Simples na busca do ótimo operacional ao longo de 24 horas.

Albuquerque (2007) analisou vários métodos de otimização para otimizar o acionamento dos conjuntos motor-bomba do sistema principal sistema de abastecimento de Campina Grande, PB. Em suas análises foi aplicado Programação Linear, Programação Não-linear e Algoritmos Genéticos. Além de grandes diferenças no tempo computacional requerido, verificou-se que mudanças feitas nos valores das variáveis de decisão geram diferentes soluções, mesmo com esses resultados se observou uma economia no consumo de energia em torno de 17%.

Rao e Salomons (2007) apresentaram uma nova abordagem para o controle em tempo real e quase ideal de redes de distribuição de água, que faz parte integrante do projeto de pesquisa POWADIMA. O processo é baseado no uso combinado de uma rede neural artificial para prever as consequências de diferentes configurações de controle e um algoritmo genético para selecionar a melhor combinação. Por este meio, é possível encontrar as configurações ótimas, ou pelo menos quase ótimas, de bomba e válvula para o presente espaço de tempo, bem como aquelas até um horizonte de operação selecionado, levando em consideração as flutuações de demanda de curto prazo, a estrutura tarifária de eletricidade e restrições operacionais, como pressões mínimas de entrega, etc. Depois disso, as configurações de controle quase ideais para o presente passo de tempo são implementadas.

López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008) propuseram o controle ótimo de operação das bombas em um sistema de distribuição de água aplicando o ACO, com o objetivo de minimizar

os custos com energia elétrica. O estudo baseia-se em determinar previamente o número de acionamentos e o período em que as bombas devem estar ligadas.

Ostfeld e Tubaltzev (2008) demonstraram o uso da otimização ACO para projetos de redes de distribuição de água de pequeno porte tanto por gravidade, quanto por bombeamento, visando o menor custo de dimensionamento e operação. Os autores utilizaram o simulador hidráulico EPANET para verificar a confiabilidade do sistema, garantindo o fornecimento de água aos consumidores na quantidade e nas pressões necessárias.

Madadgar e Afshar (2008) propuseram uma mudança na proposta inicial do algoritmo ACO para operação ótima dos reservatórios de abastecimento de uma rede. A ideia central é incluir um operador de adaptação capaz de buscar um número maior de soluções ótimas de forma mais rápida e se adequar a qualquer mudança na busca das soluções.

Pasha e Lansey (2009) desenvolveram um modelo de otimização para solucionar o problema de operação das bombas em tempo real, utilizando a programação linear (PL). Este modelo PL pode ser resolvido muito rapidamente para uma solução “quase ótima”. Os dados on-line disponíveis podem ser incorporados para atualizar a programação a cada hora em tempo real.

Costa *et al.* (2010) também definiram estratégias operacionais para o funcionamento das bombas de um sistema de abastecimento de água, objetivando fornecer ao operador condições de operacionalidade nas estações elevatórias do sistema de forma racional, tendo como resultado a redução dos custos com energia elétrica. Para desenvolver seu trabalho, os autores utilizaram a otimização por Algoritmo Genético Simples e também por Algoritmo Genético Híbrido. A metodologia proposta, foi aplicada para três estudos de caso e os resultados obtidos nas três situações apontaram o resultado superior do Algoritmo Genético Híbrido com relação ao Algoritmo Genético Simples.

Gouveia (2012) propôs um modelo de dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água visando a eficiência hidráulica, energética e econômica. O objetivo principal do seu trabalho foi minimizar os custos totais do sistema, compreendidos pelos custos da tubulação e custos com energia de bombeamento com as bombas convencionais e os *boosters*. Os resultados obtidos foram um dimensionamento com pressões menores e mais adequadas resultando na diminuição das perdas de água e de energia no sistema.

Bezerra *et al.* (2012), apresentaram um sistema *fuzzy* para controlar a pressão em uma rede de distribuição de água, utilizando válvulas e controlando a velocidade de rotação dos sistemas de bombeamento. Utilizando um conversor de frequência o sistema rastreia a altura manométrica mínima do sistema de bombeamento, enquanto as válvulas de controle têm a

função de eliminar o excesso de pressão em diversos pontos da rede. Os experimentos realizados apontaram que o sistema é robusto o suficiente para controlar a pressão em uma rede de distribuição de água o que ajudaria na redução no consumo de água e de energia elétrica.

No trabalho de Giacomello *et al.* (2013) foi desenvolvido um método híbrido de otimização que utiliza programação linear e um algoritmo guloso, como solução para a otimização das operações da bomba em um sistema de abastecimento de água. Essa metodologia foi aplicada em dois estudos de caso, em uma rede fictícia e em uma rede de distribuição real localizada no Reino Unido. Os resultados obtidos demonstraram que o método híbrido proposto foi capaz de resolver problemas de programação da bomba de maneira eficiente em termos computacionais, preservando a precisão da solução obtida, tornando o método atraente para aplicação em programações de bombas em tempo real.

Odan (2013) estudou a confiabilidade à otimização da operação em tempo real de um sistema de abastecimento de água. Para alcançar seus objetivos foi utilizado o método de otimização AMALGAM – *A Multialgorithm Genetically Adaptive Method*, juntamente com o simulador hidráulico EPANET e com um previsor de demanda baseado na Rede Neural Dinâmica. O método foi aplicado em três redes de abastecimento da cidade de Araraquara, SP, e os resultados obtidos mostraram uma redução nos custos com energia elétrica de até 30%.

Silva (2014) desenvolveu um projeto de controlador adaptativo para modelar e controlar em tempo real um sistema de bombeamento de água por meio do uso simultâneo de válvulas de controle e conversor de frequência utilizado no acionamento de um conjunto motor-bomba, visando reduzir o consumo de energia elétrica e de água. Foi construído um protótipo do sistema de bombeamento com o intuito de modelar e identificar parametricamente o conjunto motor-bomba, assim como, projetar e implementar controladores adaptativos de Variância Mínima Generalizados auto ajustáveis, visando o controle da pressão nos ramis, utilizando no cálculo de controle os parâmetros identificados a cada instante de amostragem, considerando como dois sistemas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*).

Sousa e Soares (2015) aplicaram o Algoritmo Genético Multiobjetivo (*Strenght Pareto Evolutionary Algorithm – SPEA*) para determinar a eficiência de um sistema de abastecimento com três objetivos distintos: minimizar perdas por vazamentos de água; reduzir o custo de energia elétrica do volume bombeado e maximizar a confiabilidade do sistema em atender aos padrões de demanda.

Camboim, Silva e Gomes (2014) desenvolveram um sistema *fuzzy*, para controlar as pressões em redes de distribuição de água, utilizando conversores de frequência acoplados aos conjuntos motor-bomba. Devido ao grande número de possibilidades de combinações das

variações de velocidade dos conjuntos motor-bomba, com velocidades de rotação diferentes, faz com que o controlador *fuzzy* identifique a melhor opção, referente ao consumo energético do sistema, e tome a decisão alusiva ao estado dos motores (ligado, desligado ou com rotação parcial). Todo esse processo é realizado na condição de atender a demanda de vazão do sistema, além de manter a pressão constante com o menor consumo energético possível.

Menke *et al.* (2015) levantaram a importância da otimização na operação das bombas em um sistema de distribuição de água. Os autores afirmam que é possível uma economia de energia em torno de 20% com a operação otimizada das bombas. No seu trabalho, investigaram a utilização das aproximações lineares para resolver problemas desse tipo, apontando que seus resultados superaram as aproximações não-lineares, mantendo níveis comparáveis de precisão.

Em outro trabalho, publicado por Menke, Abraham e Stoianov (2016) propuseram uma modelagem para operação ótima de bombas de velocidade variável, visando a economia de energia. Nesta pesquisa, fizeram um relaxamento das características hidráulica de uma bomba, utilizando aproximações de modelos diferentes para a curva de potência, como velocidade da bomba e vazão volumétrica. Foi estudado também complexidade computacional e qualidade das soluções obtidas.

Makaremi, Haghighi e Ghafouri (2017) utilizaram o Algoritmo Genético de Ordenação não Dominada (*Nondominate Sorting Evolutionary Algorithm – NSGA II*) acoplado ao EPANET, para obter uma programação otimizada da operação das bombas de um sistema de abastecimento que apresenta um problema de otimização multiobjetivo, atendendo a duas funções objetivo: Custo de energia e número de acionamentos da bomba. O modelo foi aplicado à duas redes, uma fictícia e outra real e mostraram uma redução dos custos de energia em torno de 69%.

Zheng *et al.* (2017) também aplicaram o ACO para o dimensionamento de redes de abastecimento. Os autores utilizaram o algoritmo baseado no controle da trajetória de convergência dentro do espaço de decisão, especificando previamente o caminho a seguir, visando encontrar a melhor solução possível dentro de um limite de tempo computacional menor. O algoritmo ACOCTC (ACO – controlado) é demonstrado em seis problemas de projeto de sistemas de distribuição de água com complexidade variada. Os resultados mostram que a proposta ACOCTC habilita com sucesso as trajetórias de convergência especificadas a serem seguidas pelo ajuste automático do algoritmo.

Paola *et al.* (2017) propuseram uma solução para o problema de programação de bombas em uma rede de distribuição de água, utilizando um algoritmo modificado de otimização multiobjetivo, o *Harmony Search*. Os autores trabalharam com EPANET 2.0 acoplado ao

algoritmo para avaliar a viabilidade das soluções alcançadas. Os resultados mostram o alto desempenho da abordagem proposta para otimização de bombeamento, garantindo soluções ótimas (ou quase ótimas) com tempos computacionais curtos.

Barros Filho *et al.* (2017), desenvolveram um sistema baseado em redes neurais para rede de distribuição de água que operam com bombas em paralelo, o propósito do sistema é automatizar o processo e definir o estado de operação dos motores (ligado/desligado ou com velocidade de rotação parcial). Os resultados obtidos apontaram um excelente desempenho em termos de regularização de pressão e com isso espera-se que o controlador possa reduzir o consumo de água e de energia elétrica com o intuito de reduzir os custos de manutenção e aumentar a confiabilidade dos procedimentos operacionais.

Caballero e Ravagnani (2019) apresentaram um modelo de Programação Não Linear Integral Disjuntiva (MINLP) com o objetivo de minimizar os custos com dimensionamento de rede de distribuição de água, considerando direções de fluxo desconhecidas. O projeto ideal de uma rede de distribuição de água é um problema complexo e quando as direções de fluxo não são conhecidas a priori, essa complexidade é aumentada. Entretanto, com técnicas apropriadas, é possível linearizar equações não-lineares e evitar complexidades desnecessárias. No presente trabalho, um modelo de otimização do MINLP para o dimensionamento de redes foi desenvolvido propondo estratégias para evitar não-linearidades nas equações e tendo como modelo resultante um projeto mais simples e fácil de trabalhar.

Abdallah e Kaplan (2019) desenvolveram um novo método de otimização chamado programação iterativa de metas lexicográficas estendidas (iELGP) para otimizar o custo de energia e a qualidade da água em redes de água com uma combinação de bombas de velocidade fixa e bombas de velocidade variável. Os resultados obtidos mostram a capacidade do método iELGP em otimizar o custo de energia e a qualidade da água em redes de água de forma computacionalmente muito eficiente. Eles também mostram que o método pode identificar programações de bombeamento de baixo custo de energia e fazer isso mais rapidamente. O uso de bombas de velocidade variável em vez de bombas de velocidade fixa melhora a qualidade da água e diminui os custos de energia e manutenção relacionados nas redes de água.

Luna *et al.* (2019) desenvolveram um método de otimização híbrido utilizando o algoritmo genético para otimizar a programação de bombeamento durante o dia, e assim melhorar a eficiência energética de um sistema de abastecimento de água, minimizando os custos de operação. O modelo desenvolvido trabalhou com a introdução de solução viáveis conhecidas dentro da população e com mecanismos de mutação seletiva aumentando a convergência do algoritmo. Além da redução dos custos com energia elétrica o trabalho também

propôs uma redução nas emissões de dióxido de carbono associadas ao acionamento das bombas trazendo uma melhoria significativa para as questões ambientais.

Cimorelli, D’Aniello e Cozzolino (2020b) apresentaram uma nova proposta para a representação da variável de decisão, especificamente adequada para sistemas de bombeamento paralelo, capaz de melhorar ainda mais o desempenho de um Algoritmo Genético. A pesquisa mostra que, apesar da falta de suporte na literatura, um AG bem projetado é capaz de resolver problemas de programação de bombas sem esforço.

Chen *et al.* (2021) desenvolveram um modelo de otimização para simplificar um sistema simulado de dois estágios (ou seja, estações de bombeamento de captação e distribuição de água). Estratégias de otimização foram desenvolvidas com base em uma abordagem de controle de *feedback* de nível dinâmico. O algoritmo genético NSGA-II foi usado para resolver o problema de otimização multiobjetivo. As otimizações orientadas por custos e por energia foram propostas sob a perspectiva de confiabilidade, economia e durabilidade da operação da estação de bombeamento. Os resultados mostram que, em comparação com a estratégia existente atualmente utilizada, as estratégias de otimização orientadas a custo e energia desenvolvidas neste estudo podem reduzir os custos operacionais de energia do sistema em 7,0% e 6,2%, e ter estabilidade satisfatória sob a condição de demanda incerta de água.

Jafari-Asl *et al.* (2021) apresentaram um novo algoritmo inspirado na natureza baseado em população para a programação de bombeamento de sistema de abastecimento de água. O algoritmo de libélula binário baseado em uma nova função de transferência, foi primeiramente implementado e avaliado em um exemplo de teste e depois em uma estação de bombeamento de água real. A comparação do método proposto com outros algoritmos como o algoritmo genético (GA), algoritmo evolutivo (EA), otimização de colônia de formigas (ACO), otimização de enxame de partículas (PSO) foi realizada no exemplo teste, enquanto os resultados obtidos indicam que o modelo proposto é computacionalmente mais eficiente e confiável. Os resultados do estudo de caso real mostram que apesar de considerar todas as diferentes restrições do problema, o modelo pode diminuir o custo de energia em até 27% em comparação com o estado atual de operação.

Salvino, Gomes e Bezerra (2022) desenvolveram um controlador de rede neural artificial (RNA) para melhorar a operação de sistemas de distribuição de água incluindo o consumo de energia elétrica como parâmetro de decisão. A técnica foi aplicada para controlar as pressões em uma configuração experimental que simula uma rede de distribuição de água com duas zonas de consumo com topografias diferentes. Para analisar o desempenho do controlador, foram realizados testes com cenários diferentes de demanda, introduzindo

perturbações e alterando os pontos de ajuste de pressão. Os resultados experimentais mostraram que o controlador proporcionou uma redução do consumo de energia elétrica entre 15,1 a 17,8%.

O Quadro 1 apresenta um resumo de todas as experiências anteriormente citadas expondo pesquisas que utilizaram a otimização para operação e dimensionamento em sistemas de abastecimento de água.

Quadro 1 - Experiências da aplicação da otimização em sistemas de abastecimento de água

Continua

Autores	Abordagens
Zessler e Shamir (1989)	Operação ideal das bombas de um sistema de distribuição de água de pequeno porte utilizando a otimização por programação dinâmica
Jowitt e Germanoupoulos (1992)	Operação ideal das bombas utilizando a programação linear, considerando a tarifa energética e a demanda para um período de 24 horas. Metodologia robusta com baixo tempo computacional, adequado para otimização em tempo real.
Lansey e Awhmah (1994)	Operação ideal das bombas para redes de distribuição de água de pequeno e médio porte para tempo real e para horizontes de tempo mais longos utilizando a otimização por programação dinâmica.
Yu, Powell e Sterling (1994)	Operação ideal das bombas para sistemas de distribuição de água com várias estações de bombeamento e reservatórios utilizando a programação não linear.
Ormsbee e Reddy (1995)	Definição de estratégias de operação das bombas utilizando a programação não linear. O modelo fornece um número maior de soluções para o problema, dando maior flexibilidade para a seleção de uma operação específica.
Nitivattananon, Sadowski, Quimpo (1996)	Definição da operação ideal das bombas em tempo real utilizando a programação dinâmica combinada com métodos heurísticos para reduzir o número de vezes que as bombas são ligadas.
Savic, Walters e Schwab (1997)	Operação ideal das bombas através de um modelo multiobjetivo utilizando o Algoritmo Genético híbrido para obter a redução dos custos de energia e manutenção do sistema.
Cembrano <i>et al.</i> (2000)	Definição da operação ideal das bombas usando a programação não linear integrada a um sistema de supervisão, controle e aquisição de dados – SCADA.
Boulos <i>et al.</i> (2001)	Modelo de gestão – H2ONET Scheduler, para controle e operação das bombas utilizando o Algoritmo genético.
Almeida e Barboza (2002)	Operação ótima das bombas através de um modelo de otimização que utiliza a programação não linear associado a um algoritmo de programação inteira.

Quadro 2 - Experiências da aplicação da otimização em sistemas de abastecimento de água

Continuação

Autores	Abordagens
----------------	-------------------

Van Zyl, Savic e Walters (2004)	Operação ótima das bombas utilizando um modelo híbrido de otimização que combina o Algoritmo Genético e o método de busca <i>Hillclimber</i> .
López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2005)	Nova proposta abordando a eficiência energética como um problema multiobjetivo, com dois objetivos a serem alcançados: minimizar os custos de bombeamento e maximizar o tempo mínimo de parada.
Zecchin <i>et al.</i> (2006)	Otimização no dimensionamento de redes de distribuição de água utilizando o algoritmo de otimização <i>Ant Colony Optimization - ACO</i>
Jalali, Afshar e Mariño (2006)	Otimização da operação dos reservatórios utilizando o algoritmo de otimização ACO.
Pedrosa Filho (2006)	Definição das estratégias operacionais de operação das bombas e das válvulas de um sistema adutor real através do modelo computacional OTIMIZE que utiliza o algoritmo genético simples como algoritmo de otimização.
Albuquerque (2007)	Otimização operacional de um sistema real utilizando a programação linear, não linear e o algoritmo genético.
Rao Salomons (2007)	Operação ideal de uma rede de distribuição de água em tempo real usando uma rede neural artificial e o um algoritmo genético
López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008)	Controle ótimo de operação das bombas utilizando o algoritmo de otimização ACO.
Ostfeld e Tubaltzev (2008)	Projeto e operação ideais de rede de distribuição de água, incluindo custos de construção e custos operacionais anuais usando ACO.
Madadgar e Afshar (2009)	Mudanças na proposta inicial do ACO para a operação ótima dos reservatórios de abastecimento de uma rede de distribuição de água.
Pasha e Lansey (2009)	Operação ideal das bombas em tempo real utilizando a programação linear.
Costa <i>et al.</i> (2010)	Operação ideal das bombas utilizando um algoritmo genético híbrido.
Gouveia (2012)	Criação de um modelo para o dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água.
Bezerra <i>et al.</i> (2012)	Apresentação de um sistema <i>fuzzy</i> para controlar a pressão em redes de distribuição de água utilizando válvulas e controlando a velocidade de rotação das bombas através de um conversor de frequência.
Giacomello <i>et al.</i> (2013)	Otimização da operação das bombas através de uma modelo híbrido que utiliza a programação linear em conjunto com um algoritmo guloso.
Odan (2013)	Operação ideal da bomba em tempo real, incluindo previsão de demanda e confiabilidade operacional do sistema usando um método multialgoritmo geneticamente adaptativo (AMALGAM).
Silva (2014)	Projeto de controlador adaptativo para modelar e controlar em tempo real um sistema de bombeamento de água por meio do uso simultâneo de válvulas de controle e conversor de frequência.
Sousa e Soares (2014)	Minimizar as perdas por vazamentos, reduzir os custos com energia elétrica e maximizar a confiabilidade de um sistema de abastecimento de água utilizando o Algoritmo genético multiobjetivo.

Quadro 3 - Experiências da aplicação da otimização em sistemas de abastecimento de água

Autores	Abordagens
Camboin, Silva e Gomes (2014)	Redução dos custos energéticos a partir do controle de pressão em redes de distribuição de água, utilizando conversores de frequência acoplados aos conjuntos motor-bomba
Menke <i>et al.</i> (2015)	Utilização de aproximações lineares para aumentar a eficiência da otimização em sistemas de distribuição de água.
Menke, Abraham e Stoianov (2016)	Modelagem para operação ótima de bombas de velocidade variável visando a economia de energia elétrica
Makaremi, Haghighi e Ghafouri (2017)	Programação otimizada da operação das bombas utilizando o Algoritmo Genético de Ordenação não Dominada (<i>Nondominate Sorting Evolutionary Algorithm – NSGA II</i>)
Zheng <i>et al.</i> (2017)	Dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água utilizando o ACO controlado (ACOCTC).
Paola <i>et al.</i> (2017)	Operação ideal das bombas utilizando o algoritmo de otimização multiobjetivo <i>Hamony Search</i>
Filho <i>et al.</i> (2018)	Automação da operação das bombas a partir de um sistema baseado em redes neurais adaptado para redes de distribuição de água.
Caballero e Ravagnani (2019)	Modelo de Programação Não Linear Integral Disjuntiva (MINLP) para minimizar os custos com dimensionamento de rede de distribuição de água.
Abdallah e Kapelan (2019)	Novo método de otimização chamado programação iterativa de metas lexicográficas estendidas (iELGP) para otimizar o custo de energia e a qualidade da água em redes de água com uma combinação de bombas de velocidade fixa e bombas de velocidade variável.
Luna <i>et al.</i> (2019)	Operação ideal das bombas utilizando um método de otimização híbrido com algoritmo genético.
Cimorelli, D’Aniello e Cozzolino (2020b)	Nova proposta para representação das variáveis de decisão do problema de otimização que melhora o desempenho do algoritmo genético aumento a eficiência de operação em sistemas de abastecimento de água.
Chen <i>et al.</i> (2021)	Operação ideal das bombas visando a economia e a confiabilidade da operação utilizando o algoritmo genético NSGA-II.
Jafari-Asl <i>et al.</i> (2021)	Operação ideal das bombas utilizando um novo algoritmo, o algoritmo de libélula binário.
Salvino, Gomes e Bezerra (2022)	Utilização de um controlador de rede neural artificial (RNA) para melhorar a operação de sistemas de distribuição de água incluindo o consumo de energia elétrica como parâmetro de decisão.

Fonte: Autor (2022)

3 METODOLOGIA

3.1 MODELAGEM PROPOSTA

3.1.1 Estrutura do modelo de otimização

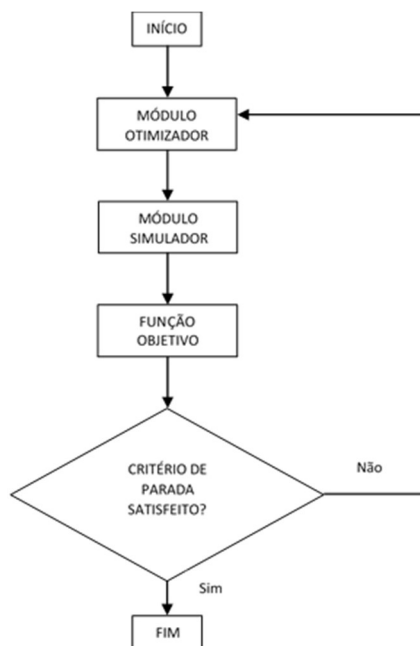
Definir as melhores estratégias operacionais de um sistema de abastecimento requer uma robusta estrutura computacional que seja capaz de resolver esse problema, para isso foi necessário o trabalho em conjunto de dois módulos, o otimizador e o simulador. Primeiramente, definiu-se o módulo otimizador que usou um algoritmo de otimização para definir as melhores soluções para o problema a partir da análise de uma função objetivo pré-definida e suas restrições. Por último adotou-se um módulo simulador que teve como objetivo avaliar as soluções encontradas no módulo otimizador observando o balanço hidráulico do sistema, a sua viabilidade e o custo com energia.

No módulo otimizador, o algoritmo escolhido para pesquisa foi o Algoritmo Genético por ser uma meta-heurística de simples implementação e que vem apresentando resultados satisfatórios em problemas de otimização combinatória como o caso do problema de acionamento de bombas. Trabalhos mais antigos como Mackle, Savic e Walters, (1995); Boulos *et al.* (2001); Van zyl *et al.* (2004), quanto trabalhos mais recentes Karami *et al.* (2020); Cimorelli *et al.* (2020a) tem comprovado essas afirmações.

A simulação hidráulica do modelo foi realizada pelo EPANET (ROSSMAN, 2000), um programa computacional de domínio público (freeware) e bastante difundido entre os profissionais da área de hidráulica em todo mundo. O EPANET tem por função simular o comportamento dos sistemas de distribuição de água em regime permanente, através da execução de simulações estáticas e dinâmicas e que, devido à possibilidade de acesso ao seu código fonte, é possível a interligação do módulo otimizador para a solução de problemas específicos como a busca por estratégias operacionais mais eficiente para o sistema.

A Figura 7 ilustra o fluxograma da integração entre os módulos otimizador e simulador, essa estrutura foi aplicada para problemas de otimização em sistemas de abastecimento de água como utilizados por Pedrosa Filho (2006) e Costa (2010) para o dimensionamento otimizado de redes, redução de perdas e controle dos custos energéticos.

Figura 7 - Fluxograma da integração otimização com a simulação



Fonte: Adaptado de Pedrosa Filho (2006).

A dinâmica de trabalho entre o módulo otimizador e o módulo simulador ocorre de maneira iterativa, repetindo o processo de avaliação da função objetivo, até que o critério de parada, determinado pelo otimizador, seja satisfeito. A avaliação da função objetivo é realizada pelo simulador hidráulico EPANET, ele é responsável por calcular as variáveis de decisão do problema para cada solução encontrada pelo otimizador.

O modelo computacional desenvolvido utiliza a linguagem Python 3.8, juntamente com o *Water Network Tool for Resilience* - WNTR (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018), que é um API (*Application Programming Interface*) que trabalha em Python compatível com EPANET projetado para simular e analisar as resiliências de redes de distribuição de água. Ambos têm o objetivo de encontrar as melhores respostas para a otimização do sistema unindo o módulo otimizador (Algoritmo Genético) com o módulo simulador (EPANET).

3.1.2 Formulação matemática do modelo

O problema abordado nesta pesquisa evidencia uma estrutura convencional de otimização, na qual deseja minimizar uma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições que representam as condições limitantes operacionais do sistema. O modelo matemático é composto por uma única função objetivo que determina o custo operacional de bombeamento, sujeita as restrições, como os níveis dos reservatórios e pressão nos pontos de abastecimento.

3.1.2.1 Definição das variáveis

A proposta dessa pesquisa foi de trabalhar com a combinação das duas representações, a implícita e a explícita. Através do algoritmo genético e dos controles operacionais do simulador hidráulico EPANET, foram encontrados os níveis ótimos de operação e o melhor horário para o acionamento das bombas, definindo as melhores regras operacionais, otimizando todo o sistema e reduzindo os custos com energia elétrica.

3.1.2.2. Função objetivo

A função objetivo do problema em questão visa minimizar os custos com energia elétrica otimizando o acionamento das bombas na estação elevatória. Os custos com energia de bombeamento são determinados pela potência hidráulica requerida pelas estações elevatórias, pelo intervalo de tempo em que as bombas estão em funcionamento e pelo custo unitário da energia, como mostra a Equação 1.

$$C_e = P_m \times TF \times \Delta t \quad (1)$$

Onde:

C_e : Custo com energia elétrica (\$);

P_m : Potência hidráulica (W);

TF : Tarifa de energia (\$/kWh);

Δt : Número de horas em que a bomba está ligada

A potência hidráulica é a energia necessária para que uma vazão de água (Q), seja elevada a uma certa altura, chamada de altura manométrica (H_m). O rendimento global da bomba η é a razão entre a potência hidráulica e a potência absorvida pela bomba. O rendimento da bomba por sua vez poderá variar bastante, dependendo da vazão, da altura manométrica e do tipo de bomba. Para bombas de pequeno porte o rendimento chegar a 40%, já as bombas de grande porte pode atingir 85% do seu rendimento. Geralmente, os valores dos rendimentos são fornecidos pelos fabricantes das bombas (CARVALHO; GOMES, 2012).

A relação potência hidráulica e rendimento é dada pela Equação 2, e a partir dessa expressão, será possível determinar o custo diário de energia elétrica de uma estação elevatória.

$$P_m = \frac{\gamma \times Q \times H_m}{\eta} \quad (2)$$

Onde:

P_m : Potência hidráulica (W);

Q : Vazão a ser recalçada (m³/s);

H_m : Altura manométrica (m);

η : Rendimento do sistema motor-bomba (%);

γ : Peso específico do líquido (N/m³).

O custo energético C_e leva em consideração o tempo em que a bomba está ligada e esse custo está diretamente relacionado com a tarifa de energia que varia ao longo do dia dependendo da demanda, da hora de maior consumo e da região onde será cobrada.

Os serviços de abastecimento de água e saneamento estão enquadrados na categoria de serviços públicos ligada a alta e média tensão (Grupo A), onde a cobrança da tarifa pode seguir duas modalidades a convencional e horossazonal que é uma modalidade tarifária com preços diferenciados conforme o consumo diário (horário de ponta e fora de ponta) e o período do ano (período seco e úmido). O horário de ponta é compreendido como intervalo de tempo no qual o valor da tarifa de energia é mais cara, no Brasil adota-se um período de 3 horas, geralmente das 18 às 21 horas (GOMES, 2009a). Por esse motivo, a importância de evitar a operação das bombas nesse horário deve também ser levada em consideração durante a otimização.

A função objetivo também deve considerar o número de bombas que está sendo utilizado na estação elevatória e o tempo de operação que para o trabalho será no horizonte de planejamento de 24 horas. Dessa forma poderá ser expressa como o somatório da energia gerada por todas as bombas do sistema, dentro do horizonte operacional de 24 horas, mediante a potência consumida por cada bomba no intervalo de uma hora se ela estiver acionada ou não. As Equações 3 e 4 representam a função objetivo a ser minimizada.

$$\text{Min } C_t = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} C_e \quad (3)$$

Substituindo as Equações 1 e 2 na Equação 3, chega-se à Equação objetivo 4:

$$\text{Min } C_t = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} \frac{\gamma \times Q \times H_m}{\eta} \times TF \times \Delta t \quad (4)$$

3.1.2.3 Restrições do problema

Na concepção de um problema de otimização em sistemas de abastecimento de água, o modelo deve atender às restrições do sistema que representam seus critérios de desempenho. Segundo Costa (2010), as restrições servem para informar ao modelo os limites hidráulicos e operacionais pré-estabelecidos, de forma que as soluções que tenham esses limites violados sejam identificadas e descartadas. Normalmente, para este tipo de problema, utilizam-se restrições hidráulicas e restrições de desempenho operacional.

As restrições hidráulicas definem o estado de equilíbrio hidráulico do sistema, como por exemplo, conservação de massa e de energia em cada malha da rede, limites mínimo e máximo nos níveis de armazenamento do tanque, requisitos de pressão mínima nos nós de demanda e um equilíbrio entre o fornecimento e a demanda dos tanques. O simulador hidráulico lida implicitamente com algumas dessas restrições (LÓPEZ-IBÁÑEZ, PRASAD, PAECHTER, 2008; MUHAMMED, FARMANI, 2020).

As restrições de desempenho operacional compreendem critérios que serão fornecidos ao sistema para garantir o seu bom funcionamento e o fornecimento interrompido de água para os usuários. Esses critérios, para o problema em questão, são definidos como os limites mínimo e máximo dos reservatórios, o equilíbrio entre a água fornecida e consumida no sistema garantindo que os reservatórios recuperem seus níveis ao final do período de programação e as pressões mínimas nos pontos de demanda para definir a continuidade no abastecimento. Todas essas restrições são importantes para assegurar a confiabilidade do sistema.

a) Pressões na rede: as pressões em todos os nós têm de respeitar os limites mínimos máximos para cada intervalo de tempo analisado. As pressões devem ser superiores as pressões mínimas para importante para garantir continuidade do fornecimento de água à rede, e inferior as pressões máximas para reduzir possíveis vazamentos. A Equação 5 mostra essa restrição.

$$P_i(\min) \leq P_i(t) \leq P_i(\max) \quad (5)$$

Onde:

$P_i(\min)$: Pressão mínima requerida no nó i (m);

$P_i(t)$: pressão no nó i no intervalo de tempo t (m);

$P_i(\max)$: pressão máxima requerida no nó i (m).

b) Estado de recuperação dos reservatórios: para garantir o equilíbrio entre a oferta e a demanda dos reservatórios é necessário que seus níveis sejam recuperados até o final da programação, ou seja, os níveis dos reservatórios no final do período de programação não podem ser inferiores ao de início. Essa restrição permite que a programação seja aplicada periodicamente, garantido que a eficiência do sistema seja mantida ao longo do tempo. As Equações 6 e 7 descrevem essa restrição.

$$V_{rnv,i} \leq V_{rnv,f} \quad (6)$$

$$\Delta V_{rnv} = 100 \times \frac{V_{rnv,i} - V_{rnv,f}}{V_{rnv,i}} \quad (7)$$

Onde:

$V_{rnv,i}$: Volume inicial do reservatório de nível variável (m³);

$V_{rnv,f}$: Volume final do reservatório de nível variável (m³);

ΔV_{rnv} : diferença entre os volumes inicial e final do reservatório de nível variável (%).

O ΔV_{rnv} é um parâmetro percentual que avalia se a restrição será atendida. Para ΔV_{rnv} negativo representa um excesso de água no reservatório, valores positivos significa que a restrição foi atendida, porém não a melhor solução. Para o problema em questão o ΔV_{rnv} deve ser igual a zero pois garante a não violação da restrição e trabalha como o volume otimizado do sistema.

c) Utilização máxima dos reservatórios: esta restrição determina que sejam utilizados os volumes máximos dos reservatórios, visando otimizar a operação e, assim, contribuir para uma maior eficiência nos custos com energia. A Equação 8 expressa matematicamente esta restrição do sistema:

$$I_{reservatório} = \frac{\sum_{p=1}^{np} V_{rnv,utilizado(p)}}{V_{rnv, capacidade}} \quad (8)$$

Onde:

$I_{reservatório}$: Índice de eficiência do reservatório (%);

$V_{rnv, utilizado(p)}$: Volume utilizado do reservatório (m³);

$V_{rny\ capacidade}$: Capacidade volumétrica do reservatório (m³).

3.1.2.4 Função de aptidão

O Algoritmo Genético é destinado para resolver problemas sem restrições, para contornar esta limitação do método é utilizado as penalidades, onde cada restrição do problema é multiplicada por um valor de penalidade. Cada expressão de penalidade é adicionada a função objetivo, transformando o problema restrito em um problema irrestrito, formando a função de aptidão. Para cada restrição que for violada, o valor da penalidade é acrescentada na função objetivo consequentemente aumenta-se o custo da função. As Equações 9, 10 e 11 expressam a função de aptidão para o Algoritmo Genético:

$$\text{Função de Aptidão} = \text{Função Objetivo} + \sum \text{penalidades} \quad (9)$$

$$FO_{irrestrita} = FO + \alpha_1.R_1 + \alpha_2.R_2 + \dots + \alpha_n.R_n \quad (10)$$

$$FO_{irrestrita} = FO + \sum \alpha_n . R_n \quad (11)$$

Onde:

$FO_{irrestrito}$: Função de aptidão;

FO : Função objetivo;

α_n : Valores de penalidade;

R_n : Restrições do problema.

As funções de penalidade permitem também que as soluções não-factíveis façam parte da população, consequentemente aumentando o espaço de buscar por novas soluções. Porém, deve ser aplicado um valor que penalize essa restrição de forma adequado, mas que não desestabilize a funcionalidade do algoritmo.

Encontrar as funções de penalidade do problema é uma tarefa muito delicada, ao passo que exige um vasto conhecimento das restrições do problema. Costa (2010) expressa que a grande dificuldade em utilizar as funções de penalidade é a de encontrar os parâmetros mais adequados para orientar a busca do algoritmo até a solução ótima.

As funções de penalidade devem ser balanceadas aplicando para cada uma, um valor de coeficiente, que definidos de acordo com o grau de relevância da restrição. Quanto mais importante a restrição para manter o bom funcionamento do sistema, maior o valor das penalidades.

Os parâmetros do Algoritmo Genético usados na pesquisa foram definidos com base em algumas pesquisas na área de otimização em recursos hídricos, como Abkenar *et al.* (2015), Reca, Martínez e López (2017) e Chang *et al.* (2018). Após alguns testes, esses valores foram ajustados ao problema e adotados conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Valores dos coeficientes das funções de penalidade.

RESTRIÇÃO VIOLADA	α
Pressões entre os limites (min. e máx.)	10000
Utilização máxima do volume dos reservatórios	100
Níveis entre os limites (min e máx)	100
Nível final (24 h) igual ou superior ou nível inicial (0 h)	10

Fonte: Autor (2022).

3.1.3 Regras e controles operacionais de um sistema de abastecimento de água.

Uma das principais características dos simuladores de modelos de rede de distribuição de água é a capacidade de controlar todos os seus elementos através de controles simples ou programados. O EPANET utiliza os controles e as regras para definir as melhores condições operacionais do sistema. O WNTR tem a função de replicar essa funcionalidade do EPANET dentro do programa de otimização e depois simula para obter o melhor resultado.

Segundo Rossman (2000) os controles são um conjunto de instruções que estabelecem o modo como a rede opera ao longo do tempo. Eles especificam o estado dos trechos selecionados em função do tempo, alturas de água no reservatório de nível variado e valores de pressão em pontos específicos da rede. Existe duas categorias de controle que podem ser utilizadas:

- Controles simples;
- Controles programados (regras operacionais).

Os controles simples do EPANET são usados para definir condições de funcionamento dos elementos de uma rede de distribuição de água como bombas, válvulas, altura de água de um reservatório de nível variado, pressão em um nó, entre outros. Esses controles são definidos usando uma condição e em seguida uma ação, como demonstrado no Quadro 2.

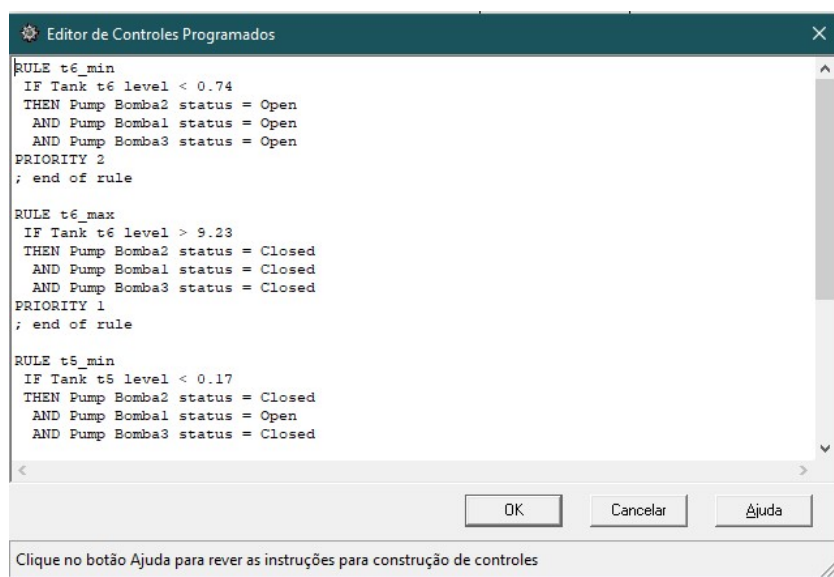
Quadro 4 - Instruções de controles simples e significados.

INSTRUÇÕES DE CONTROLE	SIGNIFICADO
LINK 12 CLOSED IF NODE 23 ABOVE 6	Fechar o trecho 12 se a altura no RNV 23 exceder 6 m
LINK 12 OPEN IF NODDE 130 BELOW 30	Abrir o trecho 12 se a pressão no nó 130 for inferior a 30 m
LINK 12 1.5 AT TIME 16	Ajustar a regulação de velocidade da bomba 12 para 1.5 às 16 horas de simulação
LINK 12 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM LINK 12 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM	O trecho 12 é repetidamente fechado às 10 AM e aberto às 8 PM ao longo da simulação.

Fonte: Gomes (2009b, p. 227)

As regras operacionais são mais complexas e foram utilizadas dentro de um bloco lógico para definir uma ordem de operação. Se as regras com ações conflitantes que ocorrerem ao mesmo tempo, a regra com prioridade mais alta substituirá todas as outras. No WNTR as regras são iguais aos controles programados do EPANET e foram definidas diretamente pelo API que depois são exportadas para o simulador. No modelo proposto para a pesquisa, as regras operacionais foram definidas pelo programa assim como a prioridades de cada regra. O algoritmo trouxe como resposta as melhores regras para a aplicação no simulador. A Figura 8 apresenta uma das respostas apresentadas pelo programa e aplicadas no EPANET.

Figura 8- Exemplo de aplicação das regras operacionais no EPANET



Fonte: Autor (2022).

3.1.4 Módulo otimizador

3.1.4.1 Algoritmo genético

A utilização do algoritmo foi realizada através da biblioteca Python *geneticalgorithm2*, este pacote é capaz de resolver problemas de otimização contínua, combinatória e mista com variáveis contínuas e discretas. É um programa de fácil implementação para algoritmos genéticos, apenas é necessário fazer alguns ajustes dependendo do tipo de problema. No caso dessa pesquisa, essa biblioteca trabalhou em conjunto com a outra biblioteca Python a WNTR para que pudesse fazer a simulação do sistema de abastecimento após a otimização e possibilitar as análises dos resultados obtidos.

No *geneticalgorithm2*, inicialmente define-se a função objetivo, depois se determina os limites de domínio de cada variável a ser analisada, em seguida são levantadas as restrições do problema com os seus respectivos valores de penalidade e, por fim, são adicionados os valores dos parâmetros utilizados no cálculo do algoritmo genético.

Os parâmetros utilizados foram baseados em estudos recentes (ABKENAR *et al.*, 2015; BI; DANDY; MAIER, 2015; CHANG *et al.*, 2018; LUNA *et al.*, 2019), onde já foram testados e avaliados, comprovando sua eficiência para esse tipo de pesquisa. Esses valores são apresentados da Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada do algoritmo genético

PARÂMETROS	VALORES
Max iteration	200
Tamanho da População	100
Mutation probability	0,5
Elite ration	0,1
Crossover probability	0,9
Parents' portion	0,3
Crossover type	Two points
Tipo de mutação	Uniform by center
Tipo de seleção	Roleta

Fonte: Autor (2022).

Os módulos simulador e otimizador trabalham em conjunto, sendo que o simulador é extremamente solicitado para avaliar as possíveis soluções sugeridas pelo otimizador para encontrar os melhores resultados para redução de custos do sistema.

4 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

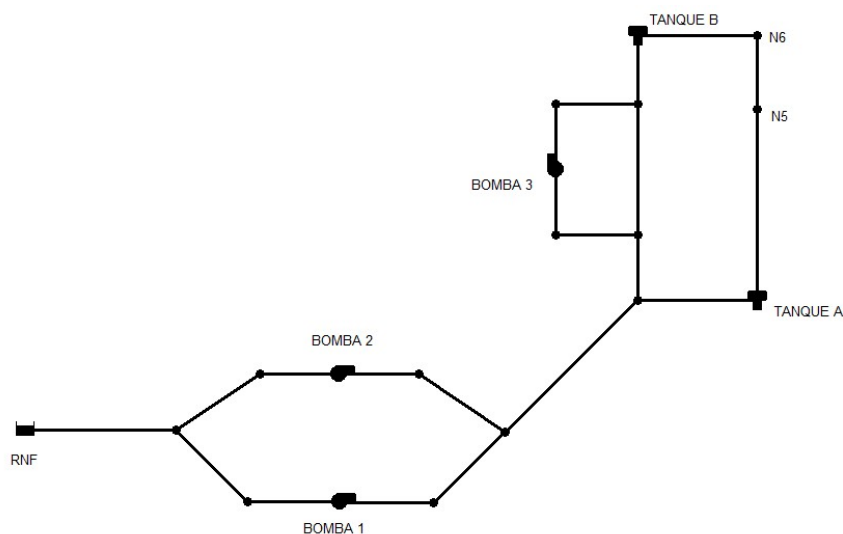
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O planejamento de otimização de um sistema de abastecimento de água requer uma análise continua do comportamento de todos os elementos hidráulicos que o compõe em diversas situações. Encontrar a melhor combinação para a operacionalização das bombas é um exercício complicado e demandou uma análise matemática e computacional complexa. Para isso foi elaborado um programa utilizando a linguagem Python 3.8 através do *integrated development environment* (IDE) livre *PyCharm Community* 2021.2, em conjunto com a ferramenta computacional WNTR que faz a leitura dos dados dos arquivos na extensão (.INP) do simulador hidráulico EPANET e analisa todas as soluções encontradas pelo AG e verifica sua viabilidade para o sistema.

Para validar os resultados pela metodologia empregada se faz necessário a aplicação do modelo proposto em sistemas de abastecimento, como forma de avaliar o comportamento dos parâmetros hidráulicos resultantes e diagnosticar a viabilidade operacional da metodologia proposta. Com esse objetivo, foram escolhidos dois modelos de redes muito estudados pela comunidade científica para a análise de eficiência energética em sistema de abastecimento. O modelo hipotético utilizado por Van Zyl *et al.* (2004) e a rede Any Town (modificada), proposta inicialmente por Walski *et al.* (1987) e depois modificada por Rao e Alvarruiz (2007) com o intuito de tornar a otimização mais desafiadora. A escolha desses sistemas se deve ao fato de que vários estudos já a utilizaram como padrão e que servirão de referência para a análise dos resultados obtidos com a nova proposta oferecida por essa pesquisa.

4.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA 1 – REDE TESTE HIPOTÉTICA VAN ZYL *et al.* (2004).

A rede teste proposta por Van Zyl *et al.* (2004), é representada na Figura 9. Apesar do seu layout simples, a mesma foi projetada para ter um grande número de estratégias operacionais possíveis para um problema de otimização. Ela contém todos os elementos principais de uma rede típica de distribuição de água: uma fonte de água potável (reservatório de nível fixo - RNF), que alimenta dois reservatórios de nível variado (RNV) representados pelos tanques A e B respectivamente, através de uma estação de bombeamento principal e uma bomba de reforço.

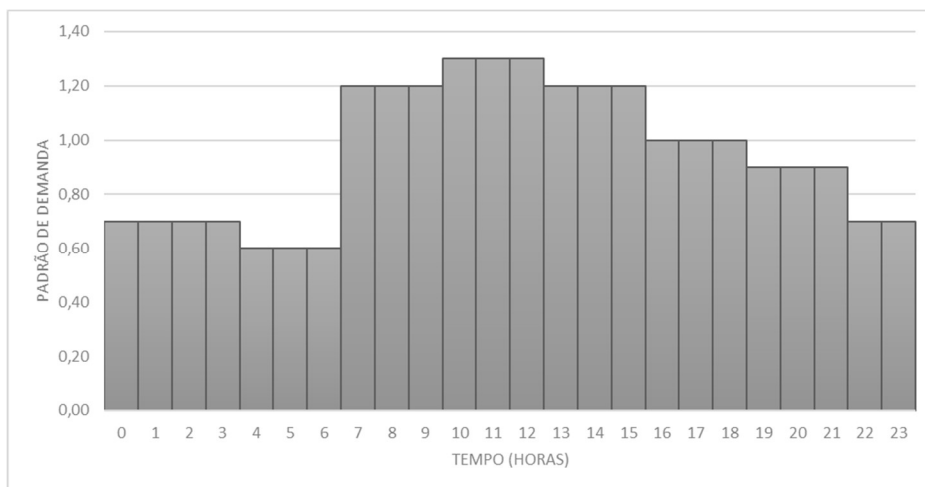
Figura 9 - Layout da rede teste Van Zyl *et al.* (2004)

Fonte: Adaptado de Van Zyl *et al.* (2004).

Da fonte principal (RNF) sai um trecho tendo a jusante uma estação de bombeamento principal composta por duas bombas idênticas (BOMBA 1 e BOMBA 2) em paralelo e que são responsáveis por alimentar os dois reservatórios de nível variado (TANQUE A e TANQUE B) de diferentes elevações. A BOMBA 1 é controlada pelo nível do tanque A, enquanto a BOMBA 2 é controlada pelo nível do tanque B. As curvas de eficiência das bombas em paralelo foram selecionadas para produzir custos de bombeamento unitário similar para as bombas operando sozinhas ou em paralelo.

A BOMBA 3 é instalada no tubo que alimenta o mais alto dos dois reservatórios (TANQUE B) e também é controlado pelo seu nível. Quando uma ou ambas as bombas da estação de bombeamento estão operando, a BOMBA 3 aumenta a vazão do tanque B. Entretanto, quando nem a BOMBA 1 e nem a BOMBA 2 estão operando, a BOMBA 3 transporta água do tanque A para o tanque B.

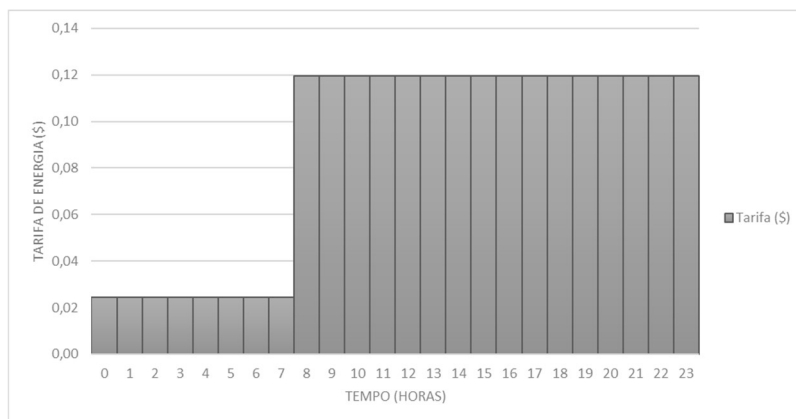
Os dois tanques são também conectados com uma linha de gravidade. Todas as demandas do sistema são retiradas dos nós na linha de gravidade. As demandas variam de acordo com um padrão de demanda residencial típico com um pico às 7:00 (fator de 1,7) e um segundo pico às 18:00 (fator 1,5), como mostra a Figura 10 e o Quadro 3. Quando a demanda é alta, a água é extraída de ambos os tanques para suprir a demanda. No entanto, sob condições de demanda baixa a água é transportada por gravidade do tanque B para o tanque A.

Figura 10 - Padrão de demanda da rede Van Zyl *et al.* (2004)Fonte: Adaptado de Van Zyl *et al.* (2004).Quadro 5 - Fator de demanda da rede Van Zyl *et al.* (2004).

Tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fator de demanda	0,62	0,62	0,67	0,76	0,91	1,10	1,48	1,71	1,48	1,02	0,73	0,55
Tempo (h)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Fator de demanda	0,49	0,55	0,73	1,02	1,36	1,53	1,53	1,36	1,10	0,91	0,76	0,67

Fonte: Adaptado de Van Zyl *et al.* (2004).

Para as três bombas adotou-se um rendimento constante de 85%, e o padrão da tarifa energética adotado foi o mesmo aplicado por Van Zyl *et al.* (2004). A tarifa assume dois valores ao longo do dia 0,0224 \$/kWh da 0 hora até as 6:59 e 0,1194 \$/kWh de 7:00 até as 23:59, como mostra a Figura 11 e o Quadro 4. As tarifas foram criadas pelos autores para ser aplicadas na rede teste, portanto, optaram por não especificar uma moeda definida, e para fins de comparar os resultados obtidos na pesquisa com os apresentados em outros trabalhos que já utilizaram a mesma rede, optou-se nessa pesquisa por manter o mesmo padrão.

Figura 11 - Padrão da tarifa energética aplicada a rede Van Zyl *et al.* (2004).

Fonte: Adaptado de Van Zyl *et al.* (2004).

Quadro 6 - Tarifa energética aplicada a rede Van Zyl *et al.* (2004)

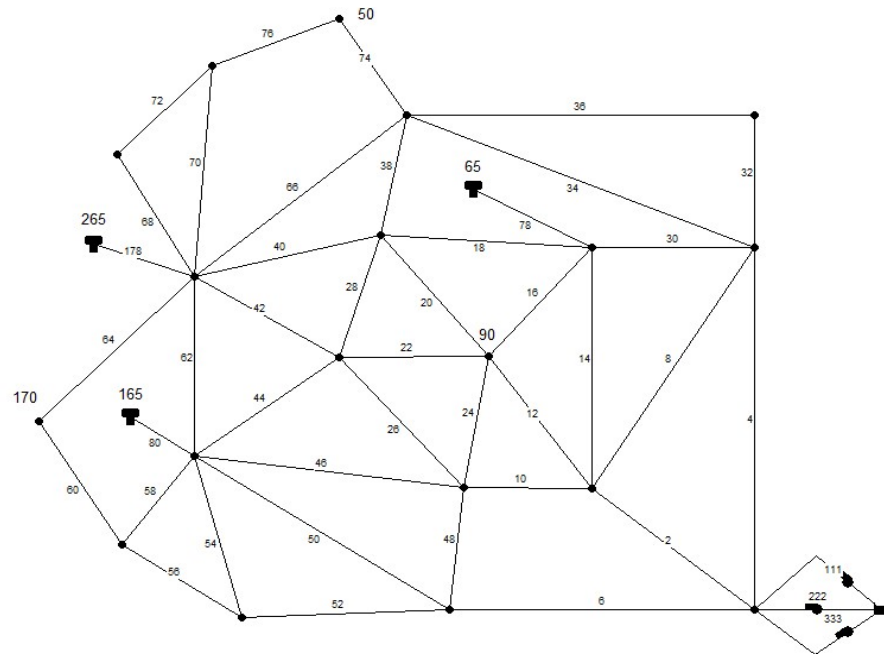
Tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tarifa (\$)	0,0244	0,0244	0,0244	0,0244	0,0244	0,0244	0,0244	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194
Tempo (h)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Tarifa (\$)	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194	0,1194

Fonte: Adaptado de Van Zyl *et al.* (2004).

4.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA 2 – REDE ANY TOWN (MODIFICADA)

A rede hipotética Any Town foi criada por Walski *et al.* (1987) e depois modificada por Rao e Salomons (2007). Consiste num sistema composto por três tanques de armazenamento, três nós com pressões críticas e três bombas idênticas com velocidades constantes, conectadas em paralelo, responsáveis por retirar a água de uma fonte de abastecimento e distribuir para todo o sistema. As modificações aplicadas por Rao e Salomons (2007) foram propostas para tornar a etapa de otimização mais desafiadora. Por sua vez, os autores também empregaram o Algoritmo Genético na otimização da operação de sistemas de bombeamento para a redução dos custos com eletricidade. Com isso foi possível fazer um comparativo com os resultados obtidos nessa pesquisa com os apresentados pelos autores. A topologia da rede e as características da rede são apresentadas pela Figura 12 e pelas Tabelas 6 e 7 respectivamente.

Figura 12 - Topologia da rede de distribuição Any Town (modificada)



Fonte: Adaptada de Rao e Salomons (2007).

Tabela 6 - Características dos nós da rede Any Town (modificada).

NÓS			
ID	COTA (M)	CONSUMO (L/s)	PRESSÃO MÍNIMA (mca)
20	6,10	31,55	-
30	15,25	12,62	-
110	15,25	31,55	-
70	15,25	31,55	-
60	15,25	31,55	-
90	15,25	63,09	51
100	15,25	31,55	-
40	15,25	12,62	-
50	15,25	12,62	-
80	15,25	31,55	-
150	36,60	12,62	-
140	24,40	12,62	-
170	36,60	12,62	30
130	36,60	12,62	-
160	36,60	50,55	-
120	36,60	12,62	-
55	24,40	6,31	42
75	24,40	6,31	-
115	24,40	6,31	-

Fonte: Costa (2010).

Tabela 7 - Características das tubulações da rede Any Town (modificada)

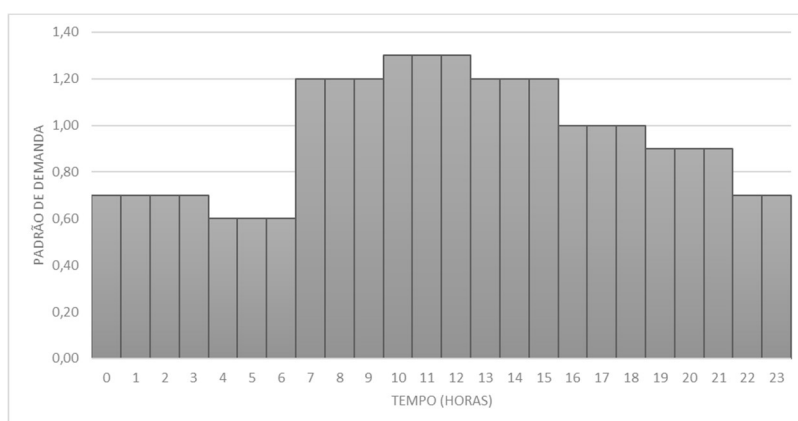
TUBULAÇÕES		
ID	COMPRIMENTO (m)	DIÂMETRO (mm)
4	3660,0	600
30	1830,0	500
16	1830,0	150
14	1830,0	400
12	1830,0	250
2	3660,0	600
6	3660,0	450
48	1830,0	300
24	1830,0	500
10	1830,0	600
32	1830,0	200
36	1830,0	300
38	1830,0	200
18	1830,0	450
20	1830,0	400
66	3660,0	200
40	1830,0	300
28	1830,0	450
22	1830,0	150
26	1830,0	600
42	1830,0	500
64	3660,0	300
60	1830,0	300
58	1830,0	400
44	1830,0	350
50	1830,0	300
52	1830,0	350
56	1830,0	300

62	1830,0	500
46	1830,0	450
34	2745,0	350
78	30,5	500
80	30,5	400
8	2745,0	350
74	1830,0	300
76	1830,0	300
72	1830,0	300
68	1830,0	300
70	1830,0	300
178	30,5	400
54	2745,0	300

Fonte: Costa (2010).

Os padrões de demanda e os valores tarifários aplicados a rede, são os mesmo utilizados por Rao e Salomons (2007), assim é possível avaliar o modelo proposto na pesquisa e comparar os resultados obtidos com o apresentado pelos autores. As Figuras 13 e 14 e os Quadros 5 e 6 apresentam esses dados respectivamente. Assim como o proposto na rede Van Zyl *et al.* (2004), optou-se por não definir uma moeda definida.

Figura 13 - Padrão de demanda da rede Any Town (modificada)



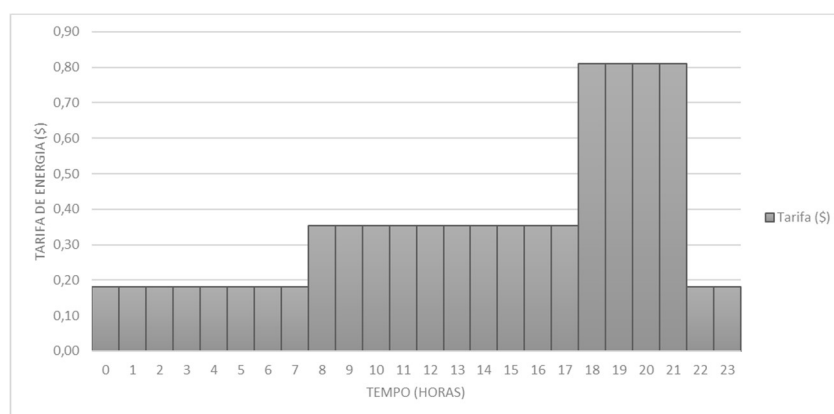
Fonte: Adaptada de Rao e Salomons (2007).

Quadro 7 - Fator de demanda da Any Town (Modificada).

Tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fator de demanda	0,70	0,70	0,70	0,70	0,60	0,60	0,60	1,20	1,20	1,20	1,30	1,30
Tempo (h)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Fator de demanda	1,30	1,20	1,20	1,20	1,00	1,00	1,00	0,90	0,90	0,90	0,70	0,70

Fonte: Adaptada de Rao e Salomons (2007).

Figura 14 - Tarifa energética da rede Any Town (modificada)



Fonte: Adaptada de Rao e Salomons (2007).

Quadro 8 - Tarifa energética aplicada a Any Town (modificada)

Tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tarifa (\$)	0,1814	0,1814	0,1814	0,1814	0,1814	0,1814	0,1814	0,1814	0,3528	0,3528	0,3528	0,3528
Tempo (h)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Tarifa (\$)	0,3528	0,3528	0,3528	0,3528	0,3528	0,3528	0,8097	0,8097	0,8097	0,8097	0,1814	0,1814

Fonte: Adaptada de Rao e Salomons (2007).

4.4 PARÂMETROS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Embora os Algoritmos Genéticos (AG) serem amplamente utilizados nos problemas de otimização trazendo resultados satisfatórios em suas aplicações, a determinação dos valores dos seus principais parâmetros como tamanho da população, número de gerações, taxa de mutação e taxa de cruzamento, é uma das etapas mais desafiadoras do processo. Isso porque os valores adotados dependem do tipo e complexidade do problema a ser resolvido.

Segundo Goldberg e Holland (1989), para uma boa performance do AG é necessária uma combinação da alta probabilidade de cruzamento, baixa probabilidade de mutação e um tamanho de população moderado. Várias pesquisas que utilizam o AG como otimizador tiveram uma preocupação extrema em definir os melhores valores desses parâmetros, para que pudessem garantir um processo de otimização rápido e confiável para encontrar uma solução ótima. Os parâmetros do AG em alguns momentos são utilizados como critério de parada para alguns problemas de otimização, nesta pesquisa, o parâmetro utilizado foi o número de gerações para poder encontrar as respostas do problema de maneira mais rápida.

Segundo Pinho (2013), o número de gerações varia de acordo com a complexidade do problema em questão e deve ser determinado experimentalmente. Vários autores divergem sobre a escolha ideal do número de gerações, dependendo do problema, esse parâmetro pode influenciar diretamente no tempo computacional e na qualidade o algoritmo. Já com relação ao tamanho da população, os autores apontam que, depois de vários experimentos e pesquisas sobre o AG, o número ideal de indivíduos varie entre 50 a 100.

Em trabalhos na área de Recursos Hídricos que utilizam os Algoritmos Genéticos, muitos desses parâmetros já foram testados e avaliados (ABKENAR *et al.*, 2015; RECA; MARTÍNEZ; LÓPEZ, 2017; CHANG *et al.*, 2018). Para essa pesquisa, após alguns testes, esses valores foram ajustados aos dois problemas e adotados conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de entrada do Algoritmo Genético

PARÂMETROS	VALORES
Número de gerações	200
Tamanho da população	100
Probabilidade de mutação	0,5
Taxa de elitismo	0,1
Probabilidade de cruzamento	0,9
Tipo cruzamento	Dois pontos
Tipo de mutação	Uniforme
Tipo de seleção	Roleta

Fonte: Autor (2022).

4.5 RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO DA REDE VAN ZYL *et al.* (2004).

4.5.1 Simulação antes da otimização

Realizou-se a simulação de operação da rede antes de aplicar a otimização. Para esta análise, alcançou-se o resultado apresentado na Tabela 9. É possível observar que as três bombas estão operando em 100% de sua capacidade, além de manter um custo elevado pela sua máxima utilização, comprometendo a vida útil das bombas e os custos com manutenção. O custo total por dia das três bombas operando simultaneamente foi de \$ 422,17.

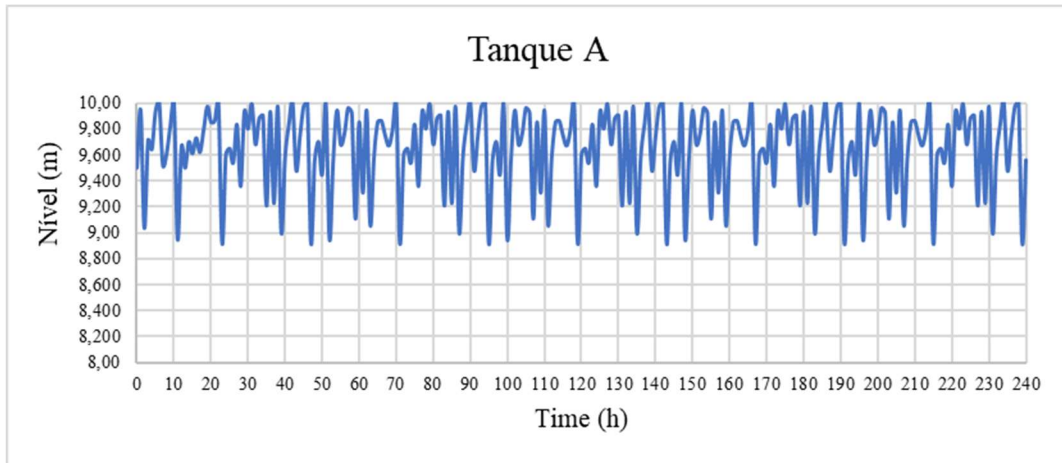
Tabela 9 - Relatório de energia para a simulação antes da otimização

PROPRIEDADES	BOMBA1	BOMBA2	BOMBA3
Potência média (Kw)	86,60	86,60	13,67
Porcentagem de uso (%)	100	100	100
Consumo específico de energia (kWh/m ³)	0,30	0,30	0,14
Custo por dia (\$)	195,21	195,21	31,74

Fonte: Autor (2022).

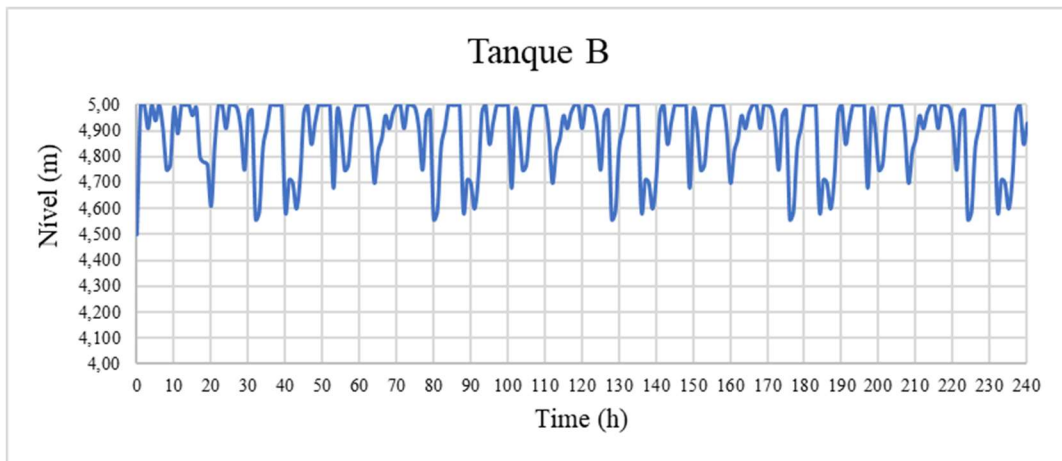
Outra análise relevante é o comportamento dos tanques A e B para uma simulação de projeção de 10 dias (240 horas). A importância de realizar esse tipo de análise é avaliar se os reservatórios estão sendo bem utilizadas e se, por um período maior que um dia de programação (24 horas), seus comportamentos permanecerão constantes e não comprometerão o abastecimento de água do sistema. As Figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, o comportamento dos reservatórios A e B para um horário de 240 horas.

Figura 15 - Comportamento do Tanque A para uma simulação de 10 dias



Fonte: Autor (2022).

Figura 16 - Comportamento do Tanque B para uma simulação de 10 dias.



Fonte: Autor (2022).

Analisando o comportamento do nível dos tanques, é possível observar que os reservatórios estão sendo subutilizados, pois na maior parte do cronograma estes permanecem em níveis próximos ao máximo.

4.5.2 Resultados depois da otimização

Para a otimização, aplicou-se o Algoritmo Genético utilizando os parâmetros definidos anteriormente. O objetivo foi minimizar o valor da função objetivo relacionada ao custo diário da eletricidade, sujeito às restrições do sistema, previamente levantadas. Assim como sugerido por Van Zyl *et al.* (2004), foram realizadas cinco execuções de otimização. A partir dos valores

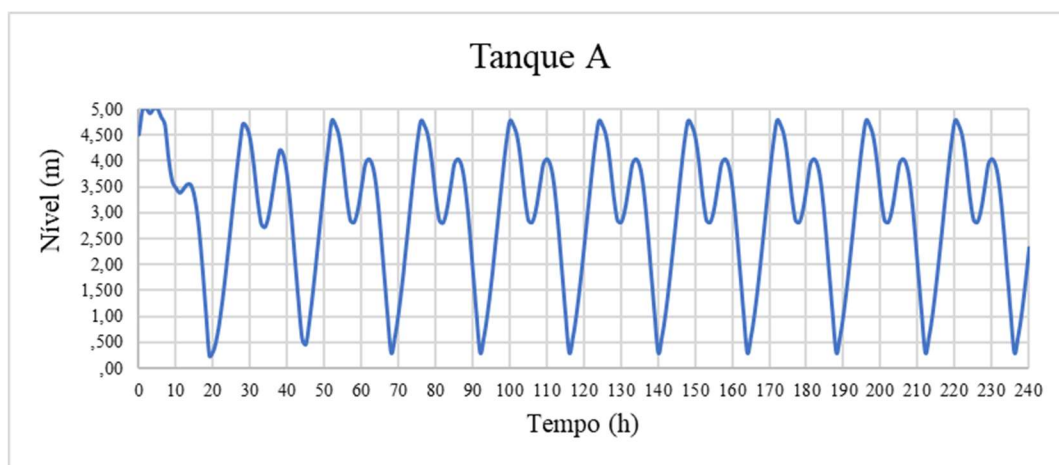
obtidos em cada otimização foi possível verificar que o valor médio encontrado mostrou uma redução de 30,7% do custo diário do consumo de energia elétrica pelo sistema quando comparado ao valor antes da otimização. É possível também apontar um padrão semelhante no comportamento dos Tanques A e B para o período de 240 horas (10 dias). A Tabela 10 apresenta os resultados numéricos das cinco simulações. As Figuras 17, 19, 21, 23 e 25, mostram o comportamento do Tanque A e as Figuras 18, 20, 22, 24 e 26 apontam o comportamento do Tanque B.

Tabela 10 - Valores dos custos diários totais para cada execução da otimização para a rede Van Zyl *et al.* (2004)

Nº DE EXECUÇÕES DA OTIMIZAÇÃO	CUSTO DIÁRIO TOTAL (\$)	CUSTO MÉDIO (\$)
1	286,72	292,55
2	298,94	
3	300,88	
4	289,50	
5	286,72	

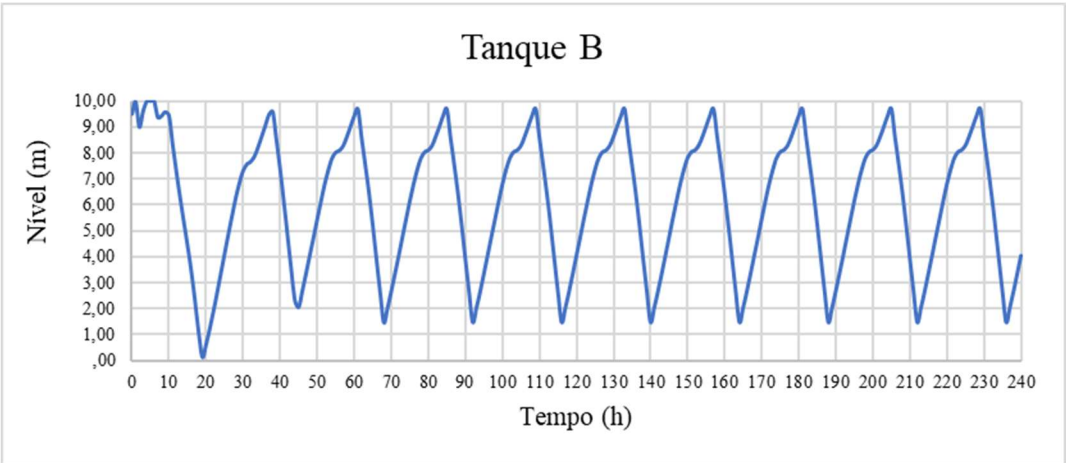
Fonte: Autor (2022).

Figura 17 - Comportamento do Tanque A para a 1ª simulação



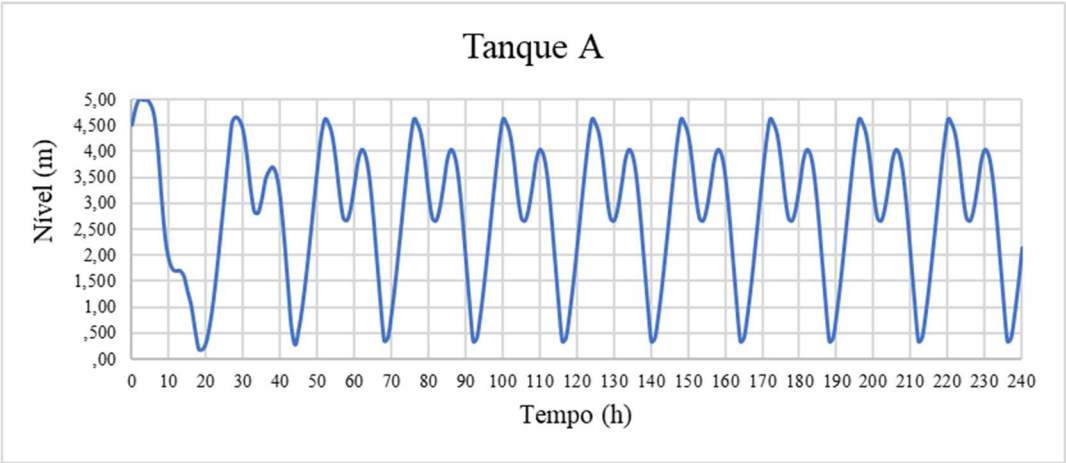
Fonte: Autor (2022).

Figura 18 - Comportamento do Tanque B para a 1ª simulação.



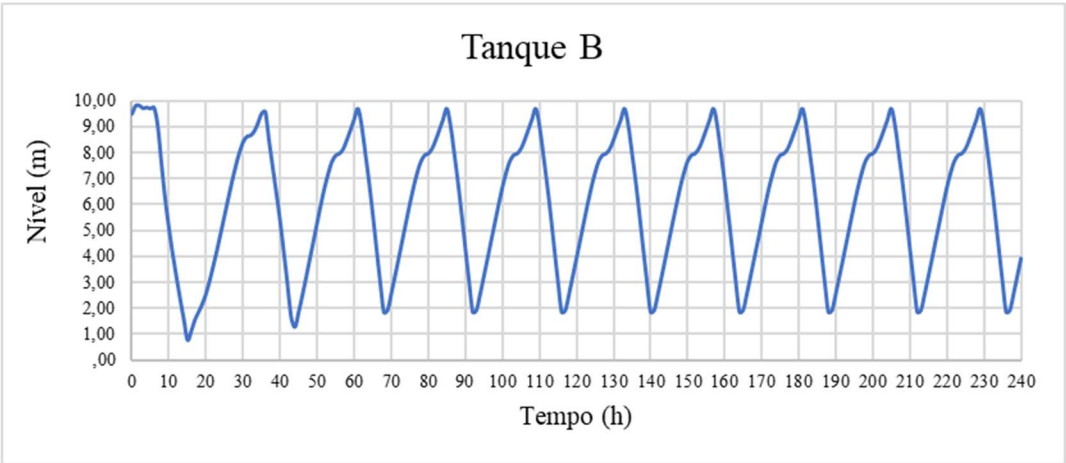
Fonte: Autor (2022).

Figura 19 - Comportamento do Tanque A para a 2ª simulação



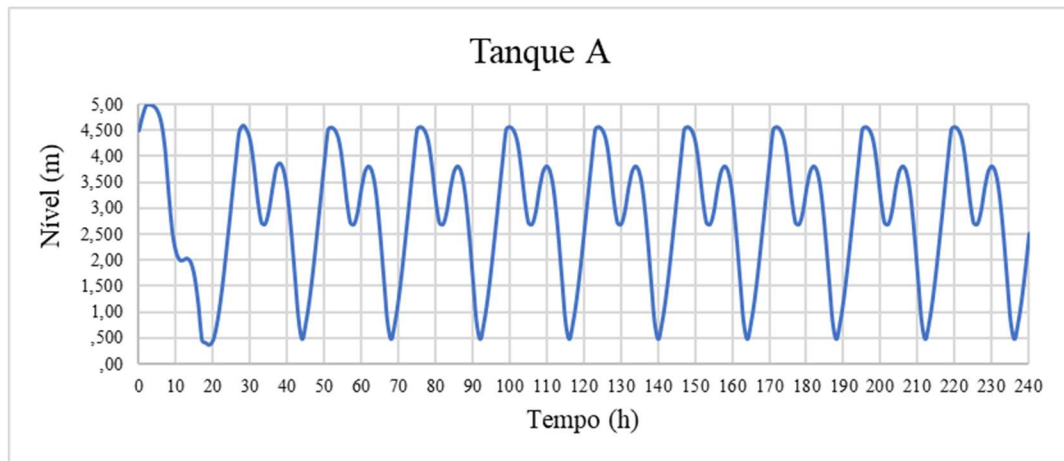
Fonte: Autor (2022).

Figura 20 - Comportamento do Tanque B para a 2ª simulação



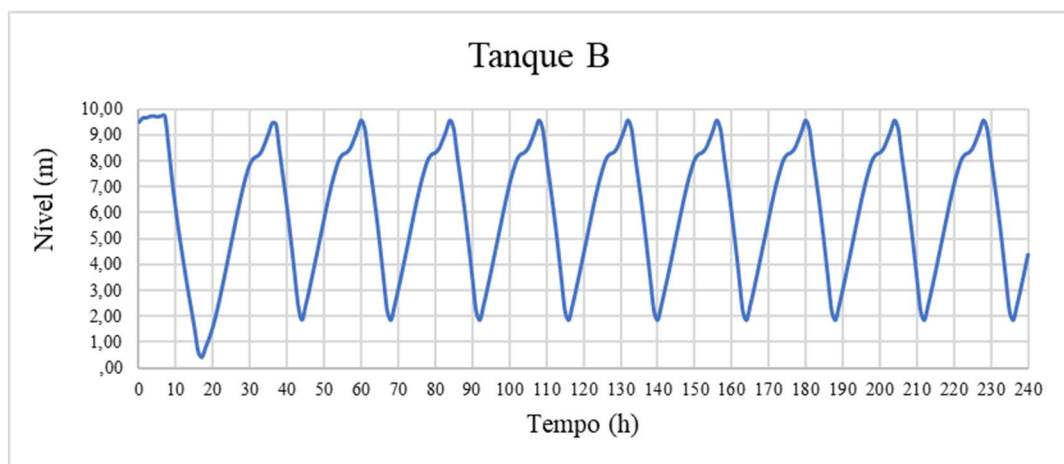
Fonte: Autor (2022).

Figura 21 - Comportamento do Tanque A para a 3ª simulação



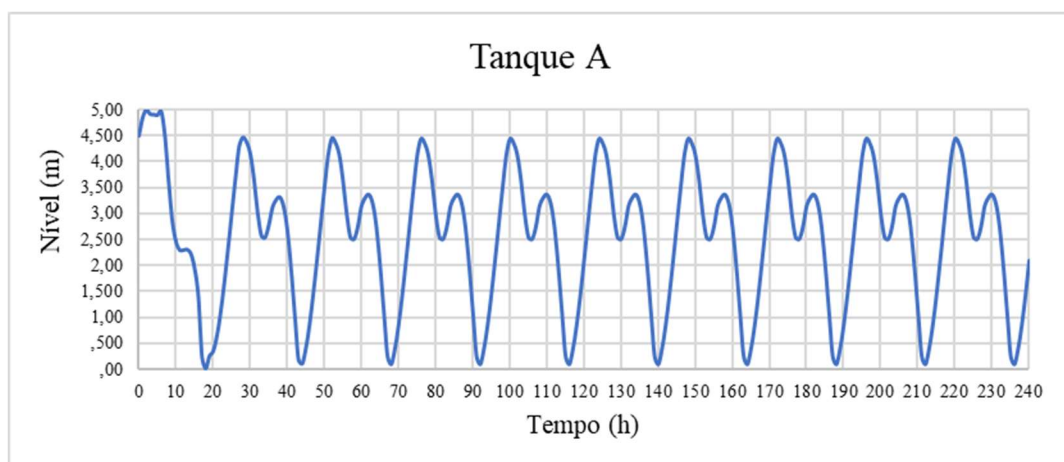
Fonte: Autor (2022).

Figura 22 - Comportamento do Tanque B para a 3ª simulação



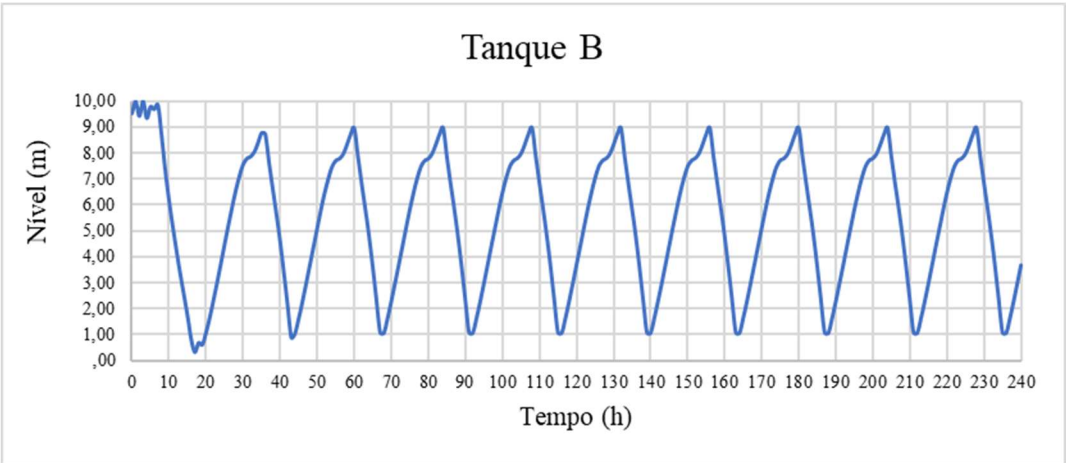
Fonte: Autor (2022).

Figura 23 - Comportamento do Tanque A para a 4ª simulação



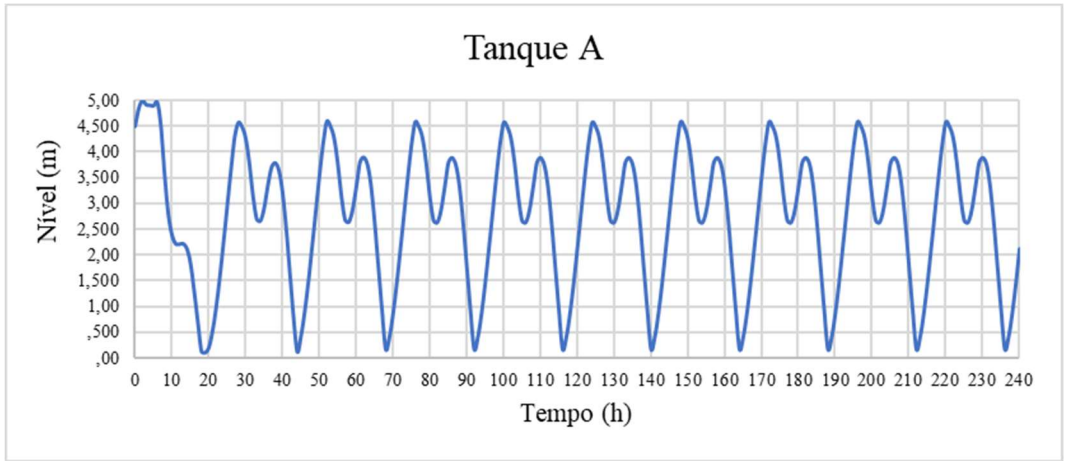
Fonte: Autor (2022).

Figura 24 - Comportamento do Tanque B para a 4ª simulação



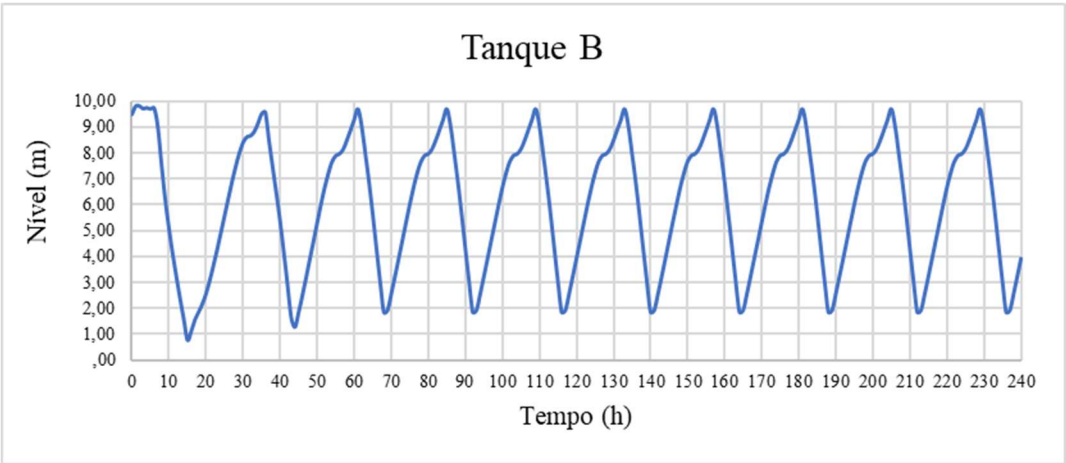
Fonte: Autor (2022).

Figura 25 - Comportamento do Tanque A para a 5ª simulação



Fonte: Autor (2022).

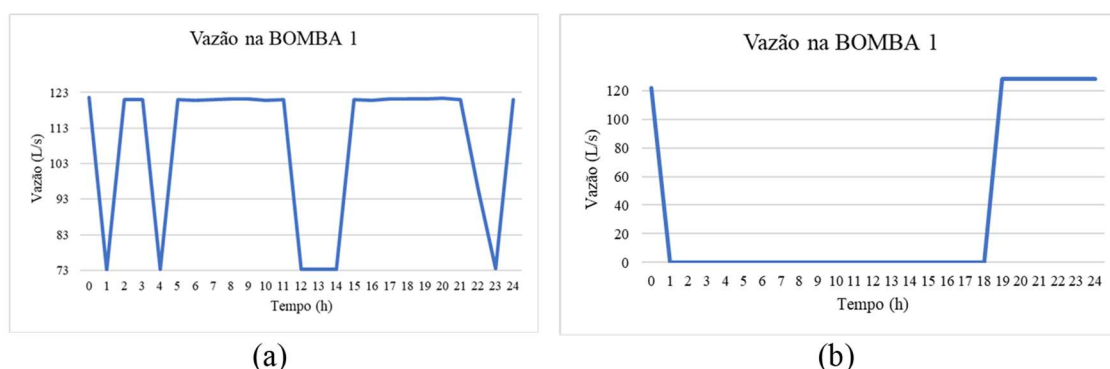
Figura 26 - Comportamento do Tanque B para a 5ª simulação



Fonte: Autor (2022).

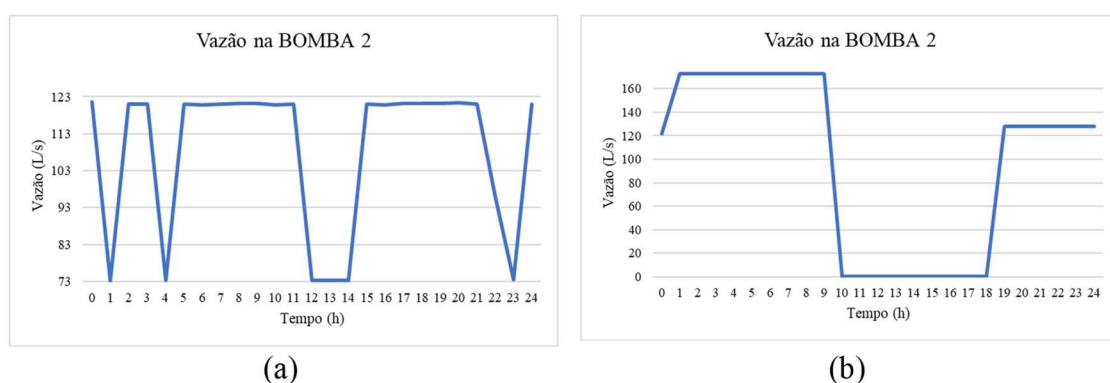
Outro ponto a ser destacado, apesar de não ser o escopo da pesquisa, é que o número de acionamentos das bombas e a quantidade de horas que as mesmas ficaram ligadas durante o dia reduziram consideravelmente. Como o comportamento das bombas para as cinco execuções de otimização foram os mesmos, foi possível fazer uma comparação dos gráficos de vazão para o sistema antes e depois da otimização para uma simulação e verificar os resultados. As Figuras 27, 28 e 29, apresentam o comportamento das BOMBAS 1, 2 e 3, antes e depois da otimização, respectivamente.

Figura 27 - Comportamento da BOMBA 1 antes (a) e depois (b) da otimização



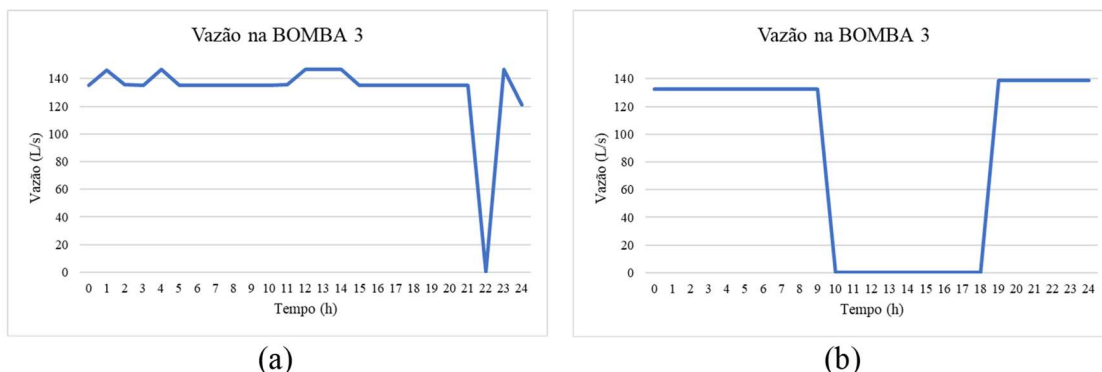
Fonte: Autor (2022).

Figura 28 - Comportamento da BOMBA 2 antes (a) e depois (b) da otimização.



Fonte: Autor (2022).

Figura 29 - Comportamento da BOMBA 3 antes (a) e depois (b) da otimização.



Fonte: Autor (2022).

Para a BOMBA 1, é possível verificar, através do gráfico de vazão que, durante um dia de programação (24 horas), para o sistema antes da otimização, a bomba foi acionada 4 vezes, depois da otimização a mesma é acionada apenas uma vez durante o dia. Para a BOMBA 2 o número de acionamentos diminuiu de 4 vezes ao dia para 2 vezes e para a BOMBA 3 de 2 para uma vez durante um período de 24 horas.

Esse é um fator relevante quando se trata em custos de manutenção dos sistemas de bombeamento. Segundo Lansey e Awuhmah (1994), uma programação de operação em que as bombas são ligadas e desligadas várias vezes pode reduzir o consumo de energia, porém pode ocasionar um desgaste maior das bombas, consequentemente um custo maior com manutenção. Esse é um custo difícil de ser mensurado, em seus trabalhos os autores colocaram como uma restrição a mais no problema limitando o número de acionamentos em apenas três vezes durante uma programação de 24 horas. Outros trabalhos como Pedrosa Filho (2006), Prasad, López-Ibáñez e Paechter (2007), López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008) e Costa *et al.* (2010) também utilizaram esse critério como restrição do problema.

A pesquisa realizada mostrou que a utilização eficiente dos reservatórios é capaz de reduzir os custos operacionais e também reduzir o número de acionamentos das bombas, atuando indiretamente com a redução dos custos com manutenção do sistema.

4.6 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DA REDE ANY TOWN (MODIFICADA)

4.6.1 Simulação antes da otimização.

Assim como no item anterior para a Rede Van Zyl *et al.* (2004), foi realizada a simulação de operação da rede Any Town (modificada) antes de aplicar a otimização. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 11. Da mesma forma que o exemplo anterior observa-se que as três bombas estão operando em 100% de sua capacidade, mantendo um custo elevado pela sua máxima utilização, comprometendo a vida útil e os custos com manutenção das bombas. O custo total por dia das três bombas operando simultaneamente foi de \$ 4.148,34.

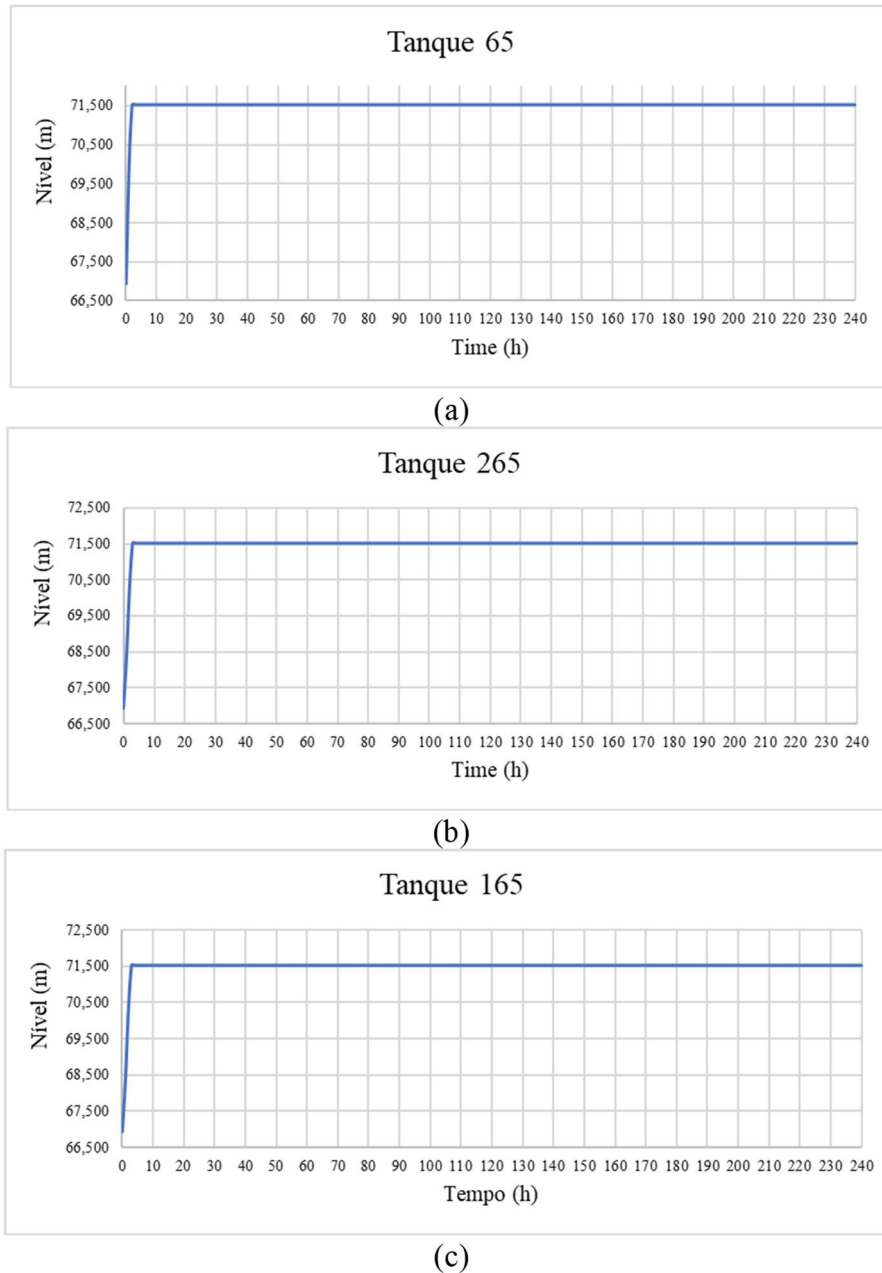
Tabela 11 - Relatório de energia para a simulação antes da otimização

PROPRIEDADES	BOMBA111	BOMBA222	BOMBA333
Potência média (Kw)	155,50	155,50	155,50
Porcentagem de uso (%)	100,00	100,00	100,00
Consumo específico de energia (kWh/m ³)	0,32	0,32	0,32
Custo por dia (\$)	1.382,78	1.382,78	1.382,78

Fonte: Autor (2022).

O comportamento dos Tanques 65, 265 e 165 para uma simulação de projeção de 10 dias (240 horas) é apresentado na Figura 30. Os níveis dos três reservatórios não se alteram permanecendo no seu limite máximo, dessa forma é possível observar que não existe um bom aproveitamento dessas estruturas o que pode afetar diretamente nos custos de energia do sistema.

Figura 30 - Comportamento dos Tanques 65 (a), 265 (b) e 165 (c), antes da otimização



Fonte: Autor (2022).

4.6.2 Resultados após a otimização

Para a rede Any Town (modificada) foram utilizados os mesmos parâmetros dos Algoritmos Genéticos usados no estudo de caso anterior. Dessa forma, foi possível avaliar melhor a otimização. Para esse estudo de caso foi realizada apenas uma execução de otimização apenas para validar o programa proposto, os valores obtidos após a otimização são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Relatório de energia para a simulação após de otimização

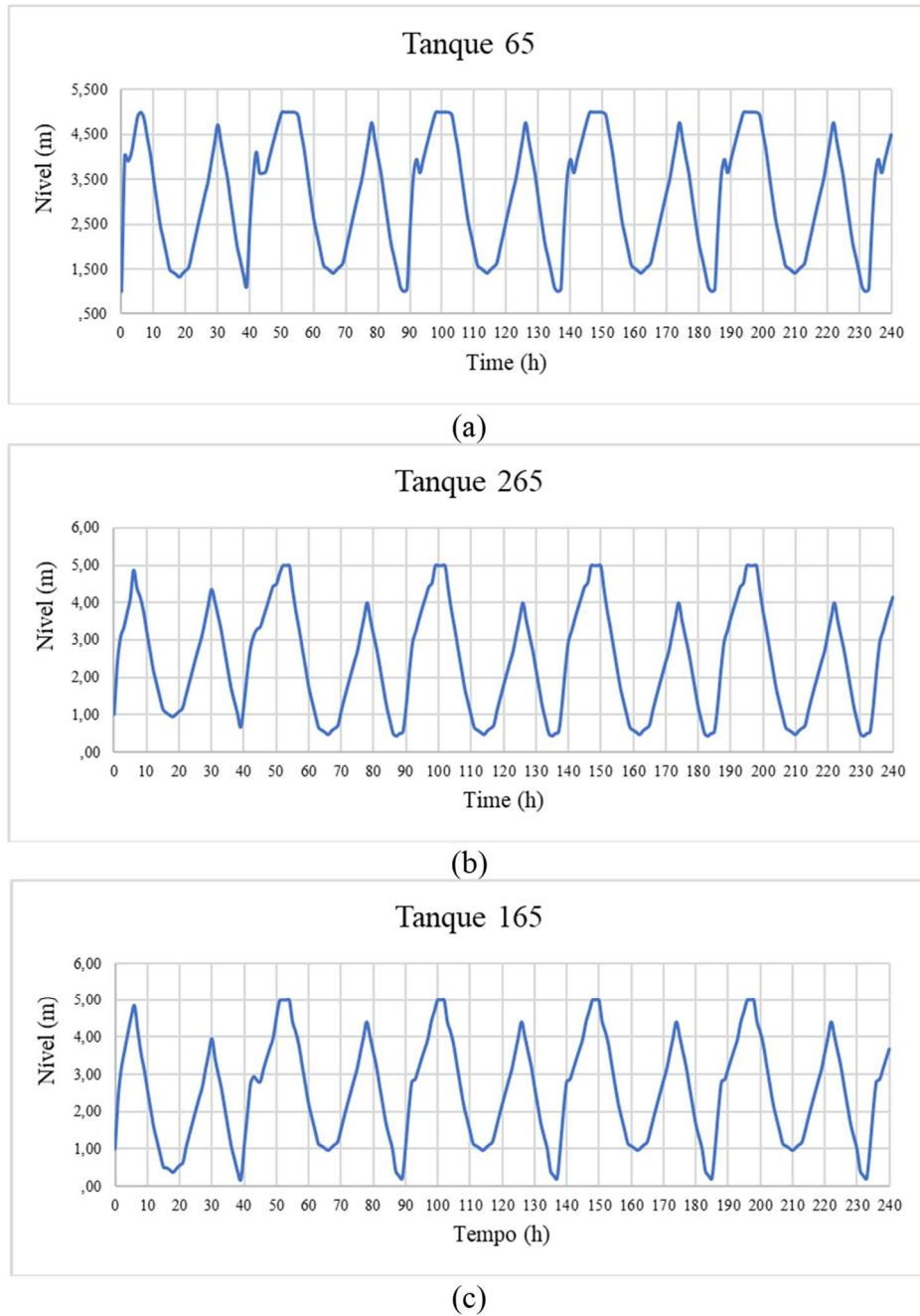
PROPRIEDADES	BOMBA111	BOMBA222	BOMBA333
Potência média (Kw)	344,85	283,52	314,79
Porcentagem de uso (%)	90,21	6,69	10,21
Consumo específico de energia (kWh/m ³)	0,25	0,26	0,26
Custo por dia (\$)	2.511,47	315,06	426,61

Fonte: Autor (2022).

Os custos totais com energia elétrica para esse sistema após a otimização foi de \$3.253,47. Comparando com o valor antes da otimização é possível verificar uma redução de 21,58% nos custos com energia elétrica.

O comportamento dos tanques 65, 256 e 165 após a otimização é apresentado pela Figura 31. Assim como na Rede Van Zyl *et al.* (2004), houve uma variação ao longo do tempo, e para a simulação por um período de 10 dias, o gráfico apresenta uma constância durante esse período. Com isso é possível mostrar que o bom aproveitamento dos tanques traz um melhor rendimento para sistema como um todo e consequentemente uma redução nos custos de operação.

Figura 31 - Comportamento dos Tanques 65 (a), 265 (b) e 165 (c), após a otimização



Fonte: Autor (2022).

4.7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os exemplos de aplicação apresentados na pesquisa são modelos já conhecidos na literatura científica, dessa forma é possível avaliar e analisar a eficácia do modelo proposto. Trabalhos como de Van Zyl *et al.* (2004), López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008), Paola *et al.* (2017) e Jafari-Asl *et al.* (2021) utilizaram a primeira rede apresentada neste trabalho como

referência. Utilizando os Algoritmos Genéticos e também outros algoritmos diferentes é possível verificar que o modelo proposto na pesquisa apresenta resultados promissores quando comparados a esses trabalhos. A Tabela 13 mostra a comparação desses resultados.

Tabela 13 - Comparação dos resultados para Rede Van Zyl *et al.* (2004)

METODOLOGIA	CUSTO DIÁRIO DE ENERGIA (\$/DIA)
Van Zyl <i>et al.</i> (2004)	344,20
López-Ibáñez <i>et al.</i> (2008)	322,50
Paola <i>et al.</i> (2017)	323,50
Jafari-Asl <i>et al.</i> (2021)	327,20
Abordagem proposta	292,60

Fonte: Autor (2022).

Esses trabalhos utilizaram abordagem diferentes para a representação das variáveis de decisão. Uns apenas a abordagem explícita, baseada no tempo para o acionamento das bombas, e outros utilizaram apenas a abordagem implícita, baseada no acionamento das bombas a partir do nível dos reservatórios. Já a pesquisa apresentada, trabalhou com a junção das duas abordagens, levando em consideração tanto o tempo de acionamento de bombas e o nível dos reservatórios mostrando que o trabalho em conjunto das duas abordagens traz resultados mais promissores.

O mesmo modelo foi aplicado a rede Any Town modificada e o resultado encontrado foi também comparado trabalhos como Rao e Salomons (2007), Costa *et al.* (2016) e Cimorelli, D’Aniello e Cozzolino (2020b), esses valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Comparação dos resultados para Any Town (modificada)

METODOLOGIA	CUSTO DIÁRIO DE ENERGIA (\$/DIA)
Rao e Salomons (2007)	3.612,84
Costa <i>et al.</i> (2016)	3.578,66
Cimorelli <i>et al.</i> (2020b)	3.575,54
Abordagem proposta	3.253,47

Fonte: Autor (2022).

O comportamento dos reservatórios é outro ponto a ser destacado no trabalho, a pesquisa teve o cuidado de garantir a continuidade do abastecimento, por isso a restrição do problema de

ter pressões negativas durante as simulações foi respeitada, e fazer uma análise para 10 dias de simulação comprova que a continuidade no abastecimento do sistema foi mantida.

A presente pesquisa mostrou que a aplicação de um modelo de otimização, baseado no Algoritmo Genético, é capaz de encontrar as melhores estratégias operacionais para acionamento de bombas, para minimizar os custos com energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água. O trabalho demonstrou que o uso eficiente da capacidade de armazenamento dos reservatórios e, paralelamente, a aplicação de uma programação otimizada para acionamento das bombas, possibilitam um maior aproveitamento da infraestrutura do sistema e, conseqüentemente, uma redução mais eficaz nos custos com eletricidade, sem precisar de grandes investimentos.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões desta pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

O modelo proposto nessa pesquisa mostra que a aplicação da otimização na operação de sistemas de abastecimento de água é capaz de trazer resultados promissores em termos de economia dos custos com energia elétrica, sem a necessidade de grandes investimentos na estrutura do sistema. A aplicação das regras operacionais de forma otimizada demonstrou ser uma opção eficiente de apoio à decisão para as empresas concessionárias responsáveis pelo abastecimento de água. Podendo chegar a uma redução em torno de 30% nas despesas com energia elétrica.

A aplicação do Algoritmo Genético canônico (simples) utilizado no modelo mostrou ser capaz de trazer resultados promissores para a aplicações em redes de abastecimento de água. O grande diferencial da pesquisa foi mostrar que para uma redução significativa dos custos é necessário analisar e otimizar todos os elementos que compõem o sistema. Grande parte das pesquisas trabalham apenas a otimização de um elemento do sistema, ou com a operação temporal das bombas ou com a operação dos reservatórios nos horários de picos de energia. A proposta da pesquisa é trabalhar em conjunto com as duas representações tanto com a operação otimizada dos reservatórios quanto com o tempo de acionamento das bombas ao longo do dia.

Para chegar aos resultados encontrados o modelo focou em trabalhar as restrições do problema de forma a forçar a utilização máxima dos reservatórios, dessa forma aumenta-se a eficiência da otimização do sistema como um todo, trazendo um melhor rendimento dos sistemas de bombeamento. A manipulação das restrições, das variáveis de decisão e das funções de penalidade foi essencial para encontrar a melhor resposta para a solução do problema de otimização proposto pela pesquisa.

A escolha de redes de abastecimento já trabalhadas por outros autores para a aplicação do modelo, serviu para comparar e mostrar que o problema proposto é capaz de trazer resultados promissores e que pode ser aplicável em outros sistemas do mesmo porte. Apesar de não ser o escopo da pesquisa, para a Rede Van Zyl *et al.* (2004), foi analisado o número de acionamentos das bombas no intervalo de 24 horas. Em alguns trabalhos, esse critério é considerado como uma restrição do problema, limitando o número de acionamentos, pois avaliam a questão dos

custos com manutenção do sistema de bombeamento. No modelo apresentado na pesquisa foi possível verificar que o aproveitamento máximo dos reservatórios e a determinação das regras operacionais, diminuiu significativamente o número de acionamento das bombas, de três vezes ao dia para apenas uma vez. Assim, indiretamente, houve uma redução também nos custos com a manutenção do sistema.

Por fim, é possível verificar que a aplicação da otimização utilizando AG e o estudo macro de otimização de todos os elementos que compõem um sistema de abastecimento de água, principalmente os reservatórios e o sistema de bombeamento, é capaz de trazer resultados promissores para a redução dos custos com energia elétrica, sendo uma ferramenta importante no gerenciamento operacional das empresas concessionárias de saneamento.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para expandir o conhecimento nesta linha de pesquisa, apresenta-se como sugestão para futuros trabalhos na área:

- Trabalhar a mesma proposta da pesquisa utilizando outro algoritmo de otimização;
- Aplicar o problema proposto para uma rede real;
- Como forma de melhorar a proposta, estudar a possibilidade de utilizar bombas de velocidades variáveis;
- Utilizar modelos de previsão de demanda para aplicação de um modelo mais próximo a realidade;
- Trabalhar a proposta para dados em tempo real.
- Estudar a utilização de um inversor de frequência para as bombas junto com um algoritmo de otimização.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, Mohammed; KAPELAN, Zoran. Fast Pump Scheduling Method for Optimum Energy Cost and Water Quality in Water Distribution Networks with Fixed and Variable Speed Pumps. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 145, n. 12, p. 1-13, dez. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001123](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001123).
- ABDALLAH, Mohammed; KAPELAN, Zoran. Iterative Extended Lexicographic Goal Programming Method for Fast and Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 143, n. 11, p. 1-10, nov. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000843](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000843).
- ABKENAR, Seyed Mohsen Sadatiyan; STANLEY, Samuel Dustin; MILLER, Carol J.; CHASE, Donald V.; MCELMURRY, Shawn P. Evaluation of genetic algorithms using discrete and continuous methods for pump optimization of water distribution systems. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, [S.L.], v. 8, p. 18-23, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.suscom.2014.09.003>.
- ALBUQUERQUE, Adalberto Aragão de. **Análises e métodos de otimização para eficiência energética de estações elevatórias em sistemas de abastecimento de água**. 2007. 98 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Centro de Tecnologia em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.
- ALLAWI, Mohammed Falah; JAAFAR, Othman; HAMZAH, Firdaus Mohamad; EL-SHAFIE, Ahmed. Novel reservoir system simulation procedure for gap minimization between water supply and demand. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 206, p. 928-943, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.237>.
- ALMEIDA, R.; BARBOZA, P. S. F. Efeito da reservação inicial sobre o desempenho operacional de sistemas de abastecimento de água. **Anais do Seminário Internacional sobre Projeto e Operação de Sistemas de Abastecimento de Água**, 2002
- ALVISI, Stefano; FRANCHINI, Marco. A Methodology for Pumping Control Based on Time Variable Trigger Levels. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 162, p. 365-372, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.076>.
- AWE, O.M.; OKOLIE, S.T.A.; FAYOMI, O.s.I. Optimization of Water Distribution Systems: a review. **Journal of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 1378, n. 2, p. 022068, 1 dez. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022068>.
- BAGLOEE, Saeed Asadi; ASADI, Mohsen; PATRIKSSON, Michael. Minimization of water pumps' electricity usage: a hybrid approach of regression models with optimization. **Expert Systems with Applications**, [S.L.], v. 107, p. 222-242, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.027>.
- BARROS FILHO, Emânuel Guerra; SALVINO, Laís Régis; BEZERRA, Saulo de Tarso Marques; SALVINO, Moisés Menezes; GOMES, Heber Pimentel. Intelligent system for

control of water distribution networks. **Water Supply**, [S.L.], v. 18, n. 4, p. 1270-1281, 26 set. 2017. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2017.188>.

BEZERRA, Saulo de Tarso Marques et al. Operational optimisation of water supply networks using a fuzzy system. **Water Sa**, [S.L.], v. 38, n. 4, p. 565-572, 4 jul. 2012.

BI, W.; DANDY, G.C.; MAIER, H.R. Improved genetic algorithm optimization of water distribution system design by incorporating domain knowledge. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 69, p. 370-381, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.010>.

BLINCO, Lisa J.; SIMPSON, Angus R.; LAMBERT, Martin F.; MARCHI, Angela. Comparison of Pumping Regimes for Water Distribution Systems to Minimize Cost and Greenhouse Gases. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 142, n. 6, p. 1-11, jun. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000633](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000633).

BOULOS, P. F. et al. OPTIMAL PUMP OPERATION OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS USING GENETIC ALGORITHMS. **AWWA Distribution System Symposium. American Water Works Association, Denver.**, 2001.

CABALLERO, Jose A.; RAVAGNANI, Mauro A.s.s. Water distribution networks optimization considering unknown flow directions and pipe diameters. **Computers & Chemical Engineering**, [S.L.], v. 127, p. 41-48, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.05.017>.

CAMBOIM, Wil Lavor Lucena; SILVA, Simplicio Arnauld da; GOMES, Heber Pimentel. Aplicação de técnicas Fuzzy no controle de pressão em sistemas de abastecimento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 67-77, mar. 2014. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522014000100008>.

CARVALHO, Paulo Sérgio O. de; GOMES, Heber Pimentel. **Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética**. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2012. 189 p.

CEMBRANO, G; WELLS, G; QUEVEDO, J; PÉREZ, R; ARGELAGUET, R. Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system. **Control Engineering Practice**, [S.L.], v. 8, n. 10, p. 1177-1188, out. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0967-0661\(00\)00058-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0967-0661(00)00058-7).

CHANG, Yungyu; CHOI, Gyewoon; KIM, Juhwan; BYEON, Seongjoon. Energy Cost Optimization for Water Distribution Networks Using Demand Pattern and Storage Facilities. **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 1118, 9 abr. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su10041118>.

CHEN, Wanpeng; TAO, Tao; ZHOU, Aijiao; ZHANG, Lu; LIAO, Lei; WU, Xumeng; YANG, Kai; LI, Chenxiu; ZHANG, Tian C.; LI, Zhi. Genetic optimization toward operation of water intake-supply pump stations system. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 279, p. 123573, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123573>.

CIMORELLI, Luigi; COVELLI, Carmine; MOLINO, Bruno; PIANESE, Domenico. Optimal Regulation of Pumping Station in Water Distribution Networks Using Constant and Variable Speed Pumps: a technical and economical comparison. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 10, p. 2530, 16 maio 2020a. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13102530>.

CIMORELLI, Luigi; D'ANIELLO, Andrea; COZZOLINO, Luca. Boosting Genetic Algorithm Performance in Pump Scheduling Problems with a Novel Decision-Variable Representation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 146, n. 5, p. 1-11, maio 2020b. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001198](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001198).

COSTA, Luis Henrique Magalhães. **Utilização de um algoritmo genético híbrido na operação de sistemas de abastecimento de água com ênfase na eficiência energética**. 2010. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós – Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

COSTA, Luis Henrique Magalhães; CASTRO, Marco Aurélio Holanda de; RAMOS, Helena. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 187-196, jun. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522010000200011>.

COSTA, Luis Henrique Magalhães; PRATA, Bruno de Athayde; RAMOS, Helena M.; CASTRO, Marco Aurélio Holanda de. A Branch-and-Bound Algorithm for Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 1037-1052, 15 dez. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-015-1209-2>.

CUNHA, Alice Araújo Rodrigues. **Otimização energética em tempo real da operação de sistemas de abastecimento de água**. 2009. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP, São Carlos - SP, 2009.

DEB, K. Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization in Engineering Design. **Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science**, n. ii, p. 135–161, 1999.

FELDMAN, M. Aspects of energy efficiency in water supply systems. **Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference**, n. April, p. 85–89, 2009.

GIACOMELLO, Carlo; KAPELAN, Zoran; NICOLINI, Matteo. Fast Hybrid Optimization Method for Effective Pump Scheduling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 139, n. 2, p. 175-183, mar. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000239](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000239).

GOLDBERG, D. .; HOLLAND, J. . Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. **Reading, MA: Addison-Wesley**, v. 19, p. 117–119, 1989.

GOMES, Heber Pimentel. **Eficiência hidráulica e energética em saneamento: análise econômica de projetos**. 2. ed. João Pessoa - PB: Editora Universitária - UFPB, 2009a. 145 p.

GOMES, Herber Pimentel. **Sistema de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias**. 3. ed. João Pessoa - Paraíba: Editora Universitária - UFPB, 2009b. 277 p.

GOUVEIA, Roberta Macêdo Marques. **Modelo computacional de otimização para dimensionamento de redes de distribuição de água abastecidas por múltiplos bombeamentos**. 2012. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Paraíba, 2012.

HASHEMI, Seyed Saeed; TABESH, Massoud; ATAEEKIA, Behzad. Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks. **Urban Water Journal**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 335-347, 16 jul. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062x.2013.795233>.

HELMBRECHT, Jorge; PASTOR, Jordi; MOYA, Carolina. Smart Solution to Improve Water-energy Nexus for Water Supply Systems. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 186, p. 101-109, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.215>.

HILTON, B. A. B. C.; CULVER, T. B. **Constraint handling for genetic algorithms in optimal remediation design**. v. 126, n. June, p. 128–137, 2000.

HUNT, Julian David; NASCIMENTO, Andreas; CATEN, Carla Schwengber Ten; TOMÉ, Fernanda Munari Caputo; SCHNEIDER, Paulo Smith; THOMAZONI, André Luis Ribeiro; CASTRO, Nivalde José de; BRANDÃO, Roberto; FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de; MARTINI, José Sidnei Colombo. Energy crisis in Brazil: impact of hydropower reservoir level on the river flow. **Energy**, [S.L.], v. 239, p. 121927, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.121927>.

IZQUIERDO, J. et al. Optimization in water systems: A PSO approach. **Proceedings of the 2008 Spring Simulation Multiconference, SpringSim'08**, p. 239–246, 2008.

JAFARI-ASL, Jafar; AZIZYAN, Gholamreza; MONFARED, Seyed Arman Hashemi; RASHKI, Mohsen; ANDRADE-CAMPOS, Antonio G.. An enhanced binary dragonfly algorithm based on a V-shaped transfer function for optimization of pump scheduling program in water supply systems (case study of Iran). **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 123, p. 105323, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105323>.

JALALI, M. R.; AFSHAR, A.; MARIÑO, M. A. Improved ant colony optimization algorithm for reservoir operation. **Scientia Iranica**, v. 13, n. 3, p. 295–302, 2006.

JOWITT, PAUL W.; GERMANOUPoulos, G. Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks. **J. Water Resour. Plann. Manage.**, v. 118, n. 4, p. 406–422, 1992.

KARAMI, J. et al. Using fast messy genetic algorithm to optimally schedule pump operation. In: **Advances in Science, Technology and Innovation**. [s.l.] Springer Nature, 2020. p. 509–512.

KATOCH, Sourabh; CHAUHAN, Sumit Singh; KUMAR, Vijay. A review on genetic algorithm: past, present, and future. **Multimedia Tools and Applications**, [S.L.], v. 80, n. 5, p. 8091-8126, 31 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>.

KLISE, Katherine A. *et al.* **Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual**. S.I: United States Environmental Protection Agency, 2017.

KLISE, K. A.; MURRAY, R.; HAXTON, T. An overview of the water network tool for resilience (WNTR). **1st International WDSA / CCWI 2018 Joint Conference**, 2018.

LANSEY, K.E.; AWUHMAH, K. OPTIMAL PUMP OPERATIONS CONSIDERING PUMP SWITCHES. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 120, n. 1, p. 17–35, 1994.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, Manuel. **Operational Optimisation of Water Distribution Networks**. n. November, p. 209, 2009.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; DEVI PRASAD, T.; PAECHTER, B. Optimal pump scheduling: Representation and multiple objectives. **Proceedings of the 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2005: Water Management for the 21st Century**, v. 1, 2005.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, Manuel; PRASAD, T. Devi; PAECHTER, Ben. Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 134, n. 4, p. 337-346, jul. 2008. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2008\)134:4\(337\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2008)134:4(337)).

LUNA, Tiago; RIBAU, João; FIGUEIREDO, David; ALVES, Rita. Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 213, p. 342-356, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.190>.

MACKLE, G. Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply. **1st International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications (GALESIA)**, [S.L.], p. 400-405, 1995. IEE. <http://dx.doi.org/10.1049/cp:19951082>.

MADADGAR, S.; AFSHAR, A. An Improved Continuous Ant Algorithm for Optimization of Water Resources Problems. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 23, n. 10, p. 2119-2139, 18 nov. 2008. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-008-9373-2>

MAIER, H.R.; KAPELAN, Z.; KASPRZYK, J.; KOLLAT, J.; MATOTT, L.s.; CUNHA, M.C.; DANDY, G.C.; GIBBS, M.s.; KEEDWELL, E.; MARCHI, A. Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: current status, research challenges and future directions. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 62, p. 271-299, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.013>.

MAIER, Holger R.; SIMPSON, Angus R.; FOONG, W. K.; PHANG, K. Y.; SEAH, H. Y.; TAN, C. L. Ant Colony Optimization for the Design of Water Distribution Systems. **Bridging The Gap**, [S.L.], p. 200-209, 15 maio 2001. American Society of Civil Engineers. [http://dx.doi.org/10.1061/40569\(2001\)375](http://dx.doi.org/10.1061/40569(2001)375).

MAKAREMI, Yasaman; HAGHIGHI, Ali; GHAFOURI, Hamid Reza. 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**, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 1283-1304, 8 fev. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-017-1577-x>.

MALA-JETMAROVA, Helena; SULTANOVA, Nargiz; SAVIC, Dragan. Lost in Optimisation of Water Distribution Systems? A Literature Review of System Design. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 307, 13 mar. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10030307>.

MARCHI, Angela; SIMPSON, Angus R.; LAMBERT, Martin F. Optimization of Pump Operation Using Rule-Based Controls in EPANET2: new ettar toolkit and correction of energy computation. **Journal Of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 142, n. 7, p. 1-11, jul. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000637](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000637).

MENKE, Ruben; ABRAHAM, Edo; PARPAS, Panos; STOIANOV, Ivan. Approximation of System Components for Pump Scheduling Optimisation. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 119, p. 1059-1068, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.935>.

MENKE, Ruben; ABRAHAM, Edo; STOIANOV, Ivan. Modeling Variable Speed Pumps for Optimal Pump Scheduling. **World Environmental and Water Resources Congress 2016**, [S.L.], p. 199-208, 16 maio 2016. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479858.022>.

MUHAMMED, K. A.; FARMANI, R. Energy Optimization Using a Pump Scheduling Tool in Water Distribution Systems. **Aro-the Scientific Journal of Koya University**, v. 8, n. 1, p. 112-123, 2020.

NIÑO, Oscar Tomas Vegas *et al.* **Using the Epanet toolkit v2.00.12 with different programming environments** /. México: Mexican Institute Of Water Technology, 2018. Disponível em: www.imta.gob.mx. Acesso em: 28 maio 2020.

NITIVATTANANON, BY VILA; SADOWSKI, ELAINE C.; QUIMPO, RAFAEL G. Optimization of Water Supply System Operation. **J. Water Resour. Plann. Manage**, v. 122, n. October, p. 8-9, 1996.

ODAN, F. Keizo; REIS, L. F. Ribeiro; KAPELAN, Z. Use of Metamodels in Real-Time Operation of Water Distribution Systems. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 89, p. 449-456, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.211>.

ODAN, Frederico Keiko. **Estudo de confiabilidade aplicado à otimização da operação em tempo real de redes de abastecimento de água**. 2013. 210 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos - São Paulo, 2013.

ORMSBEE, E.LINDELL ; REDDY, S. L. NONLINEAR HEURISTIC FOR PUMP OPERATIONS. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 121, n. August, p. 302–309, 1995.

OSTFELD, A.; TUBALTZEV, A. Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 2, p. 107–118, 2008.

PAOLA, F. de; FONTANA, N.; GIUGNI, M.; MARINI, G.; PUGLIESE, F. Optimal solving of the pump scheduling problem by using a Harmony Search optimization algorithm. **Journal Of Hydroinformatics**, [S.L.], v. 19, n. 6, p. 879-889, 28 ago. 2017. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2017.132>.

PASHA, M. F. K.; LANSEY, K. Optimal Pump Scheduling by Linear Programming. **World Environmental and Water Resources Congress 2009**, [S.L.], p. 395-404, 12 maio 2009. American Society of Civil Engineers. [http://dx.doi.org/10.1061/41036\(342\)38](http://dx.doi.org/10.1061/41036(342)38).

PEDROSA FILHO, Laudelino de Araújo. **Um modelo de operação de sistemas adutores de abastecimento de água com vistas a minimização dos custos energéticos**. 2006. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Paraíba, 2006.

PINHO, Alexandre Ferreira de et al. Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações. In: LUIZ, Heitor Silvério Lopes; RODRIGUES, Luiz Carlos de Abreu; STEINER, Maria Teresinha Arns. **Heitor Silvério Lopes Luiz Carlos de Abreu Rodrigues Maria Teresinha Arns Steiner (Editores) Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional**. Curitiba - Paraná: Omnipax, 2013. p. 472. Disponível em: <http://www.omnipax.com.br>. Acesso em: 13 jul. 2020.

PRASAD, T. Devi; LÓPEZ-IBÁÑEZ, Manuel; PAECHTER, Ben. Ant-Colony Optimization for Optimal Pump Scheduling. **Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006**, [S.L.], p. 1-8, 13 mar. 2008. American Society of Civil Engineers. [http://dx.doi.org/10.1061/40941\(247\)77](http://dx.doi.org/10.1061/40941(247)77).

PRASAD, T. Devi; PARK, Nam-Sik. Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. **Journal Of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 130, n. 1, p. 73-82, jan. 2004. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2004\)130:1\(73\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2004)130:1(73)).

RAO, Zhengfu; ALVARRUIZ, Fernando. Use of an artificial neural network to capture the domain knowledge of a conventional hydraulic simulation model. **Journal Of Hydroinformatics**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 15-24, 1 jan. 2007. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2006.014>.

RAO, Zhengfu; SALOMONS, Elad. Development of a real-time, near-optimal control process for water-distribution networks. **Journal of Hydroinformatics**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 25-37, 1 jan. 2007. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2006.015>.

RECA, Juan; MARTÍNEZ, Juan; LÓPEZ, Rafael. A Hybrid Water Distribution Networks Design Optimization Method Based on a Search Space Reduction Approach and a Genetic Algorithm. **Water**, [S.L.], v. 9, n. 11, p. 845, 2 nov. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w9110845>.

ROSSMAN, Lewis A. **EPANET 2 USERS MANUAL**. S.L: Unit States Environmental Protection Agency, 2000.

SALVINO, Laís Régis; GOMES, Heber Pimentel; BEZERRA, Saulo de Tarso Marques. Design of a Control System Using an Artificial Neural Network to Optimize the Energy Efficiency of Water Distribution Systems. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 36, n. 8, p. 2779-2793, 16 maio 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-022-03175-4>.

SARBU, I.; MIRZA, M.; CRASMAREANU, E. A review of modelling and optimisation techniques for district heating systems. **International Journal of Energy Research**, n. February, p. 1–27, 2019.

SAVIC, D. A. Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, n. 2, p. 67–77, 1997a.

SAVIC, Dragan A.; WALTERS, Godfrey A.; SCHWAB, Martin. Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply. **Evolutionary Computing**, [S.L.], p. 227-235, 1997b. Springer Berlin Heidelberg. <http://dx.doi.org/10.1007/bfb0027177>.

SELA, Lina; HOUSH, Mashor. Increasing Usability of Water Distribution Analysis Tools through Plug-In Development in EPANET. **Journal of Hydraulic Engineering**, [S.L.], v. 145, n. 5, p. 1-4, maio 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001596](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001596).

SILVA, Magno José Gomes da. **Controle adaptativo aplicado a um sistema de bombeamento de água visando a redução das perdas de energia elétrica e água**. 2014. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Paraíba, 2014.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico Temático, Serviços de Água e Esgoto, Visão Geral, ano referência 2019**. Brasília. p. 183, 2020.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico Temático, Serviços de Água e Esgoto, Visão Geral, ano referência 2020**. Brasília. p. 91, 2021.

SNSA, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Eficiência energética - ações de assistência técnica em redução e controle de perdas de água e uso eficiente de energia elétrica**. Brasília, 2018.

SOUSA, Anselmo Claudino de; SOARES, Alexandre Kepler. Modelo para otimização da operação de sistemas de distribuição de água utilizando o algoritmo genético multiobjetivo SPEA. **Exacta**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 313-324, 8 abr. 2015. University Nove de Julho. <http://dx.doi.org/10.5585/exactaep.v12n3.5193>.

SURIBABU, C. R.; NEELAKANTAN, T. R. Design of water distribution networks using particle swarm optimization. **Urban Water Journal**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 111-120, jun. 2006. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15730620600855928>.

VAIRAVAMOORTHY, Kalanithy; ALI, Mohammed. Pipe Index Vector: a method to improve genetic-algorithm-based pipe optimization. **Journal of Hydraulic Engineering**, [S.L.], v. 131, n. 12, p. 1117-1125, dez. 2005. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2005\)131:12\(1117\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:12(1117)).

VAN ZYL, Jakobus E.; SAVIC, Dragan A.; WALTERS, Godfrey A. Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 130, n. 2, p. 160-170, mar. 2004. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2004\)130:2\(160\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2004)130:2(160)).

VERICAT, Fernando; STOICO, César O.; CARLEVARO, C. Manuel; RENZI, Danilo G. Genetic algorithm for the pair distribution function of the electron gas. **Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 283-289, dez. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12539-011-0108-3>.

VILANOVA, Mateus Ricardo Nogueira; BALESTIERI, José Antônio Perrella. Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 30, p. 701-714, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.024>.

VOSS, S. **Lecture Notes in Computer Science Meta-heuristics: The State of the Art**. n. January 2000, p. 0–23, 2017.

WALSKI, T. M. *et al.* Battle of the network models: epilogue. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 191–203., 1987.

WANG, Dongshu; TAN, Dapei; LIU, Lei. Particle swarm optimization algorithm: an overview. **Soft Computing**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 387-408, 17 jan. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00500-016-2474-6>.

YU, G.; POWELL, R. S.; STERLING, M. J. H. Optimized pump scheduling in water distribution systems. **Journal of Optimization Theory and Applications**, [S.L.], v. 83, n. 3, p. 463-488, dez. 1994. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02207638>.

ZECCHIN, Aaron C.; SIMPSON, Angus R.; MAIER, Holger R.; LEONARD, Michael; ROBERTS, Andrew J.; BERRISFORD, Matthew J. Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation. **Mathematical and Computer Modelling**, [S.L.], v. 44, n. 5-6, p. 451-468, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2006.01.005>.

ZHANG, Yiyi; FANG, Jiake; WANG, Saige; YAO, Huilu. Energy-water nexus in electricity trade network: a case study of interprovincial electricity trade in China. **Applied Energy**, [S.L.], v. 257, p. 1-23, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113685>

ZESSLER, BY U. SHAMIR, U. Optimal operation of water distribution systems. **J. Water Resour. Plann. Manage.**, 1989.

ZHEN, J.L.; WU, C.B.; LIU, X.R.; HUANG, G.H.; LIU, Z.P. Energy-water nexus planning of regional electric power system within an inexact optimization model in Tangshan City, China. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 266, p. 121997, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121997>.

ZHENG, Feifei; SIMPSON, Angus R.; ZECCHIN, Aaron C. A Method for Assessing the Performance of Genetic Algorithm Optimization for Water Distribution Design. **Water Distribution Systems Analysis 2010**, [S.L.], p. 771-785, 21 dez. 2011. American Society of Civil Engineers. [http://dx.doi.org/10.1061/41203\(425\)72](http://dx.doi.org/10.1061/41203(425)72).

ZHENG, Feifei; ZECCHIN, Aaron C.; NEWMAN, Jeffery P.; MAIER, Holger R.; DANDY, Graeme C. An Adaptive Convergence-Trajectory Controlled Ant Colony Optimization Algorithm with Application to Water Distribution System Design Problems. **Ieee Transactions on Evolutionary Computation**, [S.L.], v. 21, n. 5, p. 773-791, out. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tevc.2017.2682899>.

APÊNDICE A - OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF PUMPING SYSTEMS AND RESERVOIRS OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS WITH EMPHASIS IN ENERGY EFFICIENCY

OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF PUMPING SYSTEMS AND RESERVOIRS OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS WITH EMPHASIS IN ENERGY EFFICIENCY

**Tuane Batista do Egito¹,
José Roberto Gonçalves de Azevedo²,
Saulo de Tarso Marques Bezerra^{3*}**

Abstract

Electricity costs for pumping account for the majority of operating expenses for water distribution systems. Therefore, researchers and technicians in the water sector have sought to develop techniques that minimize the consumption of electricity in these systems. The large number of elements, which can change state at any time, generates a range of possibilities that makes it difficult to determine which operational scheme is most efficient. Defining the best operating rules for pumping systems is often a complex activity. In this context, the present work presents an optimization model for water distribution systems that combines the efficient use of reservoirs with the best operational rule for activating pumping systems. Using a genetic algorithm, the developed model aims to minimize the operating costs of electrical energy in the systems. The results obtained indicated that, with a better use of the water storage infrastructure, it is possible to reduce the electricity costs of the system as a whole.

Keywords: water supply; operational rules; genetic algorithm; optimization.

¹ Postgraduation Program in Civil Engineering, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brazil. E-mail: tuaneegito@yahoo.com.br.

² Department of Civil Engineering, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brazil. E-mail: jose.azevedo@ufpe.br.

³ Corresponding author

Department of Technology, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Marielle Franco, km 59, Nova Caruaru, Caruaru, Pernambuco, Brazil, CEP 55014-900. E-mail: saulo.tarso@ufpe.br.

Introduction

The increase in water demand in large urban centers and the scarcity of energy resources have demanded more expensive and complex water supply systems from water utilities. Pumping stations play a key role in meeting these demands, so they are responsible for a significant portion of electricity costs in the water sector (Turci *et al.*, 2019) (CHEN *et al.*, 2021). The systems that operate only by gravity are rare, and many times there is a need for the use of pump stations to discharge water to various points in the network, resulting in high electricity costs. About 20% of the world's energy is consumed in pumping systems (DADAR *et al.*, 2021). Therefore, the quest to improve energy efficiency has a significant impact on the sector's operations and, consequently, the reduction in energy costs (JAFARI-ASL *et al.*, 2021).

The energy consumption of the worldwide water sector accounted for 120 Mtoe in 2014, mainly in the form of electricity, corresponding to 4% of the total global electricity consumption (Luna *et al.*, 2019). Therefore, the search for methodologies and techniques which provide the increase in energy efficiency in the pumping systems and, consequently, the reduction in the costs with energy, has been paramount for water utilities. Nevertheless, it is important to highlight that the combat to excessive energy consumption must not compromise the quality of the supply service.

In Brazil, according to the Brazilian National System of Sanitation Information, base year 2020, the consumption of electricity in the water utilities was of 12.4 TWh, which originates a significant expense in their management and operation. On average, there is a consumption of 0.72 kWh for each cube meter provided by the Brazilian water utilities. Therefore, the efficient use of electricity allows cost reduction, better use of the existing civil and electromechanical infrastructure, in addition to postponing the application of resources to expand the systems.

The operationalization of the water distribution systems is often a complex activity. The great number of elements, which can have their states changed at any given time, generates a range of operational possibilities that hinders the efficient operation of these systems. In many cases, operational decisions are exclusively linked to the experience of technicians, who rarely have specific knowledge about hydraulic and energy efficiency. Among the various operating possibilities, there is the pumping routine (ideal solution) which results in the lowest operating cost and meets the demands and pressures established for the system.

The reduction in operational costs and energy losses in pumping systems, and the use of smart management strategies such as Optimal Pump Scheduling (OPS), are attractive options for water companies and managing authorities (Helmbrecht *et al.*, 2017; Cimorelli *et al.*, 2020b).

Given the complexity, the employment of optimization methods appears as an important and appropriate tool to increase energy efficiency and, thus, reduce the costs with electricity and human interference in the decisions. Finding the ideal solution for this type of non-linear problem, with various constraint, by traditional deterministic methods, is limited to relatively small systems, which have reduced search spaces (Abkenar *et al.*, 2015). For

problems in large scale, several studies demonstrate that the metaheuristic algorithms provide a more efficient approach for the search of optimal solutions.

Abdallah and Kapelan (2017) ensure that the minimization of energy costs in water distribution systems is not obtained only operating the pumps during the periods of low electric tariff, but also close to their best efficiency points, in other words, a pump may cost less to work if it operates during a period of high electric tariff, but with high efficiency, instead of working during a period of low tariff, but with low efficiency.

Despite the countless publications in the past 20-30 years, the operational optimization problems in water distribution systems are far from being solved (Abdallah and Kapelan, 2019). This is due to the complexity of the problem, the lack of precision in the mathematical formulations of the problem, the number of variables involved, and the specificities of each system. Abdallah and Kapelan (2019) also affirm that there is still no consensus on the best optimization method that can provide the global optimal solution in a short computational time.

Given this problem, optimization in supply systems should not be restricted to the operation of pumps. A punctual energy efficiency plan can bring promising results, although incomplete, so it is important to have a macro view of the entire system, considering all the elements that compose it. The selection of optimal tank firing levels to control pump operation has been successful in minimizing energy costs. Research shows that using optimized tank levels saved 20% of energy consumption when compared to fixed tank levels (LUNA et al., 2019).

The evaluation of the optimized use of the water storage reservoirs has been raised by several researchers. Chang *et al.* (2018) state that previous studies have verified the use of the reservoirs and their hydraulic characteristics, and observed that only 37.6% of the total storage capacity is used. Reservoirs are usually designed to maintain their operation at their maximum level, forcing the pumping systems to be activated several times, providing high electricity consumption.

Hence, it is important to raise that, for a better efficiency of a water supply system, not only the operational optimization of pump performance must be considered, but also a better use of the whole useful volume of the reservoirs, in order to obtain a higher economy in the electricity consumption of the whole system.

Therefore, the main purpose of this research is to guarantee that the whole useful volume of the reservoirs be properly provided to the system, so that the pumping systems can be less required, minimizing operating costs (energy cost). In a first moment, the optimum politics of storage is determined for each tank, which will be imposed by a constraint to the problem and, subsequently, the optimal scaling of the pumps is performed by the application of the genetic algorithm (GA). GA are frequently used to approximate the solution of optimal pump scheduling problems (Cimorelli *et al.*, 2020b). Recent research demonstrates that a well-implemented GA is able to provide excellent solutions (e.g., Luna *et al.*, 2019; Cimorelli *et al.*, 2020a, 2020b; Chen *et al.*, 2021).

Materials and methods

The problem of this research is characterized by the use of resources from the Operational Research, with the help of a hydraulic simulation model, aiming at optimizing a nonlinear objective function with constraints. The optimization model determines the best operational rules for the activation of pumps in water distribution systems, by the optimization of the use of reservoirs and using the Genetic Algorithm. Thus, it is possible to reduce the costs with electricity, guaranteeing the continuity in the supply.

To obtain efficient operational strategies for water distribution systems, López-Ibáñez *et al.* (2008), Maier *et al.* (2014), De Paola *et al.* (2017), and Abdallah and Kapelan (2017) claim that the use of hydraulic simulators coupled to optimization algorithms brings positive results to locate the best solutions to operationalize the system. The hydraulic simulator evaluates the solutions indicated by the algorithm, respecting the hydraulic viability of the system and energy cost.

The proposal of this work is to use the genetic algorithm (GA), together with the hydraulic simulator EPANET, to define optimum operational routines of water pumping systems, considering the most efficient use of the water storage tanks, and thus minimizing the costs with electricity.

The genetic algorithm minimizes a nonlinear objective function, determining the best operating rule to be applied to the water distribution system, considering the consumption demands; the initial boundary conditions; and the hydraulic, physical and operational constraints of the system. Among the constraints, there is one which is defined determining that the pump be activated only when the maximum volume is used, guaranteeing its better use.

Mathematical Formulation

The objective function considers the pumps' total power consumption, which is the hydraulic power divided by the pumping system efficiency; the value of the energy tariff; the number of pumps in the pump station; the number of pumping systems; and operation time, which, for this work, will be in the planning horizon of 24 hours.

The decision variable considered will be the operational state of the pumps, in other words, at each time interval, an analysis will be performed regarding the need for activating the pumps to maintain the system working without interruptions, but with its optimized consumption.

Therefore, the objective function can be expressed as the sum of energy consumption of the pumping systems, within the operational horizon of 24 hours, by the energy consumed by each pump within the interval of one hour if it is activated or not, according to Equation (1):

$$\text{Min } C_t = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} \frac{9.8 \times Q \times H}{\eta} \times TF \times \Delta t$$

Equation (1)

Where:

C_t : Cost with electricity (\$);

Q : pumped water flow (m³/s);

H : Pump head (m);

η : Pumping system efficiency;

TF : Energy tariff (\$/kWh);

Δt : Number of hours in which the pump is activated.

The technical feasibility of the optimal solution is ensured by the inclusion of method constraints, which guarantee the satisfaction of water demands at adequate pressure levels and the maintenance of suitable water tank levels. The system constraints can be expressed as follows:

- d) Maximum level and minimum level of the reservoirs:** the levels of the reservoirs must fit within the minimum and maximum limits during the whole simulation period, guaranteeing the continuity of supply to the system. Equation (2) shows the interval that must be respected for the constraint to be met.

$$H_j(min) \leq H_j(t) \leq H_j(max) \quad \text{Equation (2)}$$

Where:

$H_j(min)$: minimum level of reservoir j (meters);

$H_j(t)$: level of reservoir j at time t (meters);

$H_j(max)$: maximum level of reservoir j (meters).

- e) Pressures on the network:** the pressures on all nodes have to respect the maximum and minimum limits for each time limit analyzed. This parameter guarantees the continuity of water supply to the system, as shows Equation (3).

$$P_i(min) \leq P_i(t) \leq P_i(max) \quad \text{Equation (3)}$$

Where:

$P_i(min)$: minimum pressure required in node i ;

$P_i(t)$: pressure on node i at the time interval t ;

$P_i(max)$: maximum pressure required in node i .

- f) Maximum use of the reservoirs:** This constraint determines that the maximum volumes of the reservoirs be used, aiming at optimizing the operation and, thus, at the contribution to a higher efficiency in the costs with energy. Equation (4) expresses mathematically this system constraint:

$$Er = \frac{\sum_{r=1}^{nr} V(cons)}{V(cap)} \quad \text{Equation (4)}$$

Where:

Er : Efficiency index of reservoir r (%);

$V(cons)$: Volume used in reservoir r (m³);

$V(cap)$: Volumetric capacity of reservoir r (m³);

- g) Status of initial recovery of the reservoirs:** for an operational horizon of 24 hours, it is established that the final operating levels of the reservoirs must be equal or superior to the pre-established initial levels. This constraint guarantees the continuity of the operation in the subsequent periods (Equation 5):

$$L_r(fin) \geq L_r(ini)$$

Equation (5)

Where:

$L_r(fin)$: Level of the reservoir at the end of the schedule of 24h.

$L_r(ini)$: Level of the reservoir in the beginning of the schedule.

Hydraulic simulation

Hydraulic simulation using computational tools is the most effective way to analyze the behavior of real water distribution systems. These tools used mathematical models that are capable of satisfactorily representing the processes of these systems.

The hydraulic simulator used in this study was EPANET (developed by the US Environmental Protection Agency), which is the commonly used open-source software for hydraulic and quality simulations of supply networks (Khatavkar and Mays, 2019). EPANET uses a hybrid node-loop approach to hydraulically balance the system, solving the flow continuity (mass conservation) and headloss (energy conservation) equations of the network at a given point in time (Bonhuys *et al.*, 2020). It was chosen because it is widely adopted by researchers (e.g. Bonhuys *et al.*, 2020; Naidu *et al.*, 2020; Naserizade *et al.*, 2021; Macêdo *et al.*, 2021) and water technicians. As it is open software package, it has already been widely evaluated and tested by the scientific community. EPANET is especially used in optimization problems because it allows for iteration between algorithms developed in different programming languages (Basic 6.0, Basic .NET, MATLAB, C #, Python and C ++) with the calculation routines of the simulator itself (Vegas Niño *et al.*, 2018).

To apply the computational model, it was necessary to develop an auxiliary software for the iteration between EPANET and the optimization algorithm. This software was written in the Python 3.8 language by the Water Network Tool for Resilience – WNTR (Klise *et al.*, 2018). WNTR is a Python package designed to simulate and analyze the resilience of water distribution systems. Here, a network refers to the collection of pipes, pumps, valves, junctions, tanks and reservoirs that make up a water distribution system. WNTR has an application programming interface that is flexible and allows changes in the system structure and operations, along with the simulation of disruptive incidents and recovery actions (Klise *et al.*, 2018).

WNTR is accessible at EPANET by a plug-in, improving the resources of hydraulic analysis of the US EPA simulator. In this configuration, EPANET acts as a WNTR input-output interpreter (Sela and Housh, 2019). US EPA, in partnership with the Sandia National Laboratories, has developed this tool to explore the capacity of their systems to handle disruptive incidents and guide the planning necessary to make systems more resilient over time in a single software framework (Klise *et al.*, 2018).

Optimization by the Genetic Algorithm

Optimal pump scheduling (OPS) problem consists of seeking a sequence of pump actuations (ON/OFF) able to achieve the minimum energy consumption during an operating cycle (Figure 1). OPS problem is classified as a large combinatorial discrete nonlinear

nondeterministic polynomial-hard (NP-hard) optimization problem. Such problems are nonlinear and non-convex, and deterministic optimization techniques cannot usually solve them. Therefore, several evolutionary algorithms have been developed and are available to solve OPS problems. The traditional algorithm is the genetic algorithm (GA) that has been widely applied and developed during years showing very good performance (Niccolai *et al.*, 2021).

In this research, GA determines the best solution from the systematic evaluation of a random group of solutions (initial population). It was chosen because it is a widespread algorithm in the scientific community, easily adaptable to optimization problems and water distribution networks. The parameters used were based on recent studies, Abkenar *et al.* (2015), Bi *et al.* (2015), Chang *et al.* (2018) and Luna *et al.* (2019), where they have already been tested and evaluated, proving its efficiency for this type of research.

Pump	Pump 1						Pump 2						Pump 3					
Chromosome	1	1	0	1	...	1	0	0	0	1	...	0	0	1	1	1	...	0
Hour	1	2	3	4	...	24	1	2	3	4	...	24	1	2	3	4	...	24

0 = ON
1 = OFF

Figure 1: Binary representation of a chromosome for 3 pumps and 24 intervals.

GA is a heuristic inspired by Darwin's theory of natural evolution, reproducing the process of natural selection, in which the most fit individuals in a population are selected for breeding to produce offspring for the subsequent generation (Bagloee *et al.*, 2018; Luna *et al.*, 2019). The analogy consists in maintaining and developing the solutions that are closer to the optimum, whereas population diversity is used to search for more solutions.

As in Genetics, the solutions are described as a group of chromosomes which contain a chain of genes that corresponds to the controls (condition on and off) of a pump during the operating period (for instance, 24 h) (Abkenar *et al.*, 2015). After assembling the chromosomes of all pumps in the network, a solution is generated. From a group of random solutions (initial generation – parents) GA optimization starts. To update the current population, the algorithm selects a parent chromosome based on its fitness function and by crossing and mutation operators, descending chromosomes result, which will be used to form the population for the subsequent generation with better solutions. After repeating this process several times, GA advances towards an optimal solution, until the stopping criterion is reached, and the last generation will contain a group of optimum solutions.

The parameters used in the stopping criteria of the algorithm, such as: population size, mutation rate, breeding rate, number of iterations; are extremely important items and which can directly interfere in optimization. Increasing the number of solutions, that is, population size, will cover a larger search space, increasing the probability of finding a larger number of optimum solutions, and consequently the processing of data will take more time and computational expenditure. Nevertheless, for problems regarding supply network optimization, the hydraulic analysis requires a little more of the algorithm. To have a notion, in a problem of pump activation, the dimension of the search space for the solution of the problem is defined as $2^{(N \times T)}$, where N is the number of pumps and T, the time of analysis. In this sense, the choice of parameters which may help finding better solutions needs to be careful.

Results and Discussions

The proposed model was applied to the test network presented by Van Zyl *et al.* (2004). It is a network with simple layout; nonetheless, it has complex operation, which is appropriate for the application of the optimization, besides presenting several pieces of information which enhance the hydraulic analysis. Another motivation for the use of this system is that it has been adopted as reference for countless works in the field of optimization (Van Zyl *et al.*, 2004; López-Ibáñez *et al.*, 2008; Makaremi *et al.*, 2017; De Paola *et al.*, 2017; Cimorelli *et al.*, 2020a, 2020b; Karami *et al.*, 2020), demonstrating it is a good model for the study.

More detailed information on this system, such as energy price, consumption pattern, pump curves, efficiency curves, are found in Van Zyl *et al.* (2004). Figure 2 shows the network's layout. It contains all main elements of a typical water distribution system: a source of drinking water, three pumps, two tanks, and a retention valve.

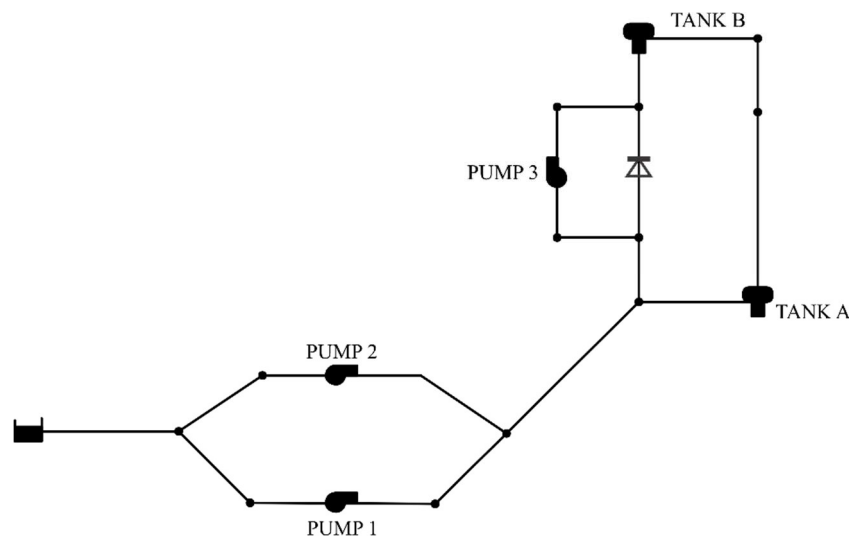


Figure 2: Layout of the test network Van Zyl (2004) in EPANET.

From the main source (FLR) comes the main pumping station composed of two identical pumps (PUMP 1 and PUMP 2) in parallel, which are responsible for feeding two reservoirs of varying level - RVL (TANK A and TANK B), at different elevations, which are fed by a booster (PUMP 3). PUMP 1 is controlled by the level of reservoir A, whereas PUMP 2 is controlled by the level of TANK B. The efficiency curves of the pumps were selected to define the similar unit pumping costs for the pumps operating alone and in parallel.

PUMP 3 is installed in the section that feeds the tallest of the two reservoirs B. When both pumps in the pumping station are operating, the booster increases the level of TANK B. Nevertheless, when PUMP 1 and PUMP 2 are operating, PUMP 3 transports water from TANK A to TANK B. The two tanks are connected by a pipe, whose drainage is by gravity. The demands vary according to a typical residential demand pattern with the peaks occurring at 7:00 and 18:00 (Figure 3). When the demand is high, the water is extracted from both tanks to supply the demand. Conversely, under conditions of low demand, the water is transported by gravity from TANK B to TANK A (van Zyl *et al.*, 2004).

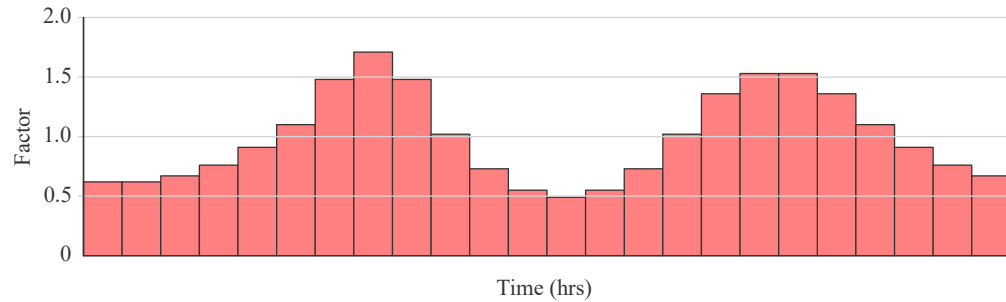


Figure 3: Demand pattern of the test network Van Zyl (2004).

Simulation before optimization

A simulation of the network operation was performed before applying the optimization. For this analysis, the result presented in Table 1 was achieved. The total cost per day was \$ 422.17. For this example, the authors have not defined a currency to determine the price of energy; therefore, the values for the costs are expressed in undefined monetary values.

The analysis of the behavior of tanks A and B was performed for a projection simulation of 10 days (240 hours). The importance of performing this kind of analysis is to evaluate whether the tanks are being used well and whether, for a larger period than one day of schedule (24 hours), their behaviors will remain constant and will not compromise the water supply of the system. Figures 4 and 5 present, respectively, the behavior of reservoirs A and B for a schedule of 240 hours.

Table 1: Energy report for the simulation before optimization.

Property	Pump1	Pump2	Pump3
Average power (Kw)	141.72	140.11	33.95
Percentage of usage (%)	27.38	57.63	68.21
Specific energy consumption (kWh/m ³)	0.24	0.24	0.07
Cost per day (\$)*	76.30	189.85	47.38

* Because it is a hypothetical network, the authors who proposed this example chose not to specify a currency for the energy tariff.

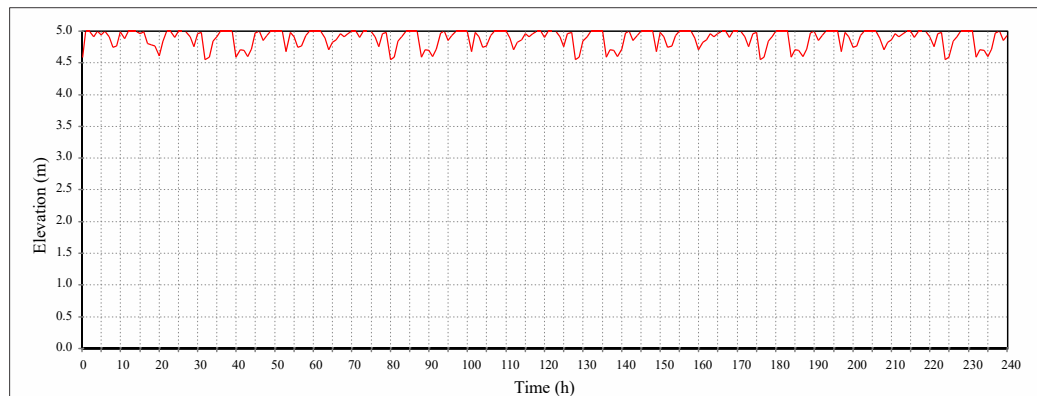


Figure 4: Behavior of TANK A for a simulation of 10 days.

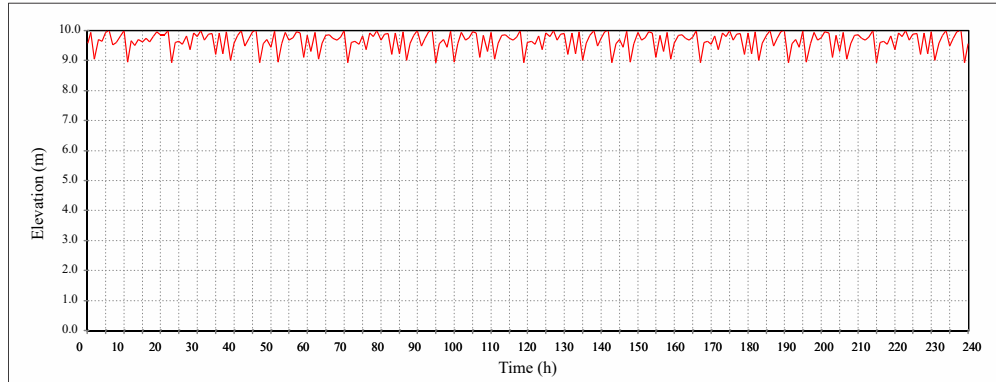


Figure 5: Behavior of TANK B for a simulation of 10 days.

Analyzing the behavior of the level of the tanks, it is possible to observe that there is an inconsistency in its use, since in most of the schedule, they do not reach the minimum level, in other words, the reservoirs are being underutilized.

Optimization results

For the optimization, as reported in the previous item, the Genetic Algorithm was applied. The aim is to minimize the value of the objective function related to the daily electricity cost, subjected to system constraints, previously raised.

GA basically is an algorithm for problems without constraints. To insert the constraints to the problem, a fitness function was determined, where all system constraints were added to the objective function as penalties. These values are defined according to the degree of relevance of the constraint. The more important the constraint to maintain the good operation of the system, the higher the value of the penalties. For the problem addressed, the penalty values defined are presented in Table 2.

Table 2: Penalty values for each constraint of the fitness function.

Constraints	Penalties
Maximum and minimum levels of the reservoirs (continuity of the supply)	100,000
Maximum use of the reservoirs	100
State of reservoir recovery	10

In defining the optimal pump scheduling (OPS), a safety margin of 10% of the total capacity of each reservoir was assured, destined to an emergency reserve, that is, the total storage capacity of the tanks was 90%.

The parameters of the GA algorithm were defined based on recent research studies in the field of optimization in water resources, such as Abkenar *et al.* (2015), Reza *et al.* (2017) and Chang *et al.* (2018). After some tests, these values were adjusted to the problem and adopted according to Table 3.

Table 3: Entry parameters of the Genetic Algorithm.

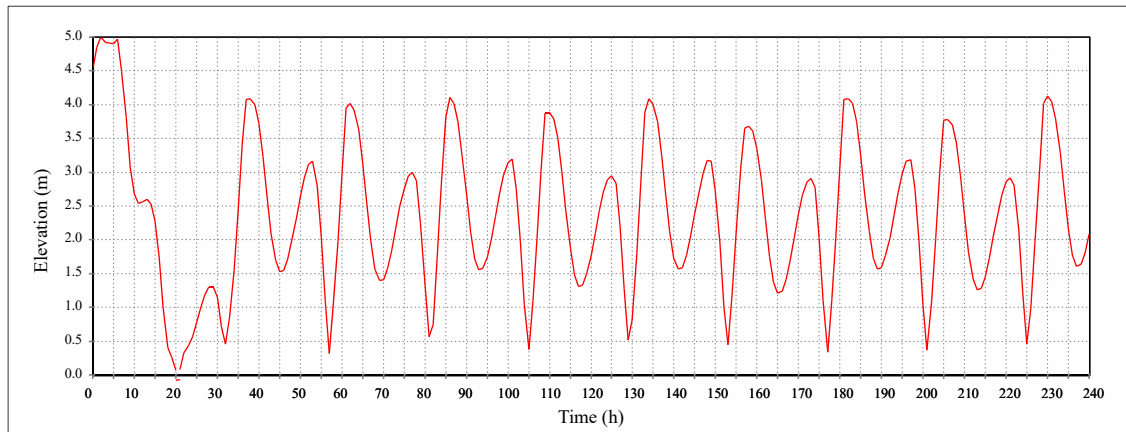
Parameters	Values
Max iteration	200
Population size	100
Mutation probability	0.5
Elite ration	0.1
Crossover probability	0.9
Parents' portion	0.3
Crossover type	Two points
Type of mutation	Uniform by center
Type of selection	roulette

After applying the optimization, a new simulation is performed by EPANET, whose results are arranged in Table 4. They indicate a reduction in the value of the daily electricity cost when compared to the value without the optimization. For the new simulation, the analysis of the behavior of tanks A and B was also performed for the period of 240 hours (10 days). Figures 6 and 7 show these results.

Table 4: Energy report for the simulation after optimization.

Property	Pump1	Pump2	Pump3
Average power (Kw)	127.58	122.31	27.67
Percentage of usage (%)	66.66	47.64	66.66
Specific energy consumption (kWh/m ³)	0.28	0.28	0.06
Cost per day (\$)*	185.43	164.16	41.10

* Because it is a hypothetical network, the authors who proposed this example chose not to specify a currency for the energy tariff.

**Figure 6:** Optimized behavior of TANK A for a simulation of 10 days.

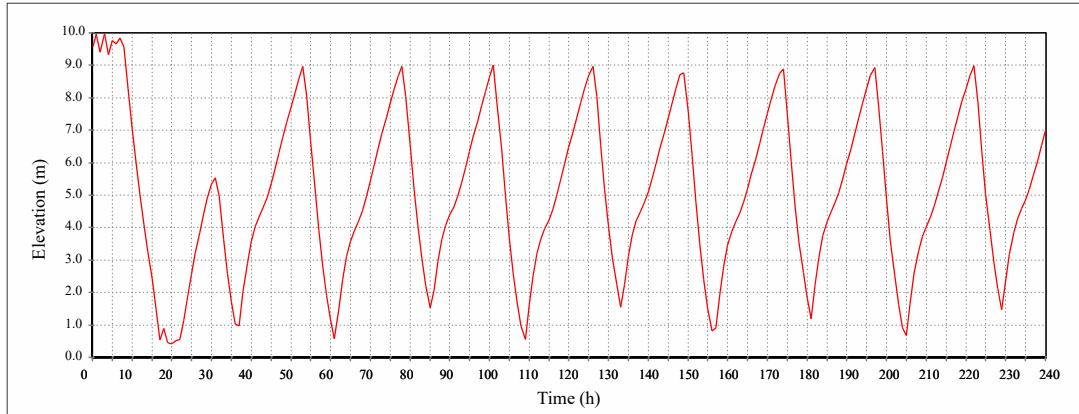


Figure 7: Optimized behavior of TANK B for a simulation of 10 days.

Analyzing the results, after optimization, it is possible to verify a more efficient behavior in the use of the reservoirs. They can operate at their maximum capacity, using (disregarding the emergency reserve) their totality of storage. It is also observed that the exploitation of the use of the reservoirs together with the optimization resulted in the minimum number of pump switches. According to Lansey *et al.* (1994), an operation schedule that turns the pumps on and off several times may increase wear and, consequently, the costs with maintenance. For this reason, authors, such as López-Ibáñez *et al.* (2008) and Costa *et al.* (2010), use this information as a constraint of the problem.

Optimization of pumping systems resulted in a reduction in daily electricity costs of around 26%, which shows that only with a better use of the structure arranged in the supply system is it possible to achieve important results regarding energy efficiency. When the results are compared with other works in the literature, e.g., Van Zyl *et al.* (2004), López-Ibáñez *et al.* (2008), De Paola *et al.* (2017) and Jafari-Asl *et al.* (2021), it is observed that the proposed method presented better results (Table 5).

Table 5: Comparison of total daily energy costs between proposed method and other works

Work	Total daily energy cost (\$/day)
Van Zyl <i>et al.</i> (2004)	344.2
López-Ibáñez <i>et al.</i> (2008)	322.5
De Paola <i>et al.</i> (2017)	323.5
Jafari-Asl <i>et al.</i> (2021)	327.2
Proposed approach	313.5

Conclusions

The present article showed the application of a model of optimization, based on the Genetic Algorithm, that aims at finding the best operational strategies for pump activation, to minimize the costs with electricity in the water supply systems. The work demonstrated that the efficient use of the storage capacity of the reservoirs and, in parallel, the application of an optimized schedule for pump activation, make it possible to have a greater use of the system's infrastructure and, consequently, a reduction in the costs with electricity. The comparison of results showed the capability of the proposed method to achieve an optimal solution.

The importance of the number of pump switches during the process of operation schedule optimization was observed. According to recommendations from other studies in

the literature, the maximum number of three activations per day was adopted. Despite being a difficult criterion to measure, some authors consider that the number of switches is directly related to pump wear and, therefore, to the costs with maintenance.

Although the proposed method was applied in a test network, the model proved to be acceptable for real problems, since it is easily applicable, with the need of only small adaptations to suit other networks.

Acknowledgements

This article was completed during the COVID-19 pandemic. The authors dedicate this article to health professionals worldwide due to their great efforts against the disease.

References

- Abdallah, M. and Kapelan, Z. (2017) Iterative extended lexicographic goal programming method for fast and optimal pump scheduling in water distribution networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(11), 04017066. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000843](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000843).
- Abdallah, M. and Kapelan, Z. (2019) Fast pump scheduling method for optimum energy cost and water quality in water distribution networks with fixed and variable speed pumps, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(12), 04019055. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001123](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001123).
- Abkenar, S.M.S., Stanley, S.D., Miller, C.J., Chase, D.V. and McElmurry, S.P. (2015) Evaluation of genetic algorithms using discrete and continuous methods for pump optimization of water distribution systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 8, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2014.09.003>.
- Bagloee, S.A., Asadi, M. and Patriksson, M. (2018) Minimization of water pumps' electricity usage: a hybrid approach of regression models with optimization, *Expert Systems with Applications*, 107, 222–242. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.027>.
- Bi, W., Dandy, G.C. and Maier, H.R. (2015) Improved genetic algorithm optimization of water distribution system design by incorporating domain knowledge, *Environmental Modelling and Software*, 69, 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.010>.
- Bonthuys, G.J., van Dijk, M. and Cavazzini, G. (2020) The optimization of energy recovery device sizes and locations in municipal water distribution systems during extended-period simulation, *Water*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092447>.
- Cimorelli, L., Covelli, C., Molino, B. and Pianese, D. (2020a) Optimal regulation of pumping station in water distribution networks using constant and variable speed pumps: a technical and economical comparison, *Energies*, 13(10), 2530. <https://doi.org/10.3390/en13102530>.
- Cimorelli, L., D'Aniello, A. and Cozzolino, L. (2020b) Boosting genetic algorithm performance in pump scheduling problems with a novel decision-variable representation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(5), 04020023. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001198](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001198).
- Costa, L.H.M., de Castro, M.A.H. and Ramos, H. (2010) Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 15(2), 187–196. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522010000200011>.

- Chang, Y., Choi, G., Kim, J. and Byeon, S. (2018) Energy cost optimization for water distribution networks using demand pattern and storage facilities, *Sustainability*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/su10041118>.
- Chen, W., Tao, T., Zhou, A., Zhang, L., Liao, L., Wu, X., Yang, K., Li, C., Zhang, T.C. and Li, Z. (2021) Genetic optimization toward operation of water intake-supply pump stations system, *Journal of Cleaner Production*, 279, 123573. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123573>.
- Dadar, S., Đurin, B., Alamatian, E., & Plantak, L. (2021). Impact of the pumping regime on electricity cost savings in urban water supply system. *Water* (Switzerland), 13(9). <https://doi.org/10.3390/w13091141>
- De Paola, F., Fontana, N., Giugni, M., Marini, G. and Pugliese, F. (2017) Optimal solving of the pump scheduling problem by using a harmony search optimization algorithm, *Journal of Hydroinformatics*, 19(6), 879–889. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.132>.
- Helmbrecht, J., Pastor, J. and Moya, C. (2017) Smart solution to improve water-energy nexus for water supply systems, *Procedia Engineering*, 186, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.215>.
- Jafari-Asl, J., Azizyan, G., Monfared, S. A. H., Rashki, M. and Andrade-Campos, A. G. (2021). An enhanced binary dragonfly algorithm based on a V-shaped transfer function for optimization of pump scheduling program in water supply systems (case study of Iran). *Engineering Failure Analysis*, 123, 105323. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105323>.
- Karami, J., Moghaddam, A., Faridhosseini, A., Ziaei, A.N., Rouholamini, M. and Moghbeli, M. (2020) Using fast messy genetic algorithm to optimally schedule pump operation, in *Frontiers in Water-Energy-Nexus – Nature-Based Solutions, Advanced Technologies and Best Practices for Environmental Sustainability*, Springer, Cham, 509–512. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13068-8_127.
- Khatavkar, P. and Mays, L. W. (2019) Optimization-simulation model for real-time pump and valve operation of water distribution systems under critical conditions. *Urban Water Journal*, 16(1), 45–55. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1634108>.
- Klise, K.A., Bynum, M., Moriarty, D. and Murray, R. (2017) A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study, *Environmental Modelling and Software*, 95, 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.022>.
- Lansey, K.E. and Awuhmah, K. (1994) Optimal pump operations considering pump switches, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(1), 17–35. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:1(17)).
- López-Ibáñez, M., Prasad, T.D. and Paechter, B. (2008) Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(4), 337–346. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:4\(337\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:4(337)).
- Luna, T., Ribau, J., Figueiredo, D. and Alves, R. (2019) Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization, *Journal of Cleaner Production*, 213, 342–356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.190>.
- Macêdo, J.E.S., Azevedo, J.R.G. and Bezerra, S.T.M. (2021) Hybrid particle swarm optimization and tabu search for the design of large-scale water distribution networks, *Brazilian Journal of Water Resources*, 26. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210006>.
- Maier, H.R., Kapelan, Z., Kasprzyk, J., Kollat, J., Matott, L.S., Cunha, M.C., Dandy, G.C., Gibbs, M.S., Keedwell, E., Marchi, A., Ostfeld, A., Savic, D., Solomatine, D.P., Vrugt, J.A., Zecchin, A.C., Minsker, B.S., Barbour, E.J., Kuczera, G., Pasha, F., Castelletti, A.,

- Giuliani, M. and Reed, P.M. (2014) Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: current status, research challenges and future directions, *Environmental Modelling and Software*, 62, 271–299. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.013>.
- Makaremi, Y., Haghighi, A. and Ghafouri, H.R. (2017) 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*, 31(4), 1283–1304. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1577-x>.
- Naserizade, S.S., Nikoo, M.R., Montaseri, H. and Alizadeh, M.R. (2021) A hybrid fuzzy-probabilistic bargaining approach for multi-objective optimization of contamination warning sensors in water distribution systems, *Group Decision and Negotiation*, 30(3), 641–663. <https://doi.org/10.1007/s10726-021-09727-0>.
- Naidu, M. N., Boindala, P.S., Vasan, A. and Varma, M.R.R. (2020) Optimization of water distribution networks using cuckoo search algorithm, in *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Singapore, 67-74. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8196-6_7.
- Niccolai, A., Bettini, L., Zich, R. (2021) Optimization of electric vehicles charging station deployment by means of evolutionary algorithms. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(9), 5359–5383. <https://doi.org/10.1002/int.22515>.
- Turci, O. L., De, Sun, H., Bai, M., Wang, J. and Hu, P. (2019) Water pump station scheduling optimization using an improved genetic algorithm approach, in *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. IEEE, New Zealand, 944–951. <https://doi.org/10.1109/CEC.2019.8790264>.
- Reca, J., Martínez, J. and López, R. (2017) A hybrid water distribution networks design optimization method based on a search space reduction approach and a genetic algorithm, *Water*, 9(11), 845. <https://doi.org/10.3390/w9110845>.
- Sela, L. and Housh, M. (2019) Increasing usability of water distribution analysis tools through plug-in development in EPANET, *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(5), 02519001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001596](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001596).
- van Zyl, J.E., Savic, D.A. and Walters, G.A. (2004) Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 160–170. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(160)).
- Vegas Niño, O. T., Alzamora, F. M., Campos, J. C. A. and Tzatchkov, V. G. (2018) Using the EPANET toolkit v2.00.12 with different programming environments, *Mexican Institute of Water Technology*, Mexico, 119p.

**APÊNDICE B - OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF WATER
DISTRIBUTION SYSTEMS WITH EMPHASIS ON THE JOINT OPTIMIZATION
OF THE PUMPING SYSTEMS AND RESERVOIRS AIMING AT ENERGY
EFFICIENCY**

OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

Tuane Batista do Egito^{1*}, José Roberto Gonçalves de Azevedo²,

Saulo de Tarso Marques Bezerra³

¹ ***Corresponding author**

Postgraduation Program in Civil Engineering, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brazil. E-mail: tuane_egito@yahoo.com.br.

² Department of Civil Engineering, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brazil. E-mail: jose.azevedo@ufpe.br.

³ Department of Technology, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Marielle Franco, km 59, Caruaru, Pernambuco, Brazil, CEP 55014-900. E-mail: saulo.tarso@ufpe.br.

ABSTRACT

The high cost generated by the pumping stations of the water supply systems has brought great concern to the concessionaire companies in the sector. Improvements to increase the efficiency of these systems and, consequently, the reduction in the costs with electricity has been the objective of several researchers and technicians responsible for the sector. Given the large number of elements that compose these systems, finding the best operational rules is many times a complex activity; therefore, all elements must be considered. In this context, the present work presents an optimization model based on the Genetic Algorithms that combines the efficient use of reservoirs with the best operational rule for activating pumping systems, better dealing with the restrictions of the problem. The results obtained indicated that, with a better use of the water storage infrastructure, it is possible to reduce the costs with electricity of the system as a whole.

Keywords: water supply; operational rules; genetic algorithm; optimization

HIGHLIGHTS

A model is proposed to optimize energy performance of pumping systems.

The efficient use of reservoirs is considered in the optimal pump scheduling.

Decreasing energy consumption is conducive to enhancing system operational energy efficiency.

The effectiveness of model has been demonstrated.

INTRODUCTION

The rise in water demand in the major urban centers has required more expensive and complex systems from water supply concessionaires. Pumping stations play an important role in meeting these demands; therefore, they are responsible for a significant portion of electricity costs in the water supply sector (Turci et al., 2019). These costs may represent up to 65% of the operating budget of a water utility (Chen et al., 2021) and, according to (Dadar et al., 2021), 20% of the world electricity is consumed by the pumping systems.

The complexity in the operation of the water distribution systems is generated by the large number of elements that compose them, leading to a range of operational possibilities which hampers the efficient operation. Many times, operational decisions are exclusively linked to the experience of the technicians, who rarely present specific knowledge on hydraulic and energy efficiency. For this reason, the reduction in costs with energy in pumping stations, and the use of smart management strategies, such as the optimal pumping schedule, are attractive options for water companies and managing authorities (Helmbrecht et al., 2017; Cimorelli et al., 2020a).

Thus, the search to improve energy efficiency in the operations of the system has been paramount in the researches directed to this sector, bringing a significant impact and, consequently, a reduction in energy costs (Jafari-Asl *et al.*, 2021). Therefore, the use of optimization methods emerges as an important and more appropriate tool to increase this efficiency, reducing the costs with energy and human interference in decisions. For large scale problems, several studies have demonstrated that the metaheuristic algorithms provide a more efficient approach for the search for optimal solutions.

Despite the numerous publications in the past 20-30 years, the problems involving operational optimization in water distribution systems are far from being solved (Abdallah and Kapelan,

2019). This derived from the complexity of the problem, the lack of precision in the mathematical formulations of the problem, the number of variables involved and the specificities of each system. Abdallah and Kapelan (2019) also affirm that there is no consensus on the best optimization method which may provide the optimal global solution in a short computational time.

The decrease in the total costs with pumping in the water supply systems can be performed in several ways. An alternative is the time schedule of pump operation, shifting workload to periods of cheaper electrical tariff, bringing as a result the reduction in electricity consumption. Another alternative would be water pumping when the reservoir levels are lower, combining more efficiently the operation of different pumps. Both approaches have presented good results separately, but the optimization in the supply systems must not be restricted to a single way. A punctual energy efficiency plan may bring promising results, although incomplete; therefore it is important to have a macro vision of the whole system, considering all elements that compose it, especially the reservoirs.

Chang *et al.* (2018) affirm that previous studies have verified the use of reservoirs and their hydraulic characteristics, and observed that only 37.6% of the total storage capacity is used. Reservoirs are usually designed to maintain their operation in their maximum level, forcing the pumping systems to be activated several times, providing high electricity consumption.

Therefore, the main goal of this research is to present an optimization model that combines the efficient use of reservoirs of varying levels with the operating rules for pumping system activation. Using the genetic algorithm, the model aims at minimizing the operational costs of the water distribution systems with electricity, determining operation strategies both in the reservoirs and in the pumping stations by optimization. GA are frequently used to approach the solution to problems of optimal pump scheduling (Cimorelli *et al.*, 2020a). Recent researches have demonstrated that a well implemented GA can provide excellent solutions (for instance, (Luna *et al.*, 2019; Cimorelli *et al.*, 2020a; Cimorelli *et al.*, 2020b; Chen *et al.*, 2021). The method was chosen for being a technique of simple implementation and with good results in similar problems, besides being widespread in the academia, especially in researches in the field of Water Resources.

MATERIALS AND METHODS

The problem of this research is characterized by the use of resources of Operational Research, with the help of a hydraulic simulator aiming at optimizing a nonlinear objective function with restrictions. The model of optimization determines the best operational rules for activating pumps in water distribution systems, by the optimization of the use of reservoirs and using the Genetic Algorithm. Thus, it is possible to reduce the costs with electricity, guaranteeing the continuity in provision.

Defining the best operational strategies of a supply system requires a robust computational structure that is capable of solving this problem. For this, the joint work of two modules, the optimizer and the simulator, is necessary. Firstly, the optimization module is defined, which will use an optimization algorithm to determine the best solutions for the problem from the analysis of a predefined objective function and its restrictions. Lastly, the simulation module is used aiming at evaluating the solutions found in the optimization module observing the hydraulic balance of the system, its feasibility and the cost with energy. The works performed by López-Ibáñez et al. (2008), Maier et al. (2014), De Paola et al. (2017) and Abdallah and Kapelan (2017), Abdallah & Kapelan, (2019), Cimorelli et al. (2020) indicate that the use of hydraulic simulators coupled to optimization algorithms bring positive results to find the best solutions for the operation of the system. The simulator evaluates the solutions indicated by the algorithm, respecting the hydraulic feasibility of the system and energy cost.

The proposal of this work is to use the genetic algorithm (GA), together with the hydraulic simulator EPANET, to define optimal operational routines of water pumping systems, considering a more efficient use of the water storage tanks, thus minimizing the costs with electricity. The computational model developed uses the language Python 3.8 together with the Water Network Tool for Resilience - WNTR) Klise et al. (2018), which is a Python package compatible with EPANET designed to simulate and analyze the resilience of water distribution networks. Both have the purpose of finding the best responses for system optimization, combining the optimizing module (Genetic Algorithm) with the simulating module (EPANET).

The genetic algorithm minimizes a non-linear objective function, determining the best operation rule to be applied to the water distribution system, considering consumption demands; the initial boundary conditions; and the hydraulic, physical and operational

restrictions of the system. Among the restrictions, there is one which is defined determining that the pump be activated only when the maximum volume is used, guaranteeing its better use.

Mathematical Formulation

The objective function considers the total energy consumption of the pumps, which is the hydraulic power divided by the pumping system efficiency; the value of the energy tariff; the number of pumps in the pumping station; the number of pumping systems; and operation time, which, for this work, will be in the planning horizon of 24 hours.

The decision variable considered will be the operational state of the pumps, in other words, at each time interval, an analysis will be performed regarding the need for pump activation to maintain the system working without interruptions, but with its consumption optimized. Using the Genetic Algorithm and the controls based on rules of the simulator EPANET, the optimum operation levels of the reservoirs are defined, as well as the best time for pump activation, defining the best operational rules and its orders of priorities, to optimize the system as a whole, reducing the costs with electricity.

Therefore, the objective function can be expressed as the sum of the energy consumption of the pumping systems, within the operational horizon of 24 hours, by the energy consumed by each pump at the interval of one hour whether it is activated or not, according to Equation (1):

$$\text{Min } C_t = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \times TF \times \Delta t \quad (1)$$

Where:

C_t : Cost with electricity (\$);

TF : Energy tariff (\$/kWh);

Δt : Number of hours in which the pump is activated;

Q : Pumped water flow (m³/s);

H : Pump head (m);

η : Efficiency of the pumping system;

P : Flow to be repressed (m³/s);

γ : Specific weight of the liquid (N/m³).

The feasibility of the ideal schedule is guaranteed by the restrictions of the system, including technical restrictions, such as the satisfaction of the water demands at appropriate pressure levels and the maintenance of the appropriate levels of the water tanks. The restrictions of the system can be expressed as follows:

- a) *Pressures in the network*: the pressures in all nodes must respect the maximum and minimum limits for each time limit analyzed. This parameter guarantees the continuity of water supply to the system, as shows Equation (2).

$$P_i(\min) \leq P_i(t) \leq P_i(\max) \quad (2)$$

Where:

$P_i(\min)$: Minimum pressure required in node i;

$P_i(t)$: pressure in node i in the time interval t;

$P_i(\max)$: maximum pressure required by node i.

- b) *Maximum use of the reservoirs*: This restriction determines that the maximum volumes of the reservoirs be used, aiming at optimizing the operation and, thus, contributing to a higher efficiency in the costs with energy. Equation (3) expresses mathematically this restriction of the system:

$$I_r = \frac{\sum_{r=1}^{nr} V_r(\text{cons})}{V_r(\text{cap})} \quad (3)$$

Where:

I_r : Efficiency index of reservoir r (%);

$V_r(\text{cons})$: Volume used in reservoir r (m³);

$V_r(\text{cap})$: Volumetric capacity of reservoir r (m³);

- c) *Situation of initial recovery of the reservoirs*: for an operational horizon of 24 hours, it is established that the final operating levels of the reservoirs must be equal to or greater

than the pre-established initial levels. This restriction guarantees the continuity of operation in the subsequent periods (Equation 4):

$$L_r(fin) \geq L_r(ini) \quad (4)$$

Where:

$L_r(fin)$: Reservoir level at the end of the time of 24h.

$L_r(ini)$: Reservoir level in the beginning of the schedule.

Hydraulic simulation

Hydraulic simulation is a more efficient way to reproduce the behavior of a real water distribution system using computational tools. These tools have used mathematical models capable of satisfactorily representing the processes of these systems.

The hydraulic simulator used in this study was EPANET (Rossman, 2000). It is an open source software developed by the Environmental Protection Agency of the United States (US - EPA), aiming at simulating the hydraulic behavior and water quality in supply networks. EPANET uses a hybrid node-loop approach to hydraulically balance the system, solving the flow continuity equations (conservation of mass) and loss of load (conservation of energy) of the network at a specific point in time. It is a software easy to use and widely employed by researchers (eg. Bonthuys et al., 2020 ; Naidu et al., 2020; Naserizade et al., 2021; Macêdo et al., 2021) and by most of the most water supply research companies as a support tool for technical decision making. It also allows the iteration among optimization algorithms developed in different programming languages (Basic 6.0, Basic .NET, MATLAB, C#, Python and C++) with the calculation routines of the simulator itself (Vegas Niño et al., 2018).

To apply the computational model, an auxiliary software was developed for the iteration between EPANET and the optimization algorithm. This software was written in the language Python 3.8 using the Application Programming Interface – API, the Water Network Tool for Resilience – WNTR (Klise et al. , 2018). WNTR is designed to simulate and analyze the resilience of water distribution systems. The tool has an application programming interface that is flexible and allows alterations in the structure and operation of the system (Klise et al., 2018).

WNTR is accessible in EPANET by a plug-in, enhancing the hydraulic analysis resources of the simulator US EPA. In this configuration, EPANET acts as a WNTR input-output interpreter

(Sela and Housh, 2019). US EPA, in partnership with Sandia National Laboratories, developed this tool to explore the capacity of its systems in dealing with disruptive incidents and guide the planning required to make the systems more resilient over time in a single software framework.

The water network model used in WNTR can be created directly from a water network model input file formatted in EPANET INP. The structure and operations of the network can be modified in WNTR and the resulting WNTR model of water network can be saved again in an EPANET INP file. This compatibility allows the users to easily switch between EPANET and WNTR (Klise et al., 2018).

Optimization by the Genetic Algorithm

The problem of Optimal Pump Programming consists in searching for a sequence of pump activations (ON/OFF) capable of reaching the minimum energy consumption during an operation cycle (Figure 1). The genetic algorithm (GA) determines the best solution from the systematic evaluation of a random group of solutions (initial population).

Pump	Pump 1						Pump 2						Pump 3					
Chromosome	1	1	0	1	...	1	0	0	0	1	...	0	0	1	1	1	...	0
Hour	1	2	3	4	...	24	1	2	3	4	...	24	1	2	3	4	...	24

0 = ON
1 = OFF

Figure 1: Binary representation of a chromosome for 3 pumps and 24 intervals

GA is a heuristic inspired by Darwin's theory of natural evolution, reproducing the process of natural selection, in which the fittest individuals of a population are selected for reproduction to produce descendants for the subsequent generation (Bagloee et al., 2018). The analogy consists in maintaining and developing the solutions that are closest to the optimum, whereas population diversity is used to search for more solutions.

As in genetics, the solutions are described as a group of chromosomes which contain a chain of genes that correspond to the controls (on and off condition) of a pump during the operation period (for instance, 24 h) (Abkenar et al., 2015). After the assembly of the chromosomes of all pumps in the network, a solution is generated. From a group of random solutions (initial generation – parents), GA optimization starts. To update the current population, the algorithm selects a parent chromosome based on its fitness function and by crossover and mutation

operators, resulting in descendant chromosomes, which will be used to form the population for the subsequent generation with better solutions. After repeating this process several times, GA advances toward an optimal solution, until the stop criterion is reached, and the last generation will contain a group of optimal solutions.

The parameters used in the stop criteria of the algorithm, such as: population size, mutation rate, reproduction rate, number of iterations; are extremely important items and which can interfere directly in optimization. Increasing the number of solutions, in other words, population size, will cover a larger search space, increasing the probability of finding a greater number of optimal solutions and, consequently, data processing will take more time and computational expense. Nevertheless, for problems of supply network optimization, the hydraulic analysis requires a bit more from the algorithm. To get an idea, in a pump activation problem, the dimension of the space for the search of a solution to the problem is defined as $2(N \times T)$, where N is the number of pumps and T , the time for analysis. In this sense, the choice of parameters that can assist in the search for better solutions needs to be careful.

For the research, the Genetic Algorithm was chosen for being an algorithm widespread in the scientific community, of easy adaptation to optimization problems and water distribution networks, where each research has brought improvements to the results obtained. The parameters used were based on recent studies, Abkenar et al. (2015), Bi et al. (2015), Chang et al. (2018) and Luna et al. (2019), where they have already been tested and evaluated, proving their efficiency for this type of research.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The proposed model applied to the hypothetical network Any Town was created by (Walski et al., 1987) and afterwards modified by (Rao & Salomons, 2007). It consists in a system composed of three storage tanks, three nodes with critical pressures and three identical pumps with constant velocities, connected in parallel, responsible for withdrawing water from a supply source and distributing it to the entire system. The modifications applied by (Rao & Salomons, 2007) were proposed to make the optimization step more challenging. In turn, the authors also used the Genetic Algorithm to optimize the operation of pumping systems for the reduction of costs with electricity. Thus, it is possible to compare the results obtained in the research with those presented by the authors.

Another motivation for the use of this system is that it has been adopted as a reference for several works in the field of optimization (Rao & Salomons, 2007; Costa et al., 2016; Cimorelli et al., 2020b), demonstrating it is a good model for the study. More detailed information on this system, such as energy price, consumption pattern, pump curves and efficiency curves, are found in (Rao & Alvarruiz, 2007).

Since it is a hypothetical network, the authors have decided not to define a specific currency for the tariffs; therefore, in this work, it was agreed to maintain an undefined currency.

Figure 2 presents the network layout containing all of the main elements of a typical water distribution system.

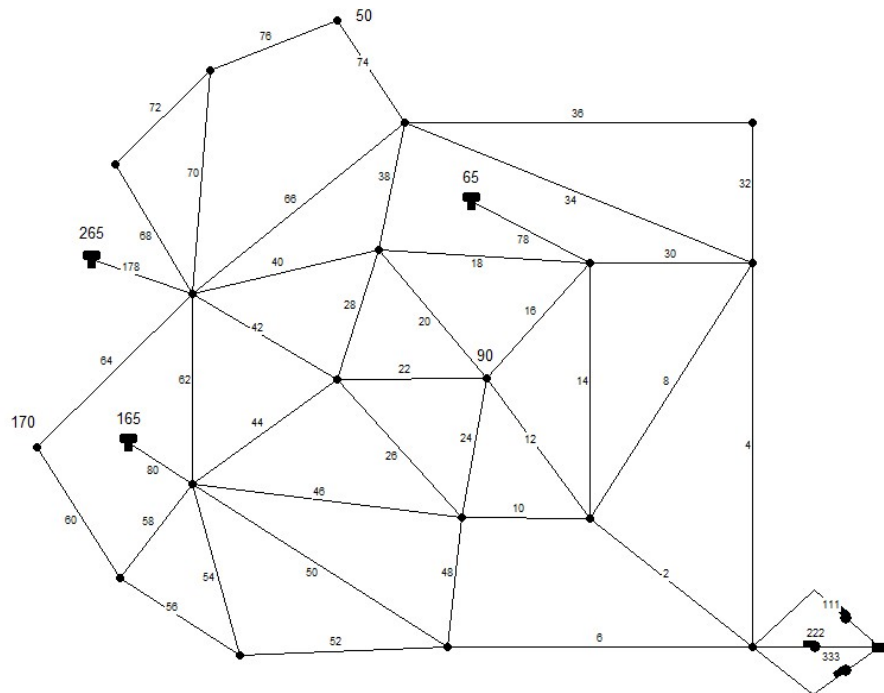


Figure 2: Scheme of the hypothetical network *Any Town* (Modified) in EPANET.

The network *Any Town* (Modified) is composed of a supply source, three pumps and three storage tanks. The maximum, minimum and initial levels of the tanks are 71.53, 66.53 and 66.93 m, respectively. The minimum pressures for the critical nodes are 51m for node 90, 42m for node 50 and 30m for node 170. The demand patterns and the tariff pattern applied to the network are the same used by (Rao & Salomons, 2007), as show Figures 3 and 4, respectively. The values of the tariffs for each hour are presented in Chart 1. The period between 18 and 21 hours is considered the peak hour, presenting the highest values.

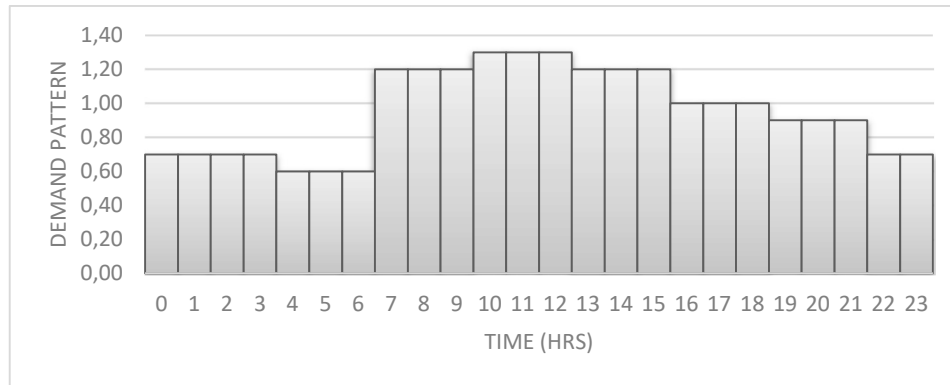


Figure 3: *Any Town* network demand pattern (Modified)

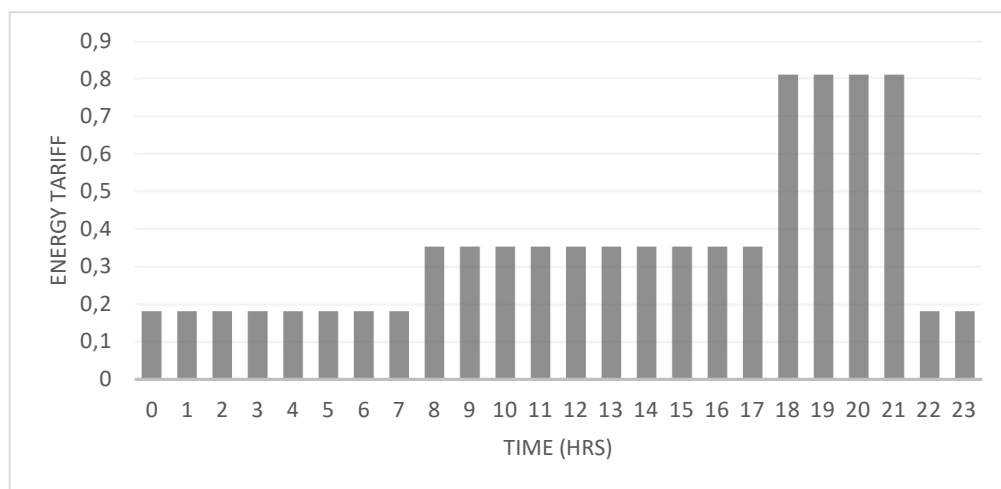


Figure 4: Pattern of the energy tariff of the network *Any Town* (Modified)

Chart 1: Hourly values of the energy tariff for the *Any Town* network (Modified)

Time (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tariff (\$)	0.1814	0.1814	0.1814	0.1814	0.1814	0.1814	0.1814	0.1814	0.3528	0.3528	0.3528	0.3528
Time (h)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Tariff (\$)	0.3528	0.3528	0.3528	0.3528	0.3528	0.3528	0.8097	0.8097	0.8097	0.8097	0.1814	0.1814

Simulation before optimization

A simulation of the network operation was performed before applying the optimization. For this analysis, the result presented in Table 1 was achieved. The total cost per day was of US\$ 4,148.34. For this example, the authors did not define a currency to determine energy price; therefore, the values of the costs are expressed in undefined monetary values.

The analysis of the behavior of tanks 65, 265 and 165 was performed for a 10-day projection simulation (240 hours). The importance of performing this type of analysis is to evaluate whether the cisterns are being well used and if, for a period higher than one day of programming (24 hours), their behaviors will remain constant and will not compromise the water supply of the system. Figures 5, 6 and 7 presents the behavior of tanks 65, 265 and 165, respectively, for a period of 240 hours.

Table 1: Energy report for the simulation before optimization.

Property	Pump111	Pump222	Pump333
Average power (Kw)	155.50	155.50	155.50
Percentage of use (%)	100	100	100
Specific consumption of energy (kWh/m ³)	0.32	0.32	0.32
Cost per day (\$)	1,382.78	1,382.78	1,382.78

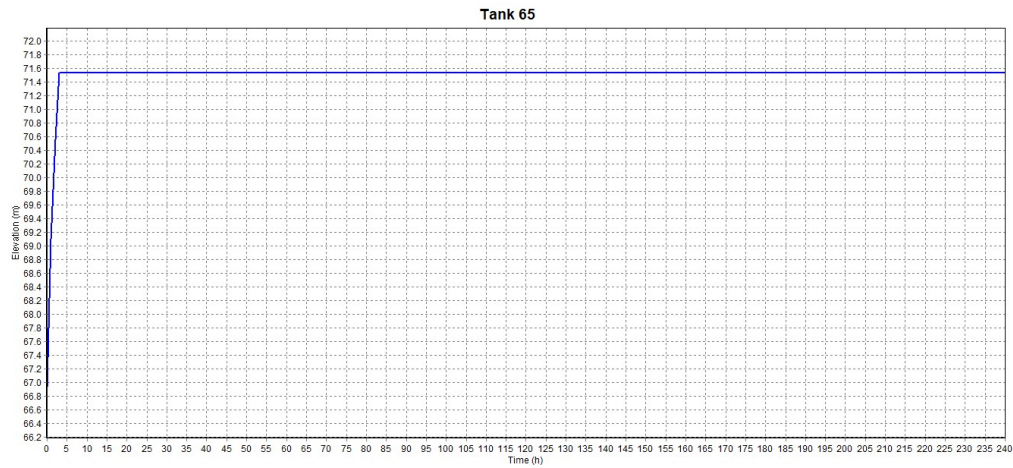


Figure 5: Behavior of tank 65 for a simulation of 10 days.

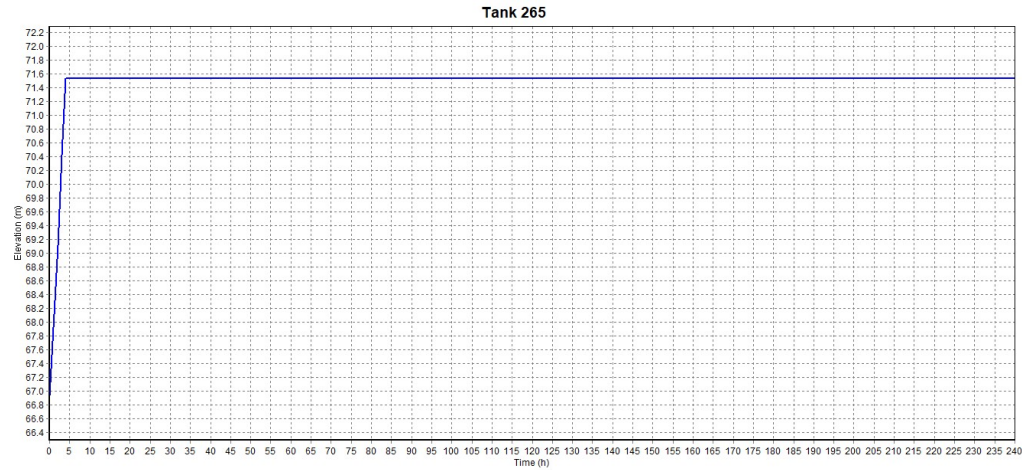


Figure 6: Behavior of tank 265 for a simulation of 10 days.

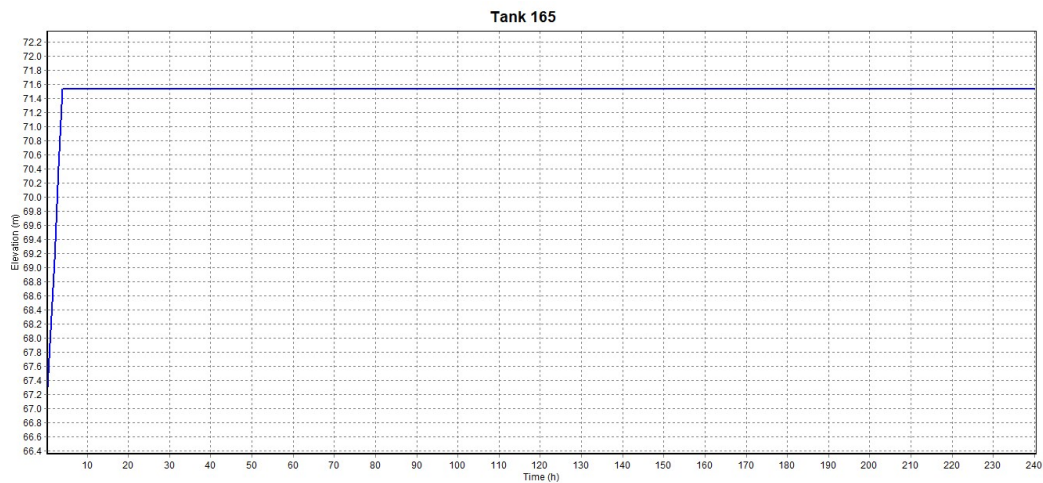


Figure 7: Behavior of tank 165 for a simulation of 10 days.

Analyzing the behavior of tank level, it is possible to observe that there is no variation in its use, since in the larger part of the schedule, they are in the maximum level, in other words, the reservoirs are being underused.

Results of the optimization

For the optimization, as reported in the previous item, the Genetic Algorithm was applied. The purpose is to minimize the value of the objective function related to the daily electricity cost, subjected to the restrictions of the system, previously raised.

GA is basically an algorithm for problems without restrictions. To insert the restrictions to the problem, a fitness function was determined, where all restrictions of the system were

added to the objective function as penalties. These values are defined according to the degree of relevance of the restriction. The more important the restriction to keep the system working, the greater the value of the penalties. For the problem addressed, the defined penalty values are presented in Table 2.

Table 2: Penalty values for each restriction of the fitness function.

Restrictions	Penalties
Maximum and minimum levels of the reservoirs (supply continuity)	100,000
Maximum use of the reservoirs	100
Recovery state of the reservoirs	10

To define the Optimal Pump Programming, a safety margin of 10% of the total capacity of each reservoir was ensured, intended for emergency reserve, in other words, the total storage capacity of the tanks was of 90%.

The parameters of the GA algorithm were defined based on recent researches in the field of optimization in water resources, such as Abkenar *et al.* (2015) , Reza *et al.* (2017) and Chang *et al.* (2018). After some tests, these values were adjusted to the problem and adopted according to Table 3.

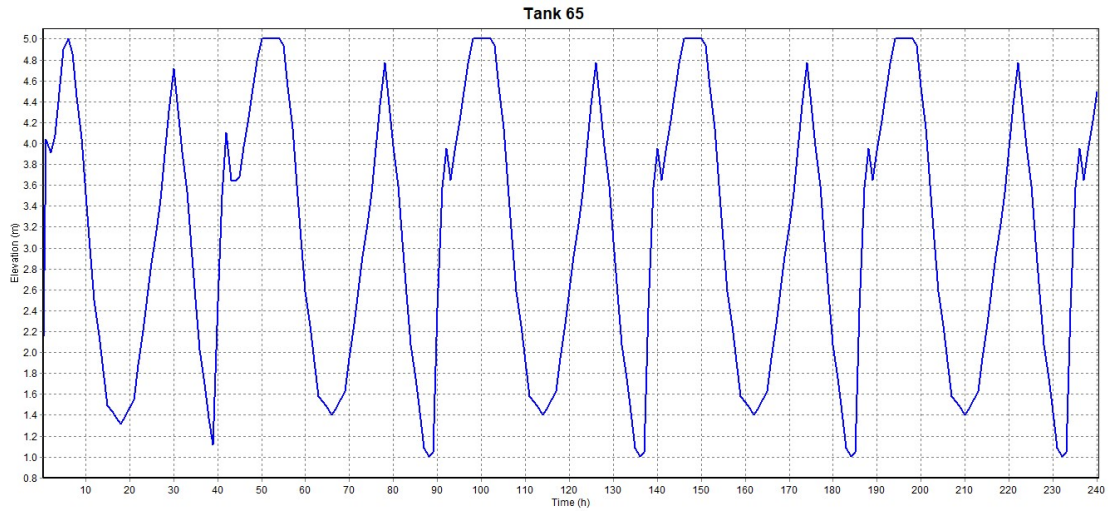
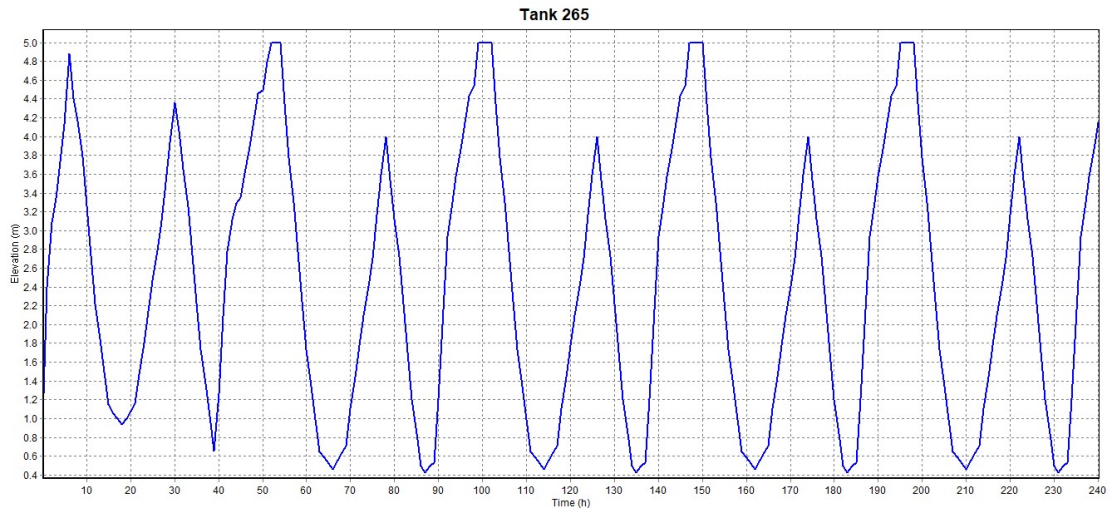
Table 3: Input parameters of the Genetic Algorithm.

Parameters	Values
Maximum iteration	200
Population size	100
Probability of mutation	0.5
Elite ration	0.1
Crossing probability	0.9
Parents' portion	0.3
Crossed type	Two points
Type of mutation	Uniform in the center
Type of selection	roulette

After applying the optimization, a new simulation is performed by EPANET, whose results are shown in Table 4. They indicate a reduction in the value of the daily cost with electricity compared to the value without optimization. For the new simulation, the analysis of the behavior of tanks 65, 265 and 165 was also performed for the period of 240 hours (10 days). Figures 8, 9 and 10 shows these results.

Table 4: Energy report for the simulation after optimization.

Property	Pump111	Pump222	Pump333
Average power (Kw)	344.85	283.52	314.79
Percentage of use (%)	90.21	6.69	10.21
Specific consumption of energy (kWh/m ³)	0.25	0.26	0.26
Cost per day (\$)	2,511.47	315.06	426.61

**Figure 8:** Optimized behavior of Tank 65 for a simulation of 10 days.**Figure 9:** Optimized behavior of Tank 265 for a simulation of 10 days.

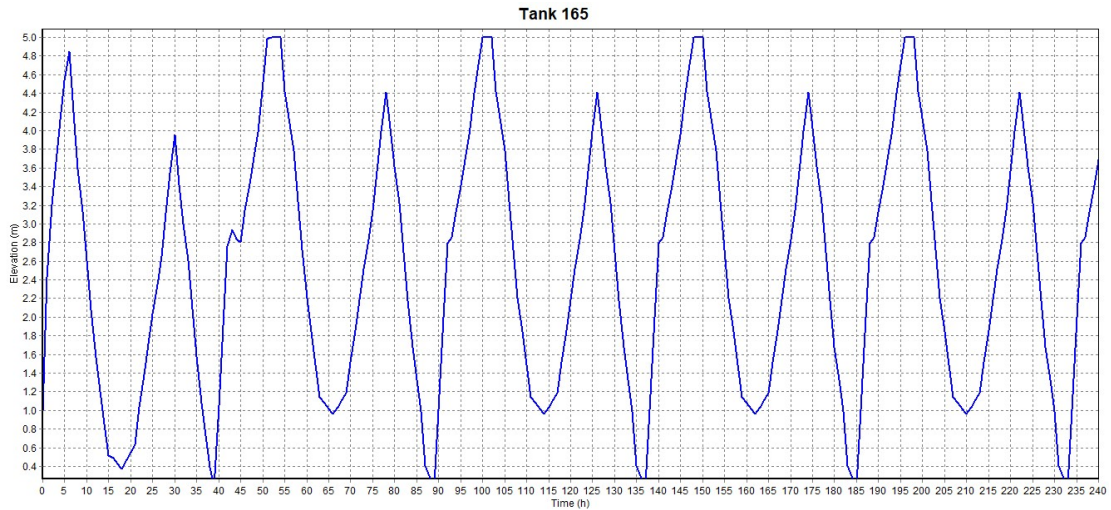


Figure 10: Optimized behavior of Tank 165 for a simulation of 10 days

Analyzing the results, after optimization, it is possible to verify a more efficient behavior in the use of the reservoirs. There was a variation over time, and for a simulation of a period of 10 days, presenting a constancy during this period and showing that the good use of the tanks may bring a better yield of the system as a whole and, consequently, a reduction in operation costs.

The optimization of the pumping system resulted in a reduction in the daily costs with electricity around 21.58%, which demonstrates that only with a better use of the structure arranged in the supply system it is possible to reach important results in terms of energy efficiency.

CONCLUSIONS

Works such as (Rao & Salomons, 2007; Costa et al., 2016 and Cimorelli et al., 2020) have used the same network model to perform their studies. These works have used different approaches to represent the decision variables. Some of them have only used the explicit approach, based on the time for pump activation, and others have used only the implicit approach, based on pump activation from the level of the reservoirs. On the other hand, the research presented worked with the combination of the two approaches, considering both the time for pump activation and the level of the reservoirs, demonstrating that the joint work of the two approaches brings more promising results. Table 5 proves that the analysis of the

energy efficiency of a system as a whole, considering all the elements of the network, mainly the reservoirs, it is possible to have a greater reduction in the consumption of electric energy.

Table 5: Comparison of the results for *Any Town* (modified)

Methodology	Total daily cost of energy (\$/day)
Rao; Salomons, 2007	3,612.84
Costa et al., 2016	3,578.66
Comorelli et al., 2020	3,575.54
Proposed approach	3,253.47

Therefore, the present article demonstrated the application of an optimization model, based on the Genetic Algorithm, which aims at finding the best operational strategies for pump activation, to minimize the costs with electricity in the water supply systems. The work demonstrated that the efficient use of the storage capacity of the reservoirs and, in parallel, the application of an optimized programming for pump activation, enable a greater use of the infrastructure of the system and, consequently, a reduction in the costs with electricity, without requiring great investments.

Although the proposed method was applied in a test network, the model was proven acceptable for real problems, since it is of easy application, only requiring small adaptations to fit to other networks.

ACKNOWLEDGEMENTS

This article was concluded during the COVID-19 pandemic. The authors dedicate this article to the healthcare professionals around the world, given their great efforts against the disease.

REFERENCES

- Abdallah, M., & Kapelan, Z. (2017). Iterative Extended Lexicographic Goal Programming Method for Fast and Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(11), 04017066. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000843](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000843)
- Abdallah, M., & Kapelan, Z. (2019). Fast Pump Scheduling Method for Optimum Energy Cost and Water Quality in Water Distribution Networks with Fixed and Variable Speed

Pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(12), 04019055.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001123](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001123)

Abkenar, S. M. S., Stanley, S. D., Miller, C. J., Chase, D. V., & McElmurry, S. P. (2015). Evaluation of genetic algorithms using discrete and continuous methods for pump optimization of water distribution systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 8, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2014.09.003>

Awe, O. M., Okolie, S. T. A., & Fayomi, O. S. I. (2019). Optimization of Water Distribution Systems: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1378(2).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022068>

Bi, W., Dandy, G. C., & Maier, H. R. (2015). Improved genetic algorithm optimization of water distribution system design by incorporating domain knowledge. *Environmental Modelling and Software*, 69, 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.010>

Bonthuys, G. J., van Dijk, M., & Cavazzini, G. (2020). The optimization of energy recovery device sizes and locations in municipal water distribution systems during extended-period simulation. *Water (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092447>

Chang, Y., Choi, G., Kim, J., & Byeon, S. (2018). Energy cost optimization for water distribution networks using demand pattern and storage facilities. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/su10041118>

Chen, W., Tao, T., Zhou, A., Zhang, L., Liao, L., Wu, X., Yang, K., Li, C., Zhang, T. C., & Li, Z. (2021). Genetic optimization toward operation of water intake-supply pump stations system. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123573.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123573>

Cimorelli, L., Covelli, C., Molino, B., & Pianese, D. (2020). Optimal regulation of pumping station in water distribution networks using constant and variable speed pumps: A technical and economical comparison. *Energies*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/en13102530>

Cimorelli, L., D’Aniello, A., & Cozzolino, L. (2020). Boosting Genetic Algorithm Performance in Pump Scheduling Problems with a Novel Decision-Variable Representation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(5), 04020023. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001198](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001198)

Costa, L. H. M., de Athayde Prata, B., Ramos, H. M., & de Castro, M. A. H. (2016). A Branch-and-Bound Algorithm for Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks. *Water Resources Management*, 30(3), 1037–1052. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1209-2>

Dadar, S., Đurin, B., Alamatian, E., & Plantak, L. (2021). Impact of the pumping regime on electricity cost savings in urban water supply system. *Water (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/w13091141>

De Paola, F., Fontana, N., Giugni, M., Marini, G., & Pugliese, F. (2017). Optimal solving of the pump scheduling problem by using a harmony search optimization algorithm. *Journal of Hydroinformatics*, 19(6), 879–889. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.132>

Jafari-Asl, J., Azizyan, G., Monfared, S. A. H., Rashki, M., & Andrade-Campos, A. G. (2021). An enhanced binary dragonfly algorithm based on a V-shaped transfer function for optimization of pump scheduling program in water supply systems (case study of Iran). *Engineering Failure Analysis*, 123(January), 105323. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105323>

Klise, K. A., Murray, R., & Haxton, T. (2018). An overview of the water network tool for resilience (WNTR). 1st International WDSA / CCWI 2018 Joint Conference.

López-Ibáñez, M., Prasad, T. D., & Paechter, B. (2008). Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(4), 337–346. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:4\(337\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:4(337))

Luna, T., Ribau, J., Figueiredo, D., & Alves, R. (2019). Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization. *Journal of Cleaner Production*, 213, 342–356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.190>

Maier, H. R., Kapelan, Z., Kasprzyk, J., Kollat, J., Matott, L. S., Cunha, M. C., Dandy, G. C., Gibbs, M. S., Keedwell, E., Marchi, A., Ostfeld, A., Savic, D., Solomatine, D. P., Vrugt, J. A., Zecchin, A. C., Minsker, B. S., Barbour, E. J., Kuczera, G., Pasha, F., ... Reed, P. M. (2014). Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: Current status, research challenges and future directions. *Environmental Modelling and Software*, 62, 271–299. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.013>

Naserizade, S. S., Nikoo, M. R., Montaseri, H., & Alizadeh, M. R. (2021). A Hybrid Fuzzy-Probabilistic Bargaining Approach for Multi-objective Optimization of Contamination Warning Sensors in Water Distribution Systems. *Group Decision and Negotiation*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10726-021-09727-0>

Naveen Naidu, M., Boindala, P. S., Vasan, A., & Varma, M. R. R. (2020). Optimization of Water Distribution Networks Using Cuckoo Search Algorithm. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 949, Issue January). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8196-6_7

Oliveira Turci, L. De, Sun, H., Bai, M., Wang, J., & Hu, P. (2019). Water pump station scheduling optimization using an improved genetic algorithm approach. *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2019 - Proceedings*, 2017, 944–951. <https://doi.org/10.1109/CEC.2019.8790264>

Rao, Z., & Alvarruiz, F. (2007). Use of an artificial neural network to capture the domain knowledge of a conventional hydraulic simulation model. *Journal of Hydroinformatics*, 9(1), 15–24. <https://doi.org/10.2166/hydro.2006.014>

Rao, Z., & Salomons, E. (2007). Development of a real-time, near-optimal control process for water-distribution networks. *Journal of Hydroinformatics*, 9(1), 25–37. <https://doi.org/10.2166/hydro.2006.015>

Reca, J., Martínez, J., & López, R. (2017). A Hybrid Water Distribution Networks Design Optimization Method Based on a Search Space Reduction Approach and a Genetic Algorithm. *Water*, 9(11), 845. <https://doi.org/10.3390/w9110845>

Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 USERS MANUAL. In U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY CINCINNATI (Vol. 38, Issue 4).
<https://doi.org/10.1177/0306312708089715>

Sela, L., & Housh, M. (2019). Increasing Usability of Water Distribution Analysis Tools through Plug-In Development in EPANET. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(5), 02519001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001596](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001596)

van Zyl, J. E., Savic, D. A., & Walters, G. A. (2004). Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 160–170. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(160))

Vegas Niño, O. T., Alzamora, F. M., Campos, J. C. A., & Tzatchkov, V. G. (2018). USING THE EPANET TOOLKIT v2.00.12 WITH DIFFERENT PROGRAMMING ENVIRONMENTS. Mexican Institute of Water Technology.

Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, I. C., Asce, A. M., Jeppson, R. M., Asce, M., Lansey, K., Lee, H., Members, S., Liebman, J. C., & Mays, L. (1987). those found in many real systems , although in the given system smaller pipes not contributing greatly to flow and pressure distribution were removed . Each of the participants applied a different procedure gener- ally developed from their own research fo. 113(2), 191–203.