



OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DAS BOMBAS HIDRÁULICAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

ANA RAQUEL FACCIOLI – raquel.faccioli@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

EDILAINE MARTINS SOLER – edilaine.soler@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FC

ÁREA: 3. PESQUISA OPERACIONAL

SUBÁREA: 3.1 - MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

RESUMO: OS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA SÃO RESPONSÁVEIS POR TRANSPORTAR A ÁGUA ATÉ SEU DESTINO. PARA ISSO, BOMBAS HIDRÁULICAS SÃO UTILIZADAS SEMPRE QUE O DESTINO DA ÁGUA ESTEJA A UMA COTA SUPERIOR À SUA ORIGEM. PORÉM ISSO DESPENDE UMA ALTA QUANTIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, RESULTANDO EM UM ALTO CUSTO ELÉTRICO, O QUAL É AGRAVADO PELAS TARIFAS DINÂMICAS. DESSE MODO, É IMPORTANTE FAZER UM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DAS BOMBAS HIDRÁULICAS PARA QUE ESTAS NÃO SEJAM LIGADAS NOS HORÁRIOS EM QUE A ENERGIA ELÉTRICA É MAIS CARA. DEVIDO A COMPLEXIDADE DESSE PROBLEMA, O QUAL ENVOLVE DIVERSOS ASPECTOS FÍSICOS E HIDRÁULICOS, MUITOS MODELOS MATEMÁTICOS E MÉTODOS DE SOLUÇÃO SÃO PROPOSTOS NA LITERATURA. ESTE ARTIGO TEM COMO OBJETIVO FAZER UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA, DESTACANDO OS PRINCIPAIS TRABALHOS, IDENTIFICANDO OS TIPOS DE MODELOS MATEMÁTICOS, MÉTODOS DE SOLUÇÃO E SOFTWARES DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA UTILIZADOS. PODEMOS OBSERVAR QUE A PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR INTEIRA MISTA É A MAIS UTILIZADA, E A MAIORIA DOS TESTES NUMÉRICOS APRESENTADOS SÃO COM REDES DE ABASTECIMENTO FICTÍCIAS.

PALAVRAS-CHAVES: OTIMIZAÇÃO; SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA; ENERGIA ELÉTRICA; EPANET; REVISÃO SISTEMÁTICA.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida. Precisamos dela tanto para o consumo quanto para o desenvolvimento de diversas atividades diárias e econômicas. Para que a população tenha acesso a esse recurso, a água percorre um longo caminho e os sistemas de abastecimento são os grandes responsáveis pelo transporte e qualidade da água. Assim, é imprescindível que os sistemas de abastecimento de água funcionem em condições apropriadas, fornecendo água nas quantidades e qualidades ideais. Um sistema de abastecimento mal dimensionado, seja por construção ou operação, pode afetar o atendimento da demanda além de gerar um grande desperdício de água devido à vazamentos. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2022) no ano de 2020 o desperdício de água tratada - seja por vazamentos ou ligações clandestinas nas redes de abastecimento de água - no Brasil foi de 40,1%, e esse índice de desperdício vem aumentando desde o ano de 2016 a uma taxa média anual de 0,7%. Essas perdas compreendem principalmente os vazamentos nas tubulações do sistema de distribuição provocados pelo excesso de pressão em locais com grande variação topográfica, associados ao estado de conservação das tubulações, aos materiais utilizados e à idade da rede, entre outros fatores.

Devido à topografia da região onde se encontra a rede de abastecimento, é necessária a utilização de estações elevatórias, as quais utilizam bombas hidráulicas para recalcar a água da fonte (poços, rios ou lagos) até os reservatórios, responsáveis pela distribuição da água. Ainda, as bombas hidráulicas são indispensáveis no transporte de água entre os reservatórios e, caso necessário, no transporte até a população sempre que não for possível fazê-lo através da gravidade. Para que as bombas hidráulicas funcionem a energia elétrica é fundamental. De acordo com Chen et al. (2021) aproximadamente 65% dos custos operacionais totais em um sistema de abastecimento de água é devido ao conjunto motor bomba. Além disso, estima-se que a ineficiência energética dos sistemas de abastecimento de água corresponde a taxa média de perdas de água que varia de 30% a 40% em todo o mundo, e no Brasil ultrapassa 36% (VILANOVA; FILHO; BALESTIERI, 2015). E esse desperdício gera uma despesa que normalmente é repassada ao consumidor na tarifa final (GONÇALVES, 2009). Sob o ponto de vista ambiental, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2022) destaca que o uso de energia sem considerações de eficiência contribui desnecessariamente para a emissão de gases de efeito estufa, impactando nas alterações climáticas em escala global.

Para abastecer os reservatórios é comum observar um procedimento que consiste em

ligar as bombas hidráulicas quando o nível mínimo do reservatório é atingido, mantendo-as ligadas até que o nível máximo do reservatório seja alcançado. Porém, este procedimento não é eficiente do ponto de vista energético, visto que as tarifas de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2010) e em diversos países são dinâmicas. Para as empresas de abastecimento o sistema tarifário é horo-sazonal, onde o preço do *kWh* varia de acordo com o horário do dia e período do ano. Nos horários de ponta, além da demanda de água ser maior, a energia elétrica pode ser até cinco vezes mais cara.

Sendo assim, é de interesse das empresas de abastecimento de água fazer um planejamento da operação das bombas hidráulicas, evitando seu funcionamento nos horários em que a energia elétrica é mais cara, de modo que a demanda seja atendida em sua totalidade e as perdas de água diminuídas. Devido à complexidade desse planejamento que envolve a dimensão das redes de abastecimento e as variações de demanda ao longo do dia, modelos de otimização energética e métodos de solução têm sido propostos nas últimas décadas, além do crescente uso do *software* de simulação hidráulica EPANET (ROSSMAN et al., 2009), onde o principal objetivo é reproduzir da forma mais aproximada possível o comportamento de um sistema de abastecimento de água real.

Este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão sistemática da literatura sobre a otimização da operação das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água. As publicações incluídas nesta revisão são relevantes na comunidade científica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O número de trabalhos referentes ao planejamento da operação de bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água tem aumentado nos últimos anos, assim como a utilização de novos recursos e programas para auxiliar a obtenção de soluções para este problema. Nesse sentido, o *software* EPANET se consolidou nas últimas décadas como uma importante ferramenta para otimizar os custos com energia elétrica considerando aspectos hidráulicos da rede. Nesta seção são apresentadas as principais características dos trabalhos publicados a partir da década de 80 até os dias atuais.

2.1 Década de 80

Little e McCrodden (1989) realizaram um estudo na cidade de Raleigh, Carolina do Norte, para determinar políticas eficientes de bombeamento de água bruta, aproveitando o armazenamento existente, considerando as taxas energéticas quando as bombas estão sendo

utilizadas e o uso de geradores reserva para evitar o consumo de energia nos horários de pico. O problema foi formulado como um modelo de programação linear inteiro misto para minimização dos custos com energia elétrica, os quais incluem tarifas de energia comercial e custos de gerador. O modelo inclui restrições de atendimento das demandas de água, níveis mínimo e máximo do tanque e os tempos mínimo e máximo de funcionamento da bomba. Testes foram realizados com os dados da estação de tratamento de Northside, na cidade de Raleigh, Carolina do Norte, onde a estação de bombeamento possuía três geradores a diesel, originalmente adquiridos para fornecer energia de emergência em caso de interrupção no serviço comercial. Os autores obtiveram uma economia energética de aproximadamente 29% quando comparada à operação do sistema realizada usualmente.

Zessler e Shamir (1989) propuseram um modelo de otimização não linear para minimizar os custos de energia da operação de bombeamento. Tal modelo utiliza restrições que estabelecem a vazão máxima das bombas e os volumes mínimos, máximos, iniciais e finais de água nos tanques. São conhecidas as demandas para um período de 24 horas e as propriedades hidráulicas de todos os componentes do sistema de distribuição de água da cidade de Ein Ziv, Israel, dividido em subsistemas. Os autores utilizaram a programação dinâmica, por meio do método de otimização progressiva (HOWSON e SANCHO, 1975), combinado com uma técnica analítica para otimização local, para obter a operação ótima das bombas. Segundo os autores, o modelo pode ser aplicado a sistemas de abastecimento de água onde os subsistemas aparecem em qualquer configuração.

Em Ormsbee et al. (1989) foi desenvolvida uma metodologia para otimizar a operação das bombas hidráulicas a fim de minimizar seus custos com energia elétrica. A metodologia elaborada é diretamente aplicável a sistemas completos de distribuição de água ou zonas de pressão isoladas com uma única instalação de armazenamento dominante e várias estações de bombeamento. A metodologia envolve o desenvolvimento de uma trajetória ótima do tanque, a qual foi determinada usando programação dinâmica, e o desenvolvimento de uma política ótima de operação da bomba determinada usando um esquema de enumeração explícita. A programação dinâmica divide o problema em uma série de subproblemas, os quais correspondem a períodos operacionais menores. A metodologia desenvolvida foi aplicada à terceira zona de alta pressão do sistema de água de Washington DC, em quatro dias representativos diferentes para examinar o impacto da variação no custo elétrico e demanda. Os testes realizados projetaram economias anuais de aproximadamente 6,7% com relação ao uso de energia elétrica.

2.2 Década de 90

O trabalho de Jowitt e Germanopoulos (1992) apresenta um modelo de programação linear para determinar a programação ótima das bombas em um horizonte de planejamento de 24 horas, onde são considerados os custos de energia, a demanda máxima, as eficiências relativas das bombas, a estrutura da tarifa de eletricidade, o perfil de demanda do consumidor, as características hidráulicas e as restrições operacionais da rede. É descrito o uso de simulação de rede por período estendido na determinação dos parâmetros das equações e restrições lineares da rede, e no estudo da operação de rede otimizada, através do método Simplex Revisado. O método foi aplicado em uma rede no Reino Unido, apontando economias consideráveis de 7,7% no custo de energia e 15,6% para os custos de energia e demanda máxima. Um dos fatores para essa redução nos custos é o uso de estações de bombeamento mais eficientes em seus limites de uso máximos.

Em Yu, Powell e Sterling (1994) é proposto um modelo matemático de otimização não linear para determinar a operação ótima de sistemas de distribuição de água contendo várias fontes e reservatórios. O modelo utiliza dados de previsão de demanda para o próximo período de 24 horas para calcular os níveis iniciais e finais nos reservatórios, e para estabelecer as restrições hidráulicas do sistema. Os autores desenvolveram um algoritmo de resolução que utiliza o método do gradiente reduzido generalizado juntamente com uma análise de sensibilidade, onde o algoritmo utiliza uma solução inicial viável, calculando novas soluções viáveis a cada iteração, melhorando gradualmente dentro de uma região factível, até convergir para um ótimo local. Testes realizados com uma rede hipotética de distribuição demonstraram economias de 6,3% na tarifa unitária e 8,3% no custo total. Os autores ressaltam que a precisão do modelo proposto para a programação da bomba é a mesma que a encontrada em simulações hidráulicas, garantindo a viabilidade da solução em um bom tempo computacional sem fazer uso de simplificações da rede de distribuição de água considerada.

2.3 Década de 2000

O trabalho de Cembrano et al. (2000) trata do uso de técnicas ótimas de controle em redes de distribuição de água. Os autores desenvolveram uma ferramenta de controle ótimo integrada a um sistema de controle de supervisão que segundo eles pode ser usado por uma grande classe de empresas de serviços de água. Inicialmente foi obtido o estado atual da rede do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA). Logo após, foram previstas as demandas futuras usando a Metodologia de Raciocínio Indutivo Fuzzy. Por fim, a otimização

foi executada com o *solver* WATERNET, um projeto que colaborou com a disseminação de técnicas e ferramentas avançadas para gerenciamento da água, usando o método do gradiente reduzido generalizado. Todo o sistema foi testado em um protótipo da cidade de Sintra, Portugal. Os resultados mostram uma economia de 18% decorrente do bombeamento de água em períodos em que a energia elétrica é mais barata.

Sakarya e Mays (2000) propuseram um modelo para determinar a operação ótima das bombas considerando a qualidade da água através de um problema de programação ótima de tempo discreto. A metodologia de solução é baseada em programação matemática, resultando em um problema de programação não linear de larga escala que não pode ser resolvido através dos métodos não lineares clássicos de otimização. Para obter a solução do problema de otimização é feita a integração do código de simulação de qualidade da água do sistema de distribuição através do *software* EPANET e o código de otimização não linear GRG2. Para os testes os autores consideraram um sistema hipotético de distribuição de água. Para as três funções objetivo propostas para o modelo foi obtida uma programação ótima de bombeamento. Porém, a metodologia proposta neste trabalho pode ser impraticável pois pode resultar em um tempo de bombeamento muito curto durante um intervalo de tempo, fazendo com que as bombas sejam ligadas e desligadas excessivamente, e assim resultando em um desgaste maior delas.

Para reduzir os custos com energia elétrica em uma rede de abastecimento, em Van Zyl, Savic e Walters (2004) é proposto um modelo que é resolvido através de um método de solução híbrido que combina o Algoritmo Genético com métodos de busca local. Esta metodologia de solução foi considerada pois, apesar do Algoritmo Genético encontrar a região da solução ótima, ele não encontra o ponto ótimo. O método híbrido foi aplicado e testado em um grande sistema de distribuição de água existente no Reino Unido, chamado *Richmond*. Com relação ao trabalho de Atkinson et al. (2000), foi obtida uma redução de 7,8% nos custos com energia elétrica além da redução do tempo de execução de 69 horas para 21 horas, obtida conectando o *software* EPANET diretamente à biblioteca do Algoritmo Genético do *Center for Water Systems da University of Exeter*. Além disso, o método híbrido foi aplicado a uma rede de distribuição de água hipotética criada pelos autores. Tal rede foi amplamente utilizada por autores em trabalhos posteriores, atualmente considerada uma rede de teste muito utilizada na literatura.

Rao e Salomons (2007) apresentaram uma nova abordagem para o controle quase ótimo em tempo real das redes de distribuição de água. A metodologia é baseada 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. Dessa forma é possível encontrar a operação ótima ou quase ótima da bomba e válvula para o um intervalo de tempo, levando em consideração as variações da demanda a curto prazo, estrutura tarifária e restrições operacionais. A rede de distribuição considerada e modelada no EPANET foi a *Anytown* modificada proposta por Walters et al. (1999), a qual foi baseada em uma versão expandida da conhecida rede *Anytown* de Walski et al. (1987). Ainda, a base de conhecimento do modelo no EPANET foi capturada usando uma rede neural artificial.

Em López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008) é proposto um modelo matemático para otimização da operação em redes de distribuição de água minimizando os custos com energia elétrica. O modelo considera restrições que limitam o número de acionamentos das bombas, o que reduz o espaço de busca e consequentemente diminui o tempo computacional. Foi utilizada a meta-heurística estocástica Colônia de Formigas adaptada. O *software* EPANET foi utilizado no tratamento de restrições e na verificação de soluções viáveis. A abordagem proposta foi testada utilizando a rede hipotética proposta em Van Zyl, Savic e Walters (2004) e a rede real *Richmond* localizada no Reino Unido. Para fins de comparação, o problema foi resolvido através do Algoritmo Genético. Para as duas redes, os melhores resultados foram obtidos utilizando a meta-heurística Colônia de Formigas.

2.3 Década de 2010

Em Bagirov et al. (2013) é proposta uma nova abordagem para modelagem da programação explícita das bombas para minimizar o consumo de energia elétrica, usando os tempos de início e fim da operação da bomba como variáveis contínuas e variáveis inteiras binárias para descrever o status da bomba no início do período de programação, reduzindo o número de variáveis do modelo. Essa abordagem difere de outras metodologias onde as variáveis inteiras binárias são usadas para cada hora, o que é considerado impraticável do ponto de vista operacional. O problema foi formulado como um problema de programação não linear inteira mista e um novo algoritmo foi desenvolvido para sua solução. O EPANET foi usado para realizar simulações hidráulicas e os testes foram feitos utilizando duas instâncias: a primeira é o problema Net3 existente no EPANET e a segunda é uma adaptação da rede de Van Zyl, Savic e Walters (2004). Para o problema Net3, a melhor solução encontrada resultou no valor de \$347,66 com um déficit de 4,1% no volume de água na rede. Já para a segunda rede, o valor da função objetivo foi de \$253,87, com um déficit de 3,58% no volume de água.

Em Giacomello, Kapelan e Nicolini (2013) é proposto um modelo não linear de otimização o qual é resolvido por um novo método de otimização híbrido, desenvolvido para aproximar-se da operação ótima em tempo real de estações de bombeamento, combinando programação linear com uma estratégia de busca local utilizando um algoritmo ganancioso. Apesar das imprecisões introduzidas pela linearização das restrições hidráulicas, a metodologia híbrida provou ser capaz de encontrar uma solução quase ótima, mas com uma economia considerável no tempo computacional. A metodologia foi aplicada a dois estudos de caso: a rede *Anytown* de Walski et al. (1987) e a rede de distribuição de água de *Richmond*, no Reino Unido. Os resultados obtidos demonstram que o método híbrido é capaz de resolver problemas reais de maneira extremamente eficiente do ponto de vista computacional, preservando a precisão da solução obtida. Isso torna o método particularmente atraente para uso em aplicativos em tempo real.

Kurek e Ostfeld (2013) desenvolveram uma metodologia com dois modelos de otimização multiobjetivo, os quais consideram bombas de velocidade variável e visam minimizar os custos com energia elétrica referentes à operação das bombas e o custo de projeto dos tanques. Os dois modelos se diferenciam no que diz respeito à qualidade da água: o primeiro modelo visa a redução da concentração de desinfetantes presentes na água e o segundo modelo tem como objetivo minimizar a idade da água a ser distribuída. São consideradas restrições físicas da rede e restrições de confiabilidade de armazenamento. A metodologia de solução empregada nos dois modelos foi o *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* vinculado ao *software* hidráulico EPANET. O sistema de distribuição de água considerado para os testes foi o Exemplo 3 do EPANET, o qual foi sujeito a simulações de período prolongado. Segundo os autores, o modelo pode ser usado como uma ferramenta de decisão para operação de bombas, qualidade da água, armazenamento necessário para considerações de confiabilidade e tomada de decisão no dimensionamento de tanques.

Em Sousa e Soares (2014) é proposto um modelo multiobjetivo para minimizar as perdas por vazamento de água e os custos com energia elétrica, além de maximizar a confiabilidade do sistema no atendimento dos padrões de demanda. O modelo integra o algoritmo evolucionário multiobjetivo *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* e o simulador hidráulico baseado na *Toolkit* EPANET2. O modelo foi elaborado para a rede *Anytown* de Walski et al. (1987). Os resultados demonstraram a eficiência do modelo ao gerar 20 soluções não dominadas, permitindo que o responsável pela operação do sistema de abastecimento de água selecione a melhor estratégia de acordo com objetos pré-estabelecidos. A solução com

maior confiabilidade obteve uma redução de 5% nas perdas por vazamento, 23,2% dos custos com energia elétrica e um aumento de 12% da confiabilidade do sistema.

Ghaddar et al. (2015) desenvolveram um modelo de otimização não linear inteiro misto não convexo para reduzir os custos com energia elétrica na operação das bombas hidráulicas. Os autores apresentaram uma abordagem de decomposição Lagrangiana que decompõem o problema de acordo com os períodos em subproblemas menores, os quais são resolvidos de forma independente. Para garantir soluções viáveis de alta qualidade, um algoritmo de busca na vizinhança foi acoplado ao simulador de água EPANET para verificar se o planejamento obtido atende à demanda e para calcular o consumo de energia. Duas redes baseadas em redes reais são utilizadas nos testes numéricos: a primeira rede é a IND1 e a segunda é a rede *Poormond*, a qual é adaptada da rede de distribuição de água de *Richmond* usada na literatura (GIACOMELLO; KAPELAN; NICOLINI, 2013). Os testes computacionais mostraram que a otimização nos sistemas de abastecimento de água levou a uma diminuição nos níveis médios de água nos tanques e o uso de preços dinâmicos para a tarifa de eletricidade reduziu significativamente o custo com energia elétrica, resultando em uma redução de 24% para a rede IND1 e 34% para a rede *Poormond*.

Naoum-Sawaya et al. (2015) apresentaram uma metodologia de simulação-otimização para minimizar o custo com energia elétrica devido ao uso das bombas utilizando o modelo não linear inteiro misto proposto por Ghaddar et al. (2015). Uma técnica de decomposição e uma heurística foram utilizadas. O simulador hidráulico EPANET foi usado para verificar a viabilidade hidráulica da solução e o custo de energia, e uma adaptação do simulador é desenvolvida para modelar os vazamentos nas tubulações. Duas redes da literatura foram usadas nos testes: a primeira é a rede *Poormond*, mesma rede utilizada por Ghaddar et al. (2015), e a segunda é uma rede maior disponível online, chamada de C-TOWN. Para a primeira rede, os resultados obtidos neste trabalho foram melhores do que os obtidos por Ghaddar et al. (2015), além de reduzir a sobrecarga computacional. Ainda, os vazamentos foram reduzidos em até 76% considerando um orçamento igual a 90% do custo total necessário para trocar todas as tubulações da rede.

No trabalho de Costa et al. (2016) é apresentada uma rotina geral de otimização integrada ao EPANET, que permite determinar regras ótimas de operação para qualquer tipo de sistema de distribuição de água. Um algoritmo *Branch-and-Bound* é usado para garantir a solução ótima global, em tempos computacionais aceitáveis. O algoritmo desenvolvido enumera todas as soluções viáveis para um determinado problema, excluindo uma grande quantidade de soluções inviáveis que não precisam ser simuladas. O sistema de distribuição

de água utilizado neste trabalho foi a rede *Anytown* modificada. Embora o tempo computacional seja maior que os resultados da literatura, que geralmente são baseados em metaheurísticas, é garantida a obtenção da solução ótima global. Em todas as soluções factíveis, foi obtida uma solução ótima global com um custo de US\$ 3578.66, sendo mais barata do que a solução obtida por Rao e Salomons (2007).

Marchi, Simpson e Lambert (2016) introduziram uma modificação na biblioteca original do kit de ferramentas EPANET2, chamado EPANET2-ETTAR, para alterar os controles baseados em regras de maneira automática por um algoritmo de otimização. A capacidade de otimizar os controles da bomba que dependem de mais de uma condição pode ser útil em sistemas de distribuição complexos. O algoritmo de otimização escolhido neste trabalho é um Algoritmo Genético de objetivo único. O kit de ferramentas EPANET2-ETTAR foi aplicado à otimização das operações da bomba do sistema de distribuição de água introduzido por Van Zyl, Savic e Walters (2004). Os resultados mostram que é possível encontrar soluções mais econômicas em comparação com controles simples, porém com tempos computacionais maiores.

Em Bonvin et al. (2017) é proposto um modelo não linear inteiro misto não convexo para minimizar os custos com energia elétrica devidos à operação das bombas em uma rede de distribuição de água ramificada, rede comum em áreas rurais. O modelo foi linearizado e uma função foi introduzida para converter uma solução desse relaxamento em uma solução viável. Essa abordagem foi aplicada a uma rede real de distribuição de água potável rural, localizada na França, composta por 16 torres de água, 31 tubulações e 6 bombas de 2 classes diferentes. Foram testadas 365 instâncias diferentes, correspondentes a um ano de dados históricos de demanda de água. Foram encontradas soluções viáveis com um tempo computacional pequeno, com economias anuais de 16,9% e viabilidade avaliada no simulador EPANET.

Candelieri, Perego e Archetti (2018) consideraram o problema de otimização da programação de bombas onde estas estão associadas a variáveis binárias e são de velocidade variável. A otimização desse problema é um desafio computacional, mesmo para pequenas redes de abastecimento de água, devido as não linearidades e variáveis binárias associadas as bombas. O simulador EPANET foi usado para calcular o custo de energia, para verificar se as restrições hidráulicas não são violadas e se a demanda é atendida. Duas abordagens de Otimização Bayesiana foram propostas neste trabalho: uma usando Processo Gaussiano para ajustar o modelo substituto e outra usando uma Floresta Aleatória. A rede de distribuição de água *Anytown* (WALSKY et al., 1987) e uma rede de distribuição de água real em larga escala em Milão, Itália, são consideradas. A Otimização Bayesiana com uma Floresta

Aleatória como modelo substituto foi a única abordagem que proporcionou a melhor solução em 50% das funções de teste consideradas.

2.3 Década de 2020

No trabalho de Vieira et al. (2020) foi proposto um novo relaxamento linear para um modelo de programação não linear inteira para sistemas de distribuição de água a fim de otimizar seus custos operacionais. Visando a viabilidade da solução para o problema original, desenvolveu-se um procedimento para corrigir erros induzidos pela linearização. O erro máximo tolerado é aumentado e os procedimentos de linearização e otimização são repetidos apenas se um resultado inviável ou insatisfatório é obtido. O EPANET foi utilizado para avaliar a viabilidade das soluções obtidas. Os testes realizados neste trabalho superam os melhores resultados encontrados para a rede de Van Zyl, Savic e Walters (2004), para a rede esqueleto de *Richmond* e para a rede completa de *Richmond*. Os autores ainda forneceram uma nova rede de testes de acordo com os parâmetros e condições tarifárias energéticas brasileiras, obtida a partir do sistema de abastecimento de água de Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, que, através de testes com o modelo proposto, apresentou uma redução de 16,82% nos gastos com energia elétrica em relação ao que é realizado na prática e o consumo de energia elétrica foi reduzido em 16,83%. Assim, além de trazer ganhos financeiros, a otimização em sistemas de abastecimento de água também pode trazer benefícios ambientais.

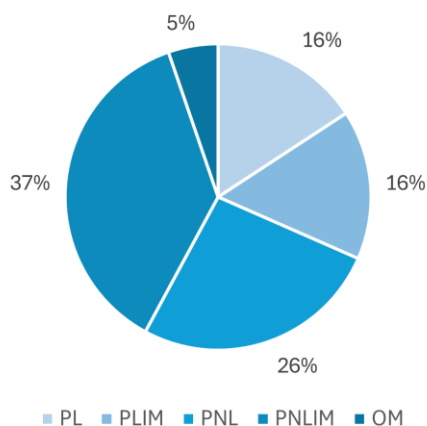
Egito, Azevedo e Bezerra (2023) propuseram um modelo de otimização para aumentar a eficiência energética em sistemas de abastecimento de água que combina o uso eficiente de reservatórios de níveis variados com regras operacionais para o acionamento das bombas. O simulador hidráulico EPANET foi utilizado em conjunto com o Algoritmo Genético para definir operações ótimas das bombas. O modelo computacional utiliza a ferramenta *The Water Network Tool for Resilience*, pacote de código aberto projetado para simular uma ampla gama de incidentes disruptivos em sistemas de abastecimento de água (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018). A rede *Anytown* modificada foi utilizada nos testes considerando um horizonte de planejamento de 10 dias, reduzindo os gastos diários com energia elétrica em 21,58%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na análise dos trabalhos apresentados, podemos classificar os modelos matemáticos para otimização operacional das bombas hidráulicas em sistemas de

abastecimento em cinco tipos: Programação Linear (PL), Programação Linear Inteira Mista (PLIM), Programação Não Linear (PNL), Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) e Otimização Multiobjetivo (OM). A Figura 1 mostra a distribuição dessas áreas nos trabalhos analisados.

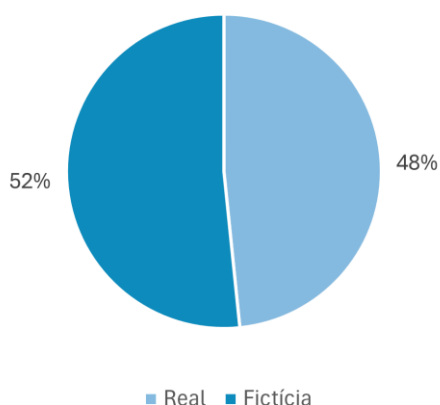
FIGURA 1 - Análise dos modelos matemáticos utilizados.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para testar a aplicabilidade do modelo matemático e as soluções obtidas muitos autores utilizaram redes fictícias ou reais de abastecimento de água. A Figura 2 mostra a porcentagem de utilização destes tipos de redes.

FIGURA 2 – Análise das redes de abastecimento utilizadas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com o decorrer dos anos é notável a crescente utilização de ferramentas para simulação hidráulica para obter modelos e resultados mais próximos da realidade. Dentre elas

o *software* EPANET ganha destaque. A Tabela 1 mostra a relação dos trabalhos apresentados que utilizam o EPANET e a forma que foi utilizado.

TABELA 1 - Relação dos trabalhos que usaram o *software* de simulação hidráulica EPANET.

Referência	Utilização do EPANET
Sakarya e Mays (2020)	Interface do EPANET com um código para otimização não linear, GRG2, para obter a solução do problema de otimização.
Zyl, Savic e Walters (2004)	Conexão do EPANET diretamente à biblioteca de <i>software</i> do Algoritmo Genético do <i>Center for Water Systems da University of Exeter</i> para reduzir o tempo de execução.
Rao e Salomons (2007)	Uso do Epanet para modelar a rede <i>Anytown</i> Modificada.
López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008)	O EPANET foi usado no cálculo dos valores da função objetivo e no tratamento de restrições.
Bagirov et al. (2013)	O EPANET foi utilizado para realizar simulações hidráulicas. A rede Net3 existente no EPANET foi utilizada.
Giacomello, Kapelan e Nicolini (2013)	O EPANET foi usado iterativamente para avaliar qual bomba é mais cara (em termos de custos de energia) e, ao mesmo tempo, garantir que as restrições físicas sejam satisfeitas para cada etapa.
Kurek e Ostfeld (2013)	Metodologia multi-objetivo utilizando o <i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i> vinculado ao EPANET para compensar os custos de bombeamento, qualidade da água e dimensionamento dos tanques.
Sousa e Soares (2014)	Integração computacional da <i>Tollkit Library</i> do EPANET para calcular as funções objetivos.
Ghaddar et al. (2015)	O <i>Improved Limited Discrepancy Search</i> foi acoplado ao EPANET para garantir soluções viáveis, verificando se o planejamento obtido atende à demanda e calculando o consumo de energia.
Naoum-Sawaya et al. (2015)	O EPANET foi utilizado para verificar a viabilidade hidráulica da solução e o custo de energia. Uma adaptação do simulador foi desenvolvida para modelar os vazamentos nas tubulações.
Costa et al. (2016)	É usada uma rotina geral de otimização integrada ao EPANET, permitindo determinar regras ótimas de operação para qualquer tipo de sistema de distribuição de água.
Marchi, Simpson e Lambert (2016)	Introdução de uma modificação do kit de ferramentas EPANET2, EPANET2-ETTAR, para alterar os controles baseados em regras de maneira automática.
Bonvin et al. (2017)	Emprego do EPANET para avaliar a viabilidade das soluções obtidas de um modelo não linear inteiro misto não convexo.
Candelieri, Perrego e Archetti (2018)	O EPANET foi usado para calcular o custo de energia associado a uma solução para o planejamento das bombas, para verificar se as restrições hidráulicas não são violadas e se a demanda é atendida.
Vieira et al. (2020)	Utilização do EPANET para avaliar a viabilidade das soluções obtidas de um modelo de programação não linear inteira.
Egito, Azevedo e Bezerra (2023)	Uso conjunto do EPANET com o Algoritmo Genético para definir rotinas operacionais ótimas de sistemas de bombeamento de água. O modelo computacional utiliza um pacote projetado para simular a resiliência de redes de abastecimento de água.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de abastecimento de água são indispensáveis, mas estes têm um alto custo elétrico. Fazer um planejamento da operação das bombas hidráulicas não só reduz esse custo como reduz o desperdício de água e a emissão de gases de efeito estufa.

Este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura destacando os principais trabalhos relacionados a otimização energética em sistemas de abastecimento de água em um período de quatro décadas, distinguindo-os no que diz respeito aos modelos matemáticos, métodos de solução e *softwares* utilizados para obter a melhor solução. Vale destacar o *software* de simulação hidráulica EPANET, o qual consolidou-se devido a sua aplicabilidade e confiabilidade em diversos problemas.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processos no 314711/2020-1 e 316787/2023-0), e da Fapesp - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processos no 2013/07375-0 e 2022/05803-3).

REFERÊNCIAS

- ANELL. **Resolução Normativa n. 414**. [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 11 Mar. 2021.
- ATKINSON, R. et al. Genetic algorithm optimisation of level-controlled pumping station operation. **Water network modelling for optimal design and management**, p. 79-90, 2000.
- BAGIROV, A. M. et al. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 57, n. 3-4, p. 873-886, 2013.
- BONVIN, G. et al. A convex mathematical program for pump scheduling in a class of branched water networks. **Applied Energy**, v. 185, p. 1702-1711, 2017.
- CANDELIERI, A.; PEREGO, R.; ARCHETTI, F. Bayesian optimization of pump operations in water distribution systems. **Journal of Global Optimization**, v. 71, p. 213-235, 2018.
- CEMBRANO, G. et al. Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system. **Control engineering practice**, v. 8, n. 10, p. 1177-1188, 2000.
- CHEN, W. et al. Genetic optimization toward operation of water intake-supply pump stations system. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123573, 2021.

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

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

GHADDAR, B. et al. A lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 241, n. 2, p. 490-501, 2015.

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

GONÇALVES, R. F. **Uso racional de água e energia: conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

HOWSON, H. R.; SANCHO, N. G. F. A new algorithm for the solution of multi-state dynamic programming problems. **Mathematical programming**, v. 8, p. 104-116, 1975.

JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G. Optimal pump scheduling in water-supply networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 118, n. 4, p. 406-422, 1992.

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

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

LITTLE, K. W.; MCCRODDEN, B. J. Minimization of raw water pumping costs using MILP. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 115, n. 4, p. 511-522, 1989.

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

MARCHI, A.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Optimization of pump operation using rule-based controls in EPANET2: New ETTAR toolkit and correction of energy computation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 7, p. 04016012, 2016.

NAOUM-SAWAYA, J. et al. Simulation-optimization approaches for water pump scheduling and pipe replacement problems. **European Journal of Operational Research**, v. 246, n. 1, p. 293-306, 2015.

ORMSBEE, L. E. et al. Methodology for improving pump operation efficiency. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 115, n. 2, p. 148-164, 1989.

ROSSMAN, L. A. et al. **Manual do Usuário: Epanet 2.0 Brasil**, 2009. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf>. Acesso em: 13 Mar. 2021.

SAKARYA, A. B. A.; MAYS, L. W. Optimal operation of water distribution pumps considering water quality. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 126, n. 4, p. 210-220, 2000.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. SNSA/Ministério das Cidades Brasília, 2022. Disponível em: <http://antigo.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_GESTAO_TECNICA_DE_AGUA_AE_SNIS_2022.pdf>. Acesso em: 18 Jul. 2022.

SOUSA, A. C.; SOARES, A. K. Modelo para otimização da operação de sistemas de distribuição de água utilizando o algoritmo genético multiobjetivo SPEA. **Exacta**, v. 12, n. 3, p. 313-324, 2014.

VAN ZYL, J. E.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. **Journal of water resources planning and management**, v. 130, n. 2, p. 160-170, 2004.

VIEIRA, B. S. et al. Optimizing drinking water distribution system operations. **European Journal of Operational Research**, v. 280, n. 3, p. 1035-1050, 2020.

VILANOVA, M. R. N.; MAGALHÃES FILHO, P.; BALESTIERI, J. A. P. Performance measurement and indicators for water supply management: Review and international cases. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 43, p. 1-12, 2015.

WALSKI, T. M. et al. Battle of the network models: Epilogue. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 113, n. 2, p. 191-203, 1987.

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

YU, G.; POWELL, R. S.; STERLING, M. J. H. Optimized pump scheduling in water distribution systems. **Journal of optimization theory and applications**, v. 83, n. 3, p. 463-488, 1994.

ZESSLER, U.; SHAMIR, U. Optimal operation of water distribution systems. **Journal of water resources planning and management**, v. 115, n. 6, p. 735-752, 1989.