

Otimização em Rede de Distribuição de Água[★]

Tames F. Mariano^{*} Gustavo M. Lima^{**} Bruno M. Brentan^{**}
Brenner S. Rego^{*} Guilherme V. Raffo^{*,***}

^{*} Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) -
Universidade Federal de Minas Gerais (e-mails:
tamesfernandes@gmail.com e brennersr7@ufmg.br).

^{**} Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos -
Universidade Federal de Minas Gerais (e-mails:
limameirelles@gmail.com e brentan@ehr.ufmg.br)

^{***} Departamento de Engenharia Eletrônica - Universidade Federal de
Minas Gerais (e-mails: raffo@ufmg.br)

Abstract: Water distribution networks (WDNs) require proactive maintenance methods in order to ensure its correct functioning. Failures, such as leakages and pipe deterioration, lead consumers to bad experiences such as having water supply services interrupted. In this paper, the focus is to improve a WDN. First, we set a pattern curve and the objective function will achieve a pre-established value of minimum pressure to all nodes in the system. Three options are available: pipe replacement, pipe cleaning and leakage fixing. Thus, by considering a limited budget, the most economic solution must be determined to attend the operational pressure and, at the same time, lead to the minimum mean pressure during 24 hours of operation. In this development, we used the Particle Swarm Optimization (PSO) method. The results point to a tool with huge potential of implementation in WDNs rehabilitation.

Resumo: Redes de distribuição de água (RDAs) requerem manutenção a fim de garantir seu bom funcionamento. Falhas na rede, tais como vazamentos e deterioramento, conduzem os consumidores a experiências indesejadas tal como a interrupção do serviço de distribuição de água. Neste trabalho, o foco é levantar propostas de melhorias para uma RDA. Inicia-se considerando uma curva padrão de demanda e a função objetivo irá alcançar um valor pré-estabelecido de pressão mínima para todos os nós no sistema. Três opções de melhoria estão disponíveis: troca da tubulação, limpeza da tubulação e eliminação de vazamentos. Assim, considerando um orçamento limitado, a solução mais econômica deve ser obtida de modo a atender as condições operacionais de pressão e que, ao mesmo tempo, apresente a menor pressão média na rede durante 24 horas de operação. Neste desenvolvimento, foi empregada a técnica de otimização por enxame de partículas (do inglês: *Particle Swarm Optimization* - PSO). Os resultados apontam para uma ferramenta com grande potencial de implementação na reabilitação de RDAs.

Keywords: Particle Swarm Optimization, Water Distribution Networks, WDN rehabilitation

Palavras-chaves: Otimização por enxame de partículas, Redes de Distribuição de Água, Reabilitação de RDA

1. INTRODUÇÃO

Uma rede de distribuição de água (RDA) é um sistema composto de diversos equipamentos interconectados (fontes de água, tubulações, bombas, tanques, válvulas e reservatórios), capaz de distribuir e suprir a demanda de água em diferentes áreas. A tarefa mais básica de uma RDA consiste em prover água de boa qualidade a todos os consumidores com pressão e volume adequados ao número de usuários da rede (Walski et al., 2003; Swietochowska and Bartkowska, 2022).

É grande o risco de desabastecimento de água devido a problemas estruturais em RDAs, tais como o deterioramento da rede devido à corrosão, o aumento da rugosi-

dade nas tubulações, a crescente demanda por água e o maior número de vazamentos (Mazumder et al., 2018). Por esse motivo, soluções de reabilitação e intervenções que garantam o consumo deste recurso sem interrupção são constantemente implementadas para longo e médio prazo (D'Ercole et al., 2018). Durante a reabilitação de redes de distribuição de água, diferentes opções estão à disposição do operador, tais como: aumentar a potência das estações de bombeamento (Móller et al., 2020), limpar, revestir ou trocar tubulações antigas (Sarbu, 2021), consertar vazamentos (Bonthuys et al., 2021), aumentar a capacidade dos reservatórios (Viccione et al., 2019), etc. Entretanto, dado o custo elevado de implementação de melhorias na rede, nem sempre todas as possibilidades para reabilitação podem ser testadas e confrontadas.

[★] Reconhecimento do suporte financeiro dado pela CAPES

Em geral, os modelos de otimização da infraestrutura de RDAs têm um ou mais objetivos que podem ser agrupados em quatro categorias (Mala-Jetmarova et al., 2018): objetivos econômicos (Kim and Mays, 1994; Ostfeld, 2005; Wu et al., 2012), objetivos de desempenho (McClymont et al., 2014; Basupi and Kapelan, 2015), objetivos comunitários (Halhal et al., 1997; Kanta et al., 2012; Fu et al., 2013) e objetivos ambientais (Wu et al., 2011).

Cantos and Juran (2018) propuseram um modelo estatístico para otimização de uma RDA na França, com o objetivo de melhorar o desempenho da rede através da predição e do cálculo do risco de falhas. A modelagem contou com dados coletados durante 74 anos. Apesar de ser um modelo eficiente, para a grande maioria das RDAs faltam dados e o histórico completo de manutenções na rede (Jafar et al., 2010; Alegre and Coelho, 2012; Barton et al., 2021). Soma-se a isso o fato de que prever a degradação em RDAs requer uma análise complexa que combine fatores físicos, como idade, material, tamanho e posição da tubulação, fatores ambientais, tal como condições do solo, e fatores operacionais, tal como a qualidade da água. Desta forma, incertezas presentes nestes parâmetros podem impactar no cálculo de risco de falha da rede hidráulica.

Este artigo aborda uma alternativa simplificada para reabilitação de RDAs. Neste trabalho, não é feito o cálculo do risco de falhas em estruturas deterioradas. Ao invés disso, este estudo pretende contribuir para a otimização de RDAs na medida que aumenta a capacidade de transporte de água na rede e minimiza os custos de manutenção da rede. Os benefícios após a limpeza, troca ou conserto de vazamentos em uma rede são mostrados através de parâmetros como pressão.

Trabalhos com o mesmo foco de análise econômica para operação e manutenção em RDAs foram encontrados na literatura. Em Kanakoudis and Tolikas (2001), por exemplo, o modelo calculou para a cidade de Athena o tempo ótimo para troca de tubulações em RDAs baseado no custo de reparo de vazamentos e tubulações. Já em Nasrollahi et al. (2021), a análise consistiu em encontrar uma pressão ótima que minimizou a energia consumida e os custos associados ao conserto de vazamentos e reparo de tubulações. No presente trabalho, o objetivo é obter pressões nos nós acima de um valor estipulado e, ao mesmo tempo, minimizar o custo de manutenção da rede e a pressão média da rede. Como o orçamento é um fator limitante, a rede aqui analisada não pode ter todos os vazamentos sanados ou tubulações trocadas e limpas, pois cada modificação tem um custo associado. Para auxiliar o operador na tomada de decisão sobre a melhor forma de reabilitar uma RDA, este artigo propõe o uso de uma técnica de otimização por enxame de partículas (do inglês: *Particle Swarm Optimization - PSO*).

O PSO é um algoritmo heurístico baseado no comportamento social de um bando de pássaros. O método tem como objetivo buscar a solução ótima, através da troca de informações entre indivíduos, chamados de “partículas”. Nesta técnica, cada partícula representa uma solução para o problema proposto e a trajetória é definida de maneira interativa com base em componentes sociais, cognitivos e físicos (Villarreal et al., 2015).

A eficiência da modelagem do problema de otimização de RDA utilizando PSO é verificada em simulação para en-

contrar um custo ótimo de manutenção da rede, minimizar a pressão média da rede, sem deixar de atender a critérios limitadores, previamente estabelecidos, de pressão nos nós e orçamento.

Este trabalho está organizado como segue: a Seção 2 apresenta formulação do problema; a Seção 3 descreve o método proposto, bem como o problema de otimização a ser resolvido; a Seção 4 apresenta os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta; e, por fim, a Seção 5 conclui o trabalho.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A rede escolhida para análise hidráulica é uma rede fictícia, proposta pelos autores para estudo e reprodução no software EPANET (Rossman, 2000), contendo 21 nós, 41 tubulações e 1 reservatório. A maneira como os componentes desta rede estão interligados é representada via EPANET e é ilustrada na Figura 1.

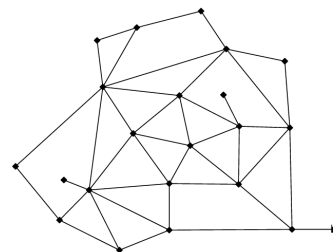


Figura 1. Rede representada no software EPANET.

O problema de otimização proposto para o sistema de distribuição de água consiste em reabilitar esta rede minimizando a pressão média durante 24 horas de operação da maneira mais econômica. Assim, o sistema conta com as seguintes condições, que são tratadas no algoritmo como penalizações no custo para que sejam atendidas:

- Pressão mínima no sistema durante 24h de operação não deve ser inferior ao valor mínimo conforme a equação:

$$\chi_p = \sum_{j=1}^{\eta} (\lambda_{P_j} \cdot |P_{min} - P_j|) \quad (1)$$

onde χ_p é a penalização aplicada ao custo devido à pressão, η é o número total de nós na rede, P_{min} é a pressão mínima nos nós, P_j é a pressão no nó j , λ_{P_j} é a constante de penalização pressão, dada por

$$\begin{cases} \lambda_{P_j} \neq 0 & \text{se } P_j < P_{min} ; \\ \lambda_{P_j} = 0 & \text{se } P_j > P_{min} ; \end{cases} \quad (2)$$

- Orçamento limitado conforme segue:

$$\chi_o = \lambda_o \cdot |C_{max} - C_{total}| \quad (3)$$

onde χ_o é a penalização devido ao orçamento, C_{max} é o orçamento máximo, C_{total} é a soma dos custos de melhorias na rede, λ_o é a constante de penalização do orçamento, dada por

$$\begin{cases} \lambda_o \neq 0 & \text{se } C_{total} > C_{max} ; \\ \lambda_o = 0 & \text{se } C_{total} < C_{max} . \end{cases} \quad (4)$$

O custo total de penalizações, χ , eleva o custo do projeto, onde χ_p e χ_o são ajustados através de penalizações com valores fixos λ_p e λ_o respectivamente. Além disso, os

valores de penalizações, χ_P e χ_o , estão em intervalos similares, sem favorecer um termo em detrimento de outro durante a busca por soluções, χ é dado pela seguinte soma:

$$\chi = \chi_P + \chi_o \quad (5)$$

As penalizações têm por finalidade fazer com que o algoritmo procure somente soluções desejáveis dentro do espaço de busca, ou seja, aquelas soluções que ao mesmo tempo minimizem o custo do projeto atendendo às restrições de pressão mínima nos nós e o orçamento limitado.

No método PSO são ajustados alguns parâmetros para busca da solução. O número de partículas, N_P , representa a população inicial, sendo que a trajetória de cada partícula evolui após cada iteração de acordo com sua velocidade e posição atual confrontada com o progresso das outras partículas da população. O coeficiente social, C_S , modela o progresso de todas as partículas da população em conjunto. Já o coeficiente cognitivo, C_C , diz respeito a melhor posição visitada anteriormente por cada partícula individualmente. O vetor de inércia, I , ajuda na convergência da solução, sendo que valores grandes contribuem para uma busca global e para a exploração de novas áreas do espaço de solução, enquanto valores menores de I favorecem a busca local, o que é interessante quando as partículas estão próximas de uma boa solução (Eberhart and Shi, 2000).

Por fim, o número máximo de interações, N_{max} , ajusta a quantidade máxima de soluções buscadas, dado por $N_{max} \cdot N_{vars}$, onde N_{vars} é o número de variáveis. A tolerância, T , se refere a diferença máxima entre a melhor solução encontrada e as últimas interações (Eberhart et al., 1995). A Tabela 1 mostra os parâmetros ajustados para o PSO implementado, os valores são padrão sugeridos pela *Toolbox* do MATLAB (Particle Swarm Optimization Algorithm, 2022).

Tabela 1. Parâmetros do PSO.

Parâmetro	Valor
Coefficiente Social (C_S)	1.49
Coefficiente Cognitivo (C_C)	1.49
Inércia (I)	[0.1000 1.1000]
Número de Partículas (N_P)	20
Número Máx. de Interações (N_{max})	200
Tolerância (T)	1.0000e-12

Dentre as opções de busca do algoritmo, define-se que três opções de melhoria da rede estão disponíveis para serem usadas em conjunto:

(1) **Substituição de Tubulações Antigas por Novas**

A troca de tubulações antigas por novas é vantajosa, já que a rugosidade do tubo será menor (coeficiente μ maior) e isto, por sua vez, reduzirá as perdas de carga, J , observadas. Além disso, é desejável trocar as tubulações antigas por novas com diâmetros, D , maiores para também auxiliar a redução das perdas de carga, J , do sistema. A equação de Hazen-Williams, muito utilizada no dimensionamento de tubulações, é dada por (Mello and Carvalho, 1998)

$$J = 10643 \cdot \left(\frac{Q}{\mu}\right)^{1.852} \cdot \left(\frac{1}{D}\right)^{4.87}, \quad (6)$$

onde $J[m/m]$ é a perda de carga unitária, $Q[m^3/s]$ é a vazão, μ é o coeficiente de Hazen-Williams e $D[m]$ é o diâmetro interno do tubo.

No entanto, é importante observar que as tubulações com diâmetros, D , maiores requerem um investimento financeiro mais elevado. A troca por diâmetros menores se torna uma opção viável apenas quando se trata de redução considerável da rugosidade da tubulação. O custo de troca de tubulações é ilustrado na Tabela 2. O novo coeficiente de Hazen-Williams em tubulações novas é dado por $\mu = 130$.

(2) **Limpeza de Tubulações Antigas**

Ao limpar as tubulações antigas é possível reduzir as perdas de carga do sistema sem alterar as tubulações originais e, portanto, mantendo os mesmos valores de diâmetros. Quando se trata de limpar a rede, o objetivo é a obtenção de uma rugosidade menor. Mesmo após a limpeza, a rugosidade de tubulações limpas é superior à de tubulações novas. Por outro lado, esta alternativa é significativamente mais econômica e, apesar da pressão média do sistema ser menor, sua relação custo/benefício pode ser vantajosa. O coeficiente de Hazen-Williams em tubulações limpas é dado por $\mu = 120$. O custo de troca e limpeza de tubulações também é ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2. Relação diâmetro e custo de limpeza ou troca de tubulações - adaptado de Walski et al. (1987).

-	Diâmetro [mm]	Limpeza[R\$]	Troca[R\$]
1	150	17.0	26.2
2	200	17.0	27.8
3	250	17.0	34.1
4	300	17.0	41.4
5	350	18.2	50.2
6	400	19.8	58.5
7	450	21.6	66.2
8	500	23.5	76.8
9	600	30.1	109.2
10	750	41.3	142.5

(3) **Eliminação de Vazamentos nos Nós**

Os nós modelam o escoamento através de orifícios ou bocais com descarga direta para a atmosfera. Em Boian et al. (2019), é explicado que vazamentos maiores são esperados em pontos onde há maior pressão e consumo. Por isso, a modelagem é feita em função da pressão no nó. Em orifícios pequenos, a lei de vazão é dada por

$$Q_L = \varepsilon \cdot H^y \quad (7)$$

onde $Q_L[m^3/s]$ é a vazão no orifício, $\varepsilon[m^3/s/m^{0.5}]$ é o coeficiente de emissão, $H[m]$ é a pressão no orifício e y é o expoente de emissão adimensional. Os termos ε e y estão sujeitos à calibração.

Ao remover o vazamento em um único nó da rede, o coeficiente de emissão ε é anulado para este nó e, conseqüentemente, a vazão de água perdida no orifício, dada por $Q_L[m^3/s]$, também se anula. Desta maneira, quando é eliminado um vazamento, há redução da perda de carga. Quanto menor o número de vazamentos na rede, menores serão as perdas de carga observadas. Assim, para que seja eliminado o vazamento de cada nó, o coeficiente de emissão precisa

ser anulado. Assume-se o coeficiente de emissão no nó sem vazamento como $\varepsilon = 0$.

A pressão no nó é calculada no EPANET por um modelo hidráulico que se baseia na elevação do nó, $z[m]$, e na demanda base do nó, $d[m^3/s]$ (Nasrollahi et al., 2021). O custo de reparo de vazamentos, C_v , foi ajustado considerando as variáveis d e z . A equação para reparo de vazamentos, C_v , foi formulada para obter o mesmo patamar de valores, quando comparada aos outros valores de reparação da rede (limpeza ou troca de tubulações), e é dada por

$$C_v = (0.5 \cdot \sqrt{80 - z + d}) \cdot 5000. \quad (8)$$

3. SOLUÇÃO PROPOSTA

Inicialmente, define-se uma curva de padrão de demanda, que descreve o comportamento do consumo de água na rede durante 24 horas de operação através da ponderação da demanda média por fatores multiplicadores a cada hora (Tsubiya, 2004). Os multiplicadores são uma porcentagem da demanda média do dia e representam o comportamento de consumo de água na rede. Com eles previamente estabelecidos, os dados de entrada do vetor de multiplicadores podem ser visualizados na Figura 2.

Multiplicadores = [0.9823, 0.9862, 0.9892, 0.9817, 0.9158, 0.7282, 0.6599, 0.7039, 0.6312, 0.5821, 0.6090, 1.0921, 1.1540, 1.1863, 1.2984, 1.3525, 1.2977, 1.1972, 1.1463, 1.1335, 1.0926, 1.1073, 1.1226, 1.0499]

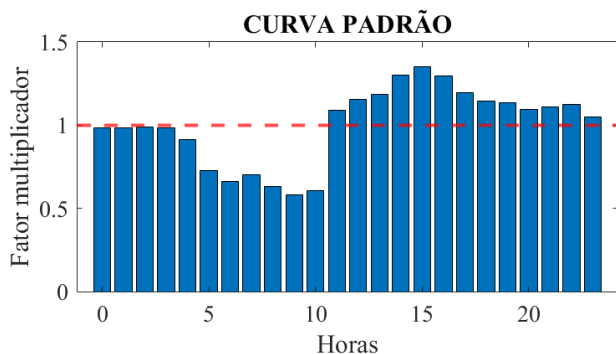


Figura 2. Curva Padrão de Demanda e Multiplicadores.

Antes de aplicar a técnica PSO para a otimização da rede, o algoritmo primeiro realiza a divisão das tubulações em dois grandes grupos: tubos sujos e tubos limpos. Os dois grupos de tubos terão lógicas e tratamentos diferenciados, já que no grupo de tubos sujos é possível trocar ou limpar a tubulação e, no outro grupo de tubos, só será possível trocá-la. Para limpar a tubulação, o único parâmetro ajustado é μ (coeficiente de Hazen-Williams) e, obviamente, não é desejável que o algoritmo execute a limpeza de tubulações que já estão limpas. Portanto, considera-se que se a tubulação possui parâmetro μ maior ou igual a 120 (valor máximo para este parâmetro após a limpeza), o tubo será classificado como limpo e não haverá para este a opção de limpeza. As tubulações chamadas, no algoritmo, de **TubosOutros** são, portanto, os tubos considerados limpos.

Assim, o algoritmo começa por organizar os dados da rede antes de executar a otimização.

Para executar o tratamento dos vazamentos nos nós, a lógica segue uma composição binária. Ao executar a otimização, o valor um indicará que o vazamento no nó será consertado e, neste caso, estes nós terão o valor do coeficiente de emissão ajustado para zero ($\varepsilon = 0$), indicando que o vazamento foi sanado ($Q_L = 0$) e terão um custo associado igual a C_v . Nós que não forem indicados para o conserto do vazamento, sendo atribuídos a eles o valor zero, permanecerão com o valor original de $\varepsilon = 0.5$. Quando ε for não nulo, indicará que ainda há vazamento no nó ($Q_L \neq 0$).

O esquemático da Figura 3 e o pseudo-código da função representada pelo Algoritmo 1 mostram a divisão da rede de distribuição de água conforme descrito anteriormente.

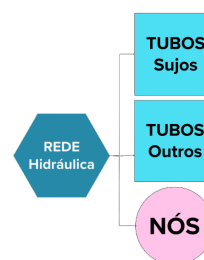


Figura 3. Esquemático de desenvolvimento e análise da rede Hidráulica.

Algoritmo 1 Função Divisão Tubos

τ // número total de tubos na rede
 μ [] // vetor com coef. rugosidade dos tubos
 i // índice dos tubos

Entrada: τ, μ []

Saída : TubosSujos[], TubosOutros[]

$s \leftarrow 1$ // índice TubosSujos
 $k \leftarrow 1$ // índice TubosOutros

```

for ( $i \leftarrow 1$  to  $\tau$ ) do
    if ( $\mu(i) < 120$ ) then
        TubosSujos( $s$ )  $\leftarrow i$ 
         $s \leftarrow s + 1$ 
    else if ( $\mu(i) \geq 120$ ) then
        TubosOutros( $k$ )  $\leftarrow i$ 
         $k \leftarrow k + 1$ 
    end
end
    
```

end

retorna TubosSujos[], TubosOutros[]

O software de linguagem aberta EPANET-MATLAB Toolkit (Eliades et al., 2016) é usado para calcular as pressões nos nós e realizar as análises hidráulicas. A análise é feita com todos os dados da rede original, os quais são preservados para posterior comparação com a rede que sofreu modificações devido às melhorias de conserto de vazamentos, troca e limpeza de tubulações.

A função de custo que se deseja minimizar é dada por

$$\min_{D, \mu, \varepsilon} (C_{total} + P_{m\u00e9dia}) \quad (9)$$

s.a.

$$0 < C_{total} < 2.000.000;$$

$$0 < P_j < 10;$$

sendo o di\u00e2metro dos tubos, D , o coeficiente de Hazen-Willian, μ , e o coeficiente de emiss\u00e3o, ε , as vari\u00e1veis de decis\u00e3o do problema de otimiza\u00e7\u00e3o. O custo total e a press\u00e3o m\u00e9dia s\u00e3o calculados como segue:

$$C_{total} = C_{trocas} + C_{limpezas} + C_{vazamentos} + \chi; \quad (10)$$

$$C_{trocas} = \sum_{i=1}^{\tau} (L_i \cdot C_T(D_n)); \quad (11)$$

$$C_{limpezas} = \sum_{i=1}^{\tau} (L_i \cdot C_L(D_i)); \quad (12)$$

$$C_{vazamentos} = \sum_{j=1}^{\eta} [(0.5 \cdot \sqrt{80 - z_j} + d_j) \cdot 5000]; \quad (13)$$

$$P_{m\u00e9dia} = \frac{(\sum_{j=1}^{\eta} P_j)}{\eta}; \quad (14)$$

onde i \u00e9 o \u00edndice de todos os tubos da rede, j \u00e9 o \u00edndice de todos os n\u00f3s da rede, n \u00e9 o \u00edndice do vetor de di\u00e2metros comerciais dispon\u00edveis, τ \u00e9 o n\u00famero total de tubos na rede, η \u00e9 o n\u00famero total de n\u00f3s na rede, $L_i[m]$ \u00e9 o comprimento do tubo i , $C_T(D_n)$ \u00e9 o custo de troca para o novo di\u00e2metro comercial, $C_L(D_i)$ \u00e9 o custo de limpeza do tubo i , $d_j[m^3/s]$ \u00e9 a demanda base do n\u00f3 j , $z_j[m]$ \u00e9 a cota do n\u00f3 j , P_j \u00e9 a press\u00e3o no n\u00f3 j e $P_{m\u00e9dia}$ \u00e9 a press\u00e3o m\u00e9dia na rede.

O Algoritmo 2 mostra como o problema de otimiza\u00e7\u00e3o (9) \u00e9 implementado usando PSO. Nele, sempre que o PSO optar pela troca da tubula\u00e7\u00e3o, um novo di\u00e2metro \u00e9 escolhido a partir de uma tabela de valores de di\u00e2metros comerciais. A nova tubula\u00e7\u00e3o, quando trocada, n\u00e3o poder\u00e1 ter tubos com o mesmo di\u00e2metro que o original.

4. RESULTADOS

Ap\u00f3s a formula\u00e7\u00e3o do problema de otimiza\u00e7\u00e3o de custos de manuten\u00e7\u00e3o e limpeza de RDA, foi poss\u00edvel obter os resultados na rede apresentada na Figura 1 utilizando, simultaneamente, os softwares EPANET e MATLAB. Desta maneira, analisou-se o comportamento do algoritmo implementado.

O melhor resultado obtido pelo PSO ap\u00f3s as simula\u00e7\u00f5es \u00e9 apresentado nas Tabelas 3, 4 e 5, com a solu\u00e7\u00e3o de toda a rede. Observa-se tamb\u00e9m quais tubos passaram por limpeza, quais foram trocados e em quais n\u00f3s os vazamentos foram consertados. Nota-se que no caso da limpeza, somente o coeficiente μ foi ajustado para 120. Quando se trata de trocar a tubula\u00e7\u00e3o inteira, tanto o di\u00e2metro quanto o coeficiente μ , que passou a ser 130, s\u00e3o modificados conforme previsto no projeto. Por \u00faltimo, o conserto dos vazamentos alterou o coeficiente ε de emiss\u00e3o, que passou de 0.5 para zero. Como p\u00f4de ser visto, em tr\u00eas n\u00f3s o vazamento foi sanado.

Para os tr\u00eas casos previstos na otimiza\u00e7\u00e3o, as Tabelas 3, 4 e 5 mostram o custo relacionado com as melhorias realizadas na rede na seguinte ordem: limpeza da tubula\u00e7\u00e3o, troca da tubula\u00e7\u00e3o e conserto de vazamentos.

Algoritmo 2 Fun\u00e7\u00e3o Objetivo

Entrada: pop[]

Sa\u00edda : CUSTO

```

CUSTO \leftarrow 0 //Custo Projeto
auxLIMPA e auxTROCA \leftarrow zeros[41] //tubos (41)
DA[] e Dn[] //Diametros Atuais e Diametros Comerciais
\delta \leftarrow numeroTubosSujos; \alpha \leftarrow numeroTubosOutros
//Para pop(s)==11 n\u00e3o far\u00e1 nem limpeza nem troca
for (s \leftarrow 1 to \delta) //dentre todos os tubos sujos do
    if pop(s)== 0 //faz a limpeza then
        auxLIMPA(TubosSujos(s)) \leftarrow 1
        \mu(TubosSujos(s)) \leftarrow 120
    else if (pop(s)!=0 e pop(s)!=11) //ou faz a troca then
        if DA(TubosSujos(s))!= Dn(pop(s)) then
            //Troca ocorre para di\u00e2metro diferente do atual
            auxTROCA(TubosSujos(s)) \leftarrow 1
            \mu(TubosSujos(s)) \leftarrow 130
            D(TubosSujos(s)) \leftarrow Dn(pop(s))
        end
    end
end
for (i \leftarrow 1 to \tau) //dentre todos os tubos da rede do
    if (auxLIMPA(i)==1) //calcula custo limpeza then
        CUSTO \leftarrow CUSTO + C_L(D_i) \cdot L(i)
    end
end
for (k \leftarrow 1 to \alpha) //dentre todos os outros tubos do
    if DA(TubosOutros(k))!= Dn(pop(k + \delta)) then
        //Troca ocorre para di\u00e2metro diferente do atual
        auxTROCA(TubosOutros(k)) \leftarrow 1
        \mu(TubosOutros(k)) \leftarrow 130
        D(TubosOutros(k)) \leftarrow Dn(pop(k + \delta))
    end
end
for (i \leftarrow 1 to \tau) //dentre todos os tubos da rede do
    if (auxTROCA(i)==1) //calcula custo troca then
        CUSTO \leftarrow CUSTO + C_T(D_i) \cdot L(i)
    end
end
for (j \leftarrow 1 to \eta) //dentre todos os n\u00f3s da rede do
    if (pop(j+\tau)==1) //calcula custo vazamentos then
        \varepsilon(j) \leftarrow 0.0 //coef. emiss\u00e3o
        C_V = (0.5 \cdot \sqrt{80 - z_j} + d_j) \cdot 5000 //custo vazamento
        CUSTO \leftarrow CUSTO + C_V
    end
end
CUSTO \leftarrow CUSTO + P_{media}
\chi_p \leftarrow 0; \chi_o \leftarrow 0; //penaliza\u00e7\u00f5es press\u00e3o e or\u00e7amento
\lambda_P \leftarrow 100.000.000; \lambda_o \leftarrow 100.000;
for (j \leftarrow 1 to \eta) //dentre todos os n\u00f3s da rede do
    if (P(j) < Pmin) //penaliza press\u00e3o nos n\u00f3s then
        \chi_p \leftarrow \chi_p + \lambda_P \cdot |Pmin - P(j)|
    end
end
CUSTO \leftarrow CUSTO + \chi_p
if (CUSTO > custoMAX) //penal. or\u00e7amento then
    \chi_o \leftarrow \chi_o + \lambda_o \cdot |custoMAX - CUSTO|
end
CUSTO \leftarrow CUSTO + \chi_o
return CUSTO

```

Tabela 3. Limpezas nas tubulações e custos associados (**Limpeza Tubulação).

Limpeza da Tubulação					
Tubo	Diâmetro		Coeficiente μ		Custo[R\$]
	Antes	Depois	Antes	Depois	
2	300	300	70	120**	61200.00
3	400	400	70	120**	71280.00
7	300	300	70	120**	45900.00
25	300	300	70	120**	30600.00
31	300	300	70	120**	30600.00
Custo Total Limpeza Tubos					R\$239.580,00

Tabela 4. Trocas nas tubulações e custos associados (*Troca Tubulação).

Troca da Tubulação					
Tubo	Diâmetro		Coeficiente μ		Custo[R\$]
	Antes	Depois	Antes	Depois	
1	300	500*	120	130*	276.480,00
6	250	150*	120	130*	70.740,00
8	250	600*	120	130*	196.560,00
9	250	350*	120	130*	90.360,00
14	200	350*	120	130*	90.360,00
16	200	150*	120	130*	105.300,00
18	250	150*	120	130*	47.160,00
19	200	300*	120	130*	74.520,00
27	300	500*	120	130*	2.304,00
Custo Total Troca Tubos					R\$953.784,00

Tabela 5. Conserto de Vazamentos.

Conserto dos Vazamentos				
Nó	Coeficiente ε		Custo[R\$]	
	Antes	Depois		
3	0.5	0.0	67.405,64	
8	0.5	0.0	11.3208,29	
9	0.5	0.0	111.083,12	
Custo Total Vazamentos			R\$291.697,05	

Custo Total Projeto: R\$1.485.061,05

Nos resultados de análise de pressão, a pressão média da rede passou de -7.66 m para 33.09 m, indicando uma melhoria global da rede durante as 24h de operação. A Tabela 6 mostra que as alterações na rede garantem o abastecimento dos consumidores ($P > P_{min}$). Observa-se também que as pressões médias nos nós ficaram todas acima dos 10m, conforme condição pré estabelecida pelo projeto. Se antes as pressões eram praticamente todas negativas, após as alterações, elas passaram a ser positivas. O nó com menor pressão média foi o nó 21, que passou de -31.59m para 10.43m.

A Figura 4 apresenta o resultado obtido através das pressões antes e depois das alterações. O valor de pressão mínima pode ser visualizado pela reta azul tracejada. Observa-se que todos os nós da curva obtida depois das alterações hidráulicas ficaram com pressão média acima do valor mínimo (10m) estipulado pelo projeto.

Como no algoritmo foram previstas penalizações para as soluções acima do valor máximo de R\$2.000.000,00, ao final da implementação, foi possível verificar que esse critério foi corretamente atendido, já que o custo total do projeto de otimização foi de R\$1.485.061,05. Logo, o custo do projeto está abaixo do valor máximo.

Tabela 6. Pressão média nos nós antes e depois da otimização.

Nós	Pressão Antes	Pressão Depois
1	73.96	73.95
2	9.99	53.64
3	1.63	40.48
4	-3.82	38.86
5	-17.42	24.69
6	-17.96	24.32
7	-18.09	24.23
8	-16.62	26.50
9	-29.89	10.67
10	-28.72	10.69
11	-27.63	14.70
12	-0.44	38.32
13	10.90	53.54
14	1.34	52.63
15	-4.47	39.88
16	-26.14	15.44
17	-27.59	14.43
18	-2.99	38.22
19	-3.57	39.61
20	-1.67	49.63
21	-31.59	10.43

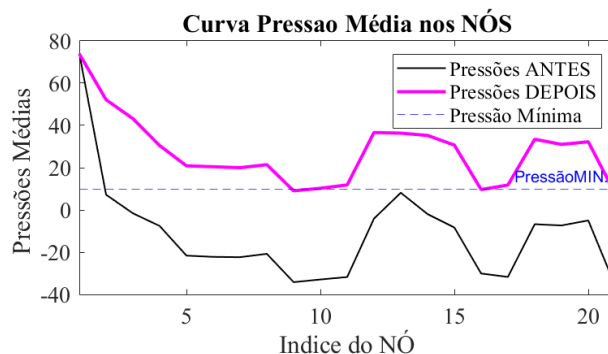


Figura 4. Pressão média nos nós.

Os parâmetros apresentados na Tabela 7 foram calculados pelo Algoritmo 2 e obtidos pelo MATLAB através da biblioteca de referência para o PSO (Particle Swarm Optimization Algorithm, 2022). Observa-se que as penalizações foram nulas ($\chi \approx 0$), o que significa que o melhor resultado encontrado pelo algoritmo do PSO com as penalizações ($CUSTO$) foi igual ao custo total (C_{total}) do projeto sem penalizações (χ_p e χ_o). Além disso, o número de interações (N) foi menor que o número máximo de interações ($N_{max} = 200$) e o algoritmo convergiu para uma solução ótima após 2520 avaliações da função objetivo, gastando para isso 26.86 segundos.

Tabela 7. Parâmetros do Projeto

Parâmetro	Valor
Número de Interações (N)	125
Número de Avaliações feitas pelo algoritmo PSO	2520
Melhor valor do PSO com Penalizações ($CUSTO$)	1.48506e+06
O custo total do projeto (C_{total})	R\$1.48506e+06
O Custo de Penalizações (χ)	-2.32831e-10
O Tempo Total de Processamento (t)	26.862 s

5. CONCLUSÃO

Após a modelagem do problema de otimização de RDAs, foi possível simular e observar os resultados na planta

utilizando simultaneamente os softwares EPANET e MATLAB. Desta maneira, analisou-se o comportamento do PSO na melhoria do desempenho da rede hidráulica. A rede hidráulica otimizada utilizando o algoritmo PSO conseguiu encontrar uma solução que atendia os critérios de pressão mínima e orçamento estipulados.

Por fim, o algoritmo implementado conseguiu obter melhorias na rede e realizou a limpeza e/ou troca de tubulações mais críticas, além do conserto de vazamentos em alguns nós.

Como trabalhos futuros pretende-se reformular o problema utilizando otimização restrita, com intuito de comparar com o problema de otimização apresentado, as restrições serão incluídas na função de custo de forma suave ao invés de penalizações. Além disso, utilizaremos outros métodos de otimização não heurísticos, como programação dinâmica e programação inteira mista.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Alegre, H. and Coelho, S.T. (2012). Infrastructure asset management of urban water systems. *National Civil Engineering Laboratory, Lisbon, Portugal*.
- Barton, N.A., Hallett, S.H., and Jude, S.R. (2021). The challenges of predicting pipe failures in clean water networks: a view from current practice. *Water Supply (2022) 22 (1): 527–541*.
- Basupi, I. and Kapelan, Z. (2015). Flexible water distribution system design under future demand uncertainty. *J. Water Resour. Plann. Manage. 141 (4): 04014067*.
- Boian, R.F., Macedo, D.O., Oliveira, P.J.A.D., and Janzen, J.G. (2019). Comparison between favad and general equations to evaluate the leakage lost flow in urban water distribution systems. *Engenharia Sanitaria e Ambiental, 24,1073-1080*.
- Bonthuys, G.J., van Dijk, M., and Cavazzini, G. (2021). Optimizing the potential impact of energy recovery and pipe replacement on leakage reduction in a medium sized district metered area. *Sustainability, MDPI, 13, 12929*.
- Cantos, W.P. and Juran, I. (2018). Infrastructure aging risk assessment for water distribution systems. *Water Science Technology: Water Supply*.
- D’Ercole, M., Righetti, M., Raspati, G.S., Bertola, P., and Ugarelli, R.M. (2018). Rehabilitation planning of water distribution network through a reliability—based risk assessment. *MDPI Water, 277*.
- Eberhart, R.C., RUSSEL, and KENNEDY, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. *Sixth International Symposium on. IEEE, 1995. 39-43*.
- Eberhart, R.C. and Shi, Y. (2000). Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. La Jolla, CA, USA: IEEE, 2000. 84-88*.
- Eliades, D., Kyriakou, M., Vrachimis, S., and Polycarpou, M. (2016). Epanet-matlab toolkit: An open-source software for interfacing epanet with matlab. *Proc. 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI), The Netherlands, Nov 2016, p.8*.
- Fu, G., Kapelan, Z., Kasprzyk, J., and Reed, P. (2013). Optimal design of water distribution systems using many-objective visual analytics. *J. Water Resour. Plann. Manage. 139 (6): 624–633*.
- Halhal, D., Walters, G.A., Ouazar, D., and Savic, D.A. (1997). Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *J. Water Resour. Plann. Manage. 123 (3): 137–146*.
- Jafar, R., Shahrou, I., and I.Juran (2010). Application of artificial neural networks (ann) to model the failure of urban water mains. *Mathematical and Computer Modelling 51 (9–10), 1170–1180*.
- Kanakoudis, V. and Tolikas, D. (2001). The role of leaks and breaks in water networks: Technical and economical solutions. *J. Water Supply Res. Technol. 2001, 50, 301–311*.
- Kanta, L., Zechman, E., and Brumbelow, K. (2012). Multiobjective evolutionary computation approach for redesigning water distribution systems to provide fire flows. *J. Water Res. Plann. Manage. 138 (2): 144–152*.
- Kim, J.H. and Mays, L.W. (1994). Optimal rehabilitation model for water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage. 120 (5): 674– 692*.
- Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N., and Savic, D. (2018). Lost in optimisation of water distribution systems: a literature review of system design. *Water 10 (307): 1–103*.
- Mazumder, R.K., Salman, A.M., Li, Y., and Yu, X. (2018). Reliability analysis of water distribution systems using physical probabilistic pipe failure method. *J. Water Resour. Plann. Manage., 2019, 145(2): 04018097*.
- McClymont, K., Keedwell, E.C., Savic, D., and Randall-Smith, M. (2014). Automated construction of evolutionary algorithm operators for the bi-objective water distribution network design problem using a genetic programming based hyper-heuristic approach. *J. Hydroinfr. 16 (2): 302–318*.
- Mello, C.R. and Carvalho, J.A. (1998). Análise da equação de perda de carga de hazen-williams, associada aos regimes hidráulicos para tubos de pvc e polietileno de pequeno diâmetro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 2, n. 3, p.247-252*.
- Móller, D.S., Lima, G.M., Brentan, B.M., and Barros, D.B. (2020). Optimal pump selection for variable speed operation in water distribution network. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Brazilian Journal of Water Resources, RBRH 25;*
- Nasrollahi, H., Boroujeni, R.S., Shirmohammadi, R., Nobar, S.N., Aslani, A., Amidpour, M., and Petrakopoulou, F. (2021). Optimization of water pressure of a distribution network within the water–energy nexus. *Applied Sciences, 2021, 11, 8371*.
- Ostfeld, A. (2005). Optimal design and operation of multiquality networks under unsteady conditions. *J. Water Resour. Plann. Manage. 131 (2): 116–124*.
- Particle Swarm Optimization Algorithm (2022). Pso toolbox - matlab. https://www.mathworks.com/help/gads/particle-swarm-optimization-algorithm.html#mw_522b9230-864b-47d1-a0db-1bf6c882d862.

Acessado: 11-08-2022.

- Rossman, L.A. (2000). Epanet 2 user's manual, water supply and water resources division. *National Risk Management Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency, 2000, CINCINNATI, OH 45268, U.S.A.*
- Sarbu, I. (2021). Optimization of urban water distribution networks using deterministic and heuristic techniques: comprehensive review. *American Society of Civil Engineers, ASCE.*
- Swietochowska, M. and Bartkowska, I. (2022). Optimization of energy consumption in the pumping station supplying two zones of the water supply system. *Energies 2022, 15, 310.*
- Tsutiya, M.T. (2004). Abastecimento de água. *Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.*
- Viccione, G., Ingenito, L., Evangelista, S., and Cuozzo, C. (2019). Restructuring a water distribution network through the reactivation of decommissioned water tanks. *American Society of Civil Engineers, ASCWater, 11(9), 1740.*
- Villarroel, R.D., García, D.F., Dávila, M.A., and Caicedo, E.F. (2015). Particle swarm optimization vs genetic algorithm, application and comparison to determine the moisture diffusion coefficients of pressboard transformer insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 22, 6.*
- Walski, T. M., B., E. D., Gessler, J., Goulter, I.C., Jeppson, R.M., Lansey, K., Han-Lin Lee, L.J.C., Mays, L., M., R., D., and Ormsbee, L. (1987). Battle of the network models: epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 113(2), 191-203.*
- Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A., Grayman, W., Beckwith, S., and Koelle, E. (2003). Advanced water distribution modeling and management. *Waterbury, CT: Haestad Press.*
- Wu, W., Simpson, A.R., and Maier, H.R. (2011). Sensitivity of optimal tradeoffs between cost and greenhouse gas emissions for water distribution systems to electricity tariff and generation. *J. Water Resour. Plann. Manage. 138 (2): 182-186.*
- Wu, W., Simpson, A.R., Maier, H.R., and Marchi, A. (2012). Incorporation of variable-speed pumping in multiobjective genetic algorithm optimization of the design of water transmission systems. *J. Water Resour. Plann. Manage. 138 (5): 543-552.*