

ALGORITMOS GENÉTICOS: CALIBRAÇÃO DE MODELOS COMPUTACIONAIS HIDRÁULICOS

Hugo A. M. Moreira ⁽¹⁾ (Hugomarinho93@outlook.com), Heber P. Gomes ⁽²⁾ (Heberp@uol.com.br)

⁽¹⁾⁽²⁾ Universidade Federal da Paraíba (UFPB); Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO: Modelos de simulação computacional são amplamente utilizados na engenharia. As redes de abastecimento de água são modeladas computacionalmente para fornecer dados para operação e projetos. O sucesso do modelo hidráulico está associado com a confiabilidade em representar os sistemas reais com precisão. Assim, a calibração consiste em ajustar os parâmetros dos modelos para que possam ser utilizados na gestão do sistema real. O método de busca heurística, Algoritmo Genético Modificado (AGM), foi implementado para propor soluções mais eficientes e robustas para grandes redes. O AGM foi utilizado na calibração multivariável e multiobjetivo para estimar os parâmetros hidráulicos, que considera duas variáveis dependentes, a pressão dos nós e a vazão dos dutos. Para validar a metodologia, o Sistema Piloto de Distribuição de Água (SPDA) da UFPB foi utilizado. Para demonstrar a viabilidade do método, foi calibrada a rede de irrigação de Balerma/Espanha. O algoritmo de calibração foi baseado na busca ótima local da rugosidade e demanda, alcançando resultados satisfatórios para a calibração dinâmica pela rugosidade (0,015% para a pressão e 2.86e-06% para a vazão) e estática para rugosidade e demanda (1,731% para a pressão e de 0,312% para a vazão). Os resultados mostram a robustez do AGM frente a outros métodos.

PALAVRAS-CHAVE: Abastecimento de água, Sistemas de bombeamento, Controle Inteligente, Eficiência energética.

GENETIC ALGORITHMS: CALIBRATION OF HYDRAULIC COMPUTATIONAL MODELS

ABSTRACT: Computer simulation models are widely used in engineering. Water supply networks are computationally modeled to provide data for operations and projects. The success of the hydraulic model is associated with the reliability in representing real systems accurately. Thus, calibration consists of adjusting the model parameters so that they can be used in the management of the real system. The heuristic search method, Modified Genetic Algorithm (AGM), was implemented to propose more efficient and robust solutions for large networks. The AGM was used in multivariable and multiobjective calibration to estimate the hydraulic parameters, which considers two dependent variables, the node pressure and the pipeline flow. To validate the methodology, the UFPB Pilot Water Distribution System (SPDA) was used. To demonstrate the feasibility of the method, the Balerma/Spain irrigation network was calibrated. The calibration algorithm was based on the local optimal search for roughness and demand, achieving satisfactory results for dynamic calibration for roughness (0.015% for pressure and 2.86e-06% for flow) and static calibration for roughness and demand (1.731% for pressure and 0.312% for flow). The results show the robustness of AGM compared to other methods.

KEYWORDS: Water supply, Pumping system, Intelligent control, Energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) são o conjunto de equipamentos, obras e serviços voltados para o suprimento de água para fins de consumo doméstico, industrial e público. A concepção e o dimensionamento desses sistemas ocorrem de forma integrada, e requer o emprego de uma equipe de profissionais especializados (Gao, 2017; Meirelles *et al.*, 2017; Gomes, 2019). Apesar de amplamente estudados, os SAA apresentam não-linearidades que dificultam o projeto, análise e operação, principalmente, devido às suas dimensões e número de componentes. Os SAA consomem 3% da energia mundial, sendo 90% desse montante consumido nos sistemas de bombeamento (Gomes, 2019; Moreira *et al.*, 2020; Gonçalves *et al.*, 2021). Concomitante, dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023) mostram que o crescimento do consumo elétrico no Brasil é maior que a taxa de crescimento do Produto Interno Bruto. Há, ainda, a baixa qualidade na distribuição de água associada aos desperdícios, provocados por grandes e pequenos vazamentos, muitas vezes imperceptíveis visualmente. Segundo o Instituto Trata Brasil (2024), mais de 40% da água se perde entre a estação de tratamento e o consumidor, acarretando um prejuízo de R\$ 25 bilhões/ano. Esses aspectos ressaltam a necessidade do desenvolvimento de tecnologias para aumentar a eficiência energética e operacional.

Para a operação otimizada e a redução dos custos, o bom projeto de um SAA é essencial, pois 70% do custo é devido à rede de tubulações do sistema (Boczar *et al.*, 2017; Gomes, 2019). Uma rede de abastecimento é projetada para atender determinada demanda por um período. Contudo, seus parâmetros hidráulicos são alterados com o decorrer do tempo (ex.: rugosidade e diâmetro das tubulações, vazamentos, consumo nodal, perda de carga localizada etc.), impactando na precisão dos modelos hidráulicos inicialmente projetados. A solução é a calibração do modelo hidráulico com os dados experimentais aferidos em campo (Do *et al.*, 2016; Moghaddam *et al.*, 2020, Zhao *et al.*, 2022). A calibração dos parâmetros do modelo é fundamental para obter informações confiáveis do comportamento do sistema, produzindo dados que se aproximem satisfatoriamente dos valores observados no sistema real. O modelo hidráulico calibrado auxilia na análise, projeto e gestão de um sistema de abastecimento e fornece informações para que sejam realizadas intervenções na rede.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos explorando as funcionalidades do EPANET – simulador hidráulico – para calibrar, simular e testar métodos convencionais de controle (Georgescu *et al.*, 2014; Georgescu *et al.*, 2015; Dunca *et al.*, 2017). Contudo, o EPANET possui limitações por não realizar calibração multivariável e multiobjetivo. Além disso, utiliza simples algoritmos de otimização. Como solução, diversos pesquisadores desenvolveram calibradores hidráulicos baseados em Algoritmo genéticos (AG) e utilizaram o EPANET como simulador (Silva, 2003; Neves, 2007; Salvino *et al.*, 2015; Boczar *et al.*, 2017; Chandramouli, 2018, Zhao *et al.*, 2022).

A busca por algoritmos de otimização robustos tornou o uso complexo. Recentemente, uma metodologia focada na simplicidade do algoritmo *Sequential Least Squares Programming* (SLSQP) em comparação com a Evolução Diferencial (DE) foi implementada (Zhao *et al.*, 2022). Tendo resultados comparáveis, contudo, o custo computacional do SLSQP é até 10 vezes menor. Foi calibrada uma rede urbana real (Victoria, Australia) e realizado um estudo nas variáveis de decisão do problema de calibração em quatro cenários diferentes para caracterizar o espaço de busca do algoritmo. O método da perda de carga com os mínimos quadrados foi implementado para estimar a rugosidade de tubulações (Gao, 2017). A justificativa para adotar o método está na dificuldade de mensurar dados das demandas ou da pressão nodais sem ruídos. Há, também, a utilização da fenomenologia física e formulações matemáticas para calibrar redes de abastecimento (Berardi e Giustolisi, 2021) para identificar vazamentos. Apesar de ter perdido espaço para os métodos computacionais, os autores alcançaram bons resultados, sendo a metodologia escalável para redes urbanas. Contudo, é relevante a habilidade matemática do projetista e o tempo disponível para o método.

Para contornar o custo computacional e a complexidade matemática, algoritmos metaheurísticos, como os Evolutivos (EAs), têm sido aplicados na calibração de modelos de SAA (Savic *et al.*, 2019). Os EAs têm um bom desempenho na resolução de problemas complexos com muitas variáveis de decisão e restrições (Maier *et al.*, 2014). No entanto, a principal limitação está relacionada ao alto custo computacional, especialmente para problemas de otimização maiores, como a calibração de grandes SAA (Zhang *et al.*, 2018), pois a otimização envolve a resolução de equações hidráulicas não-lineares (Zecchin *et al.*, 2007).

O AGM foi implementado para reduzir o erro admissível, o custo computacional e fornecer uma calibração mais robusta. Principalmente na busca por um método que reduza o erro observado e o custo computacional na calibração de grandes modelos hidráulicos, em contra ponto com Zhao *et al.* (2022) e Meireles *et al.* (2017).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de calibração hidráulica reduz o erro entre o sistema real e o modelo computacional. O erro é representado pela Função Objetivo (FO), que pode assumir várias formas. Comumente é representada pelo quadrado das diferenças entre os valores de pressão e vazão simulados e experimentais (Eq. (1)). Os parâmetros podem ser multiplicados por pesos, que variam em consequência da literatura e de como o projetista considera a influência da pressão e vazão na calibração de uma rede. A minimização da FO ocorre por métodos de otimização.

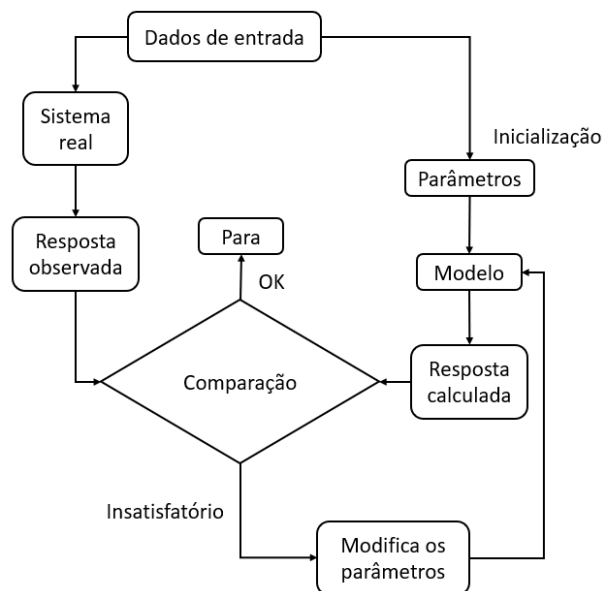
$$E(p) = \sum_{t=1}^L [u_t^{\text{modelo}}(p) - u_t^{\text{obs}}(p)]^2 \quad (1)$$

em que p corresponde ao parâmetro considerado (pressão, vazão etc.), u_t^{modelo} e u_t^{obs} correspondem, respectivamente, aos dados modelados e experimentais, e L é o instante de tempo da simulação. Efetua-se o cálculo para diferentes instantes de tempo e para diferentes nós ou trechos da rede, desde que existam dados de medição para comparação. Para calcular o desvio entre o modelo e o sistema experimental adotou-se a Eq. (2). Ela considera a atribuição de pesos para cada variável, de forma a privilegiar um objetivo em detrimento de outro ou equalizar ambos.

$$\min f(x) = \alpha \sum_{j=1}^J (OP_j - PP_j)^2 + \beta \sum_{p=1}^P (OQ_p - PQ_p)^2 \quad (2)$$

em que, OP_j e PP_j são as pressões observadas e previstas no nó j ; OQ_p e PQ_p são as vazões observadas e previstas no tubo p ; α e β são pesos normalizadores e que são usados para compatibilizar as ordens de grandezas das variáveis. O fluxograma da metodologia (Figura 1) está consolidado (Zhao *et al.*, 2022, Moghaddam *et al.*, 2020). Os parâmetros introduzidos são atualizados através do modelo de simulação e do algoritmo de otimização, o qual retorna as variáveis de estado obtidas no modelo (i.e. rugosidade, demanda nodal, nível dos tanques e qualidade da água) ajustados, aplica-se em seguida a FO para contabilizar o sucesso do modelo computacional calibrado.

FIGURA 1. Algoritmo básico de calibração hidráulica.



Grau de liberdade é a diferença entre a quantidade de variáveis calibráveis e os dados experimentais disponíveis. É comum que a quantidade de variáveis calibradas seja mais de 20x maior que a quantidade de variáveis monitoradas. O grau de liberdade dos problemas de calibração é, significativamente, elevado. O objetivo é construir um modelo de calibração robusto para lidar com

redes hidráulicas complexas e poucos pontos de medição em campo. Para aumentar a probabilidade de sucesso, a experiência do projetista é essencial na escolha dos melhores pontos de medição (Zanfei *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2022). Os parâmetros de maiores sensibilidades são as pressões nodais e os fluxos, principalmente, para calibração da rugosidade e demanda (Kang e Lansey, 2011).

2.1 Algoritmos Genéticos Modificado (AGM)

O AG é baseado no conceito de evolução natural observado na natureza, proporcionando a competitividade dos indivíduos mais bem sucedidos ou com melhores valores de aptidão e a propagação de suas boas características, resultando em indivíduos mais aptos. Por seleção natural são escolhidos os indivíduos com melhor aptidão os quais sofrem ação dos operadores genéticos: seleção, mutação e cruzamento. O AG modificado (AGM) para multivariáveis é considerado um método de “busca cega”, codificada, múltipla e aleatória e não apresentam muitas restrições acerca dos limites computacionais, sendo muito eficientes na busca de soluções ótimas (busca heurística). A implementação pode ser descrita esquematicamente abaixo:

- Operadores genéticos: escolha dos parâmetros de probabilidades de recombinação, mutação e tamanho da população;
- Espaço de busca: seleção do tipo de representação dos grupos de variáveis de decisão que definem completamente as soluções, cujos valores se pretende determinar;
- População Inicial: geração de uma população inicial de soluções alternativas aleatórias;
- Aptidão: método de avaliação das soluções, chamado de função objetivo ou de aptidão; e
- Cruzamento e mutação: especificação dos operadores genéticos para a realização dos mecanismos de seleção, recombinação e mutação.

2.2 Metodologia experimental de validação

A validação do algoritmo consistiu em calibrar uma rede experimental e analisar a compatibilidade dos resultados. Para a validação do modelo de calibração foi utilizado o Sistema Piloto de Distribuição de Água desenvolvido no Laboratório de Eficiência Energética em Hidráulica na Universidade Federal da Paraíba (SPDA / LENHS / UFPB) (Figura 2). O sistema é composto por um conjunto motor bomba (CMB) de 5 CV, que impulsiona a água do reservatório para a rede de abastecimento. Através da configuração dos registros, até três bombas podem operar simultaneamente alimentando a rede hidráulica com bombeamento direto e indireto. A rede hidráulica tem 129m de extensão. A vazão e a pressão nominais são, respectivamente, 50 m³/h e 17 metro de coluna de água (mca). O sistema supervisor permite o monitoramento e rastreamento

das informações do SPDA. Os dados são coletados por sensores e tratados, analisados e armazenados. O supervisório fornece informações necessárias ao gerenciamento remoto de todo processo hidráulico e elétrico. Nele são concentradas todas as informações sobre os reservatórios e componentes (válvulas, conversores de frequência, transdutores etc.), para monitorar as variáveis de pressão, vazão, amperagem dos motores, voltagens, níveis de água nos reservatórios e consumo dos nós. Os transdutores e medidores de vazão possibilitam a medição de grandezas através de sinais analógicos de 4 a 20 mA e de uma rede remota RS485. O sistema de supervisão permite o acionamento das bombas e das Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) por comandos remotos.

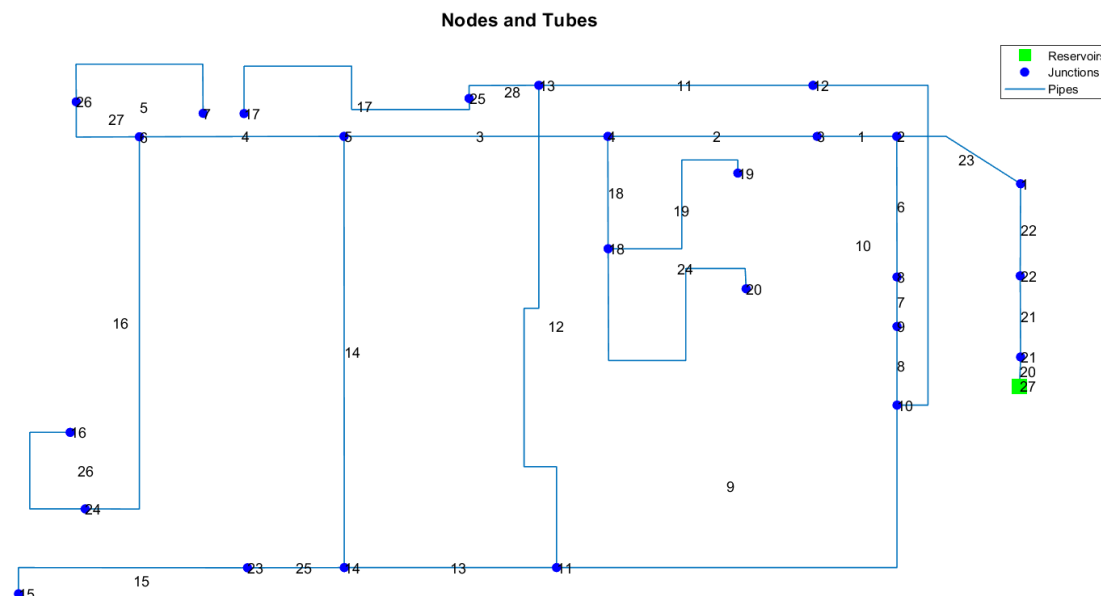
FIGURA 2. Imagem panorâmica do sistema experimental (SPDA).



O SPDA é instrumentado com sensores de pressão e vazão. E conta com válvulas eletrônicas que facilitam a implementação de diversas rotinas de simulação. Inclusive, permite simular padrões de demandas de acordo com os hábitos do consumidor. Extremamente relevante para verificar os resultados da calibração realizada. O SPDA foi modelado no EPANET (Figura 3), que funciona como simulador, e analisado hidraulicamente utilizando a rotina de programação.

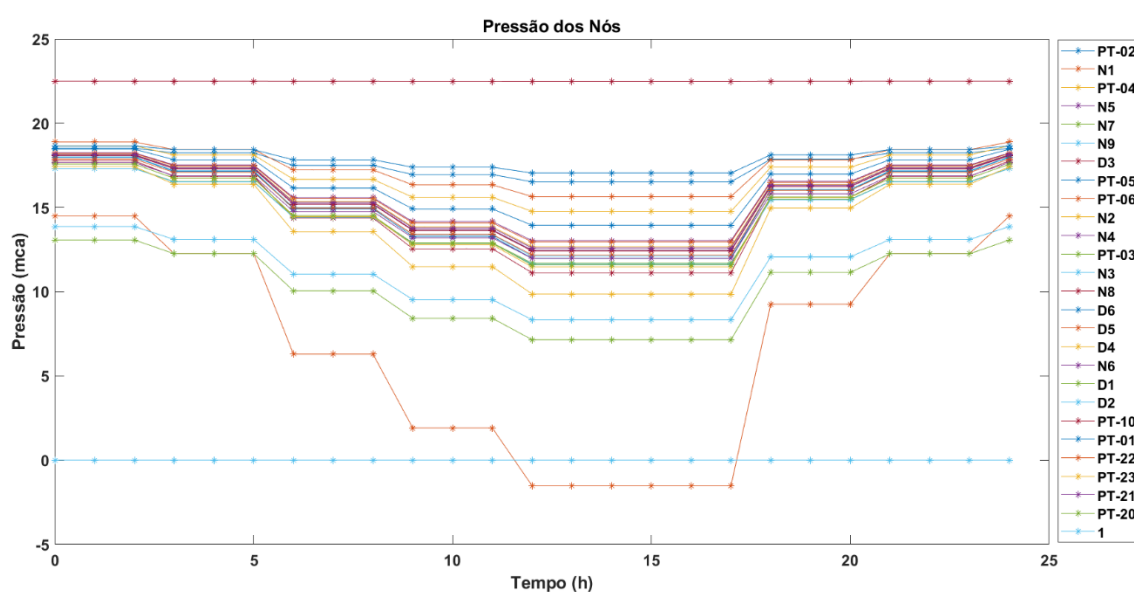
A análise hidráulica revela flutuações de pressão e vazão em função da demanda horária (Figura 4). A análise apresenta sinais de normalidade para um típico SAA. Principalmente, porque não há implementação de controle de pressão por meio da automação dos CMB ou VRPs.

FIGURA 3. Rede hidráulica SPDA ilustrando os valores simulados dos Nós e Trechos da rede.



Após a calibração, é altamente recomendável verificar a precisão por meio de um processo de validação do modelo, comparando os resultados modelados com dados observados em campo de um período de tempo diferente (Walski, 2017). Portanto, é altamente recomendável coletar dados de calibração e validação durante períodos com demandas de pico (Zhang *et al.*, 2018 e Walski, 2017), quando a perda de carga é considerada mais sensível à variação nos valores de rugosidade dos tubos.

FIGURA 4. Análise hidráulica das pressões (a) e vazões (b) do SPDA com variação da demanda proposta por Gomes (2019).



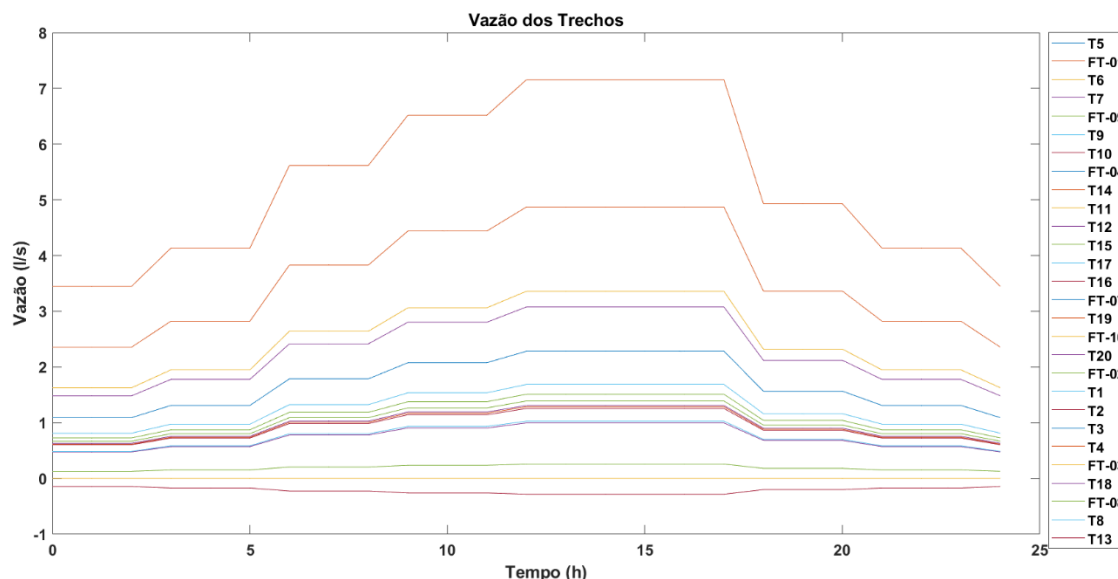
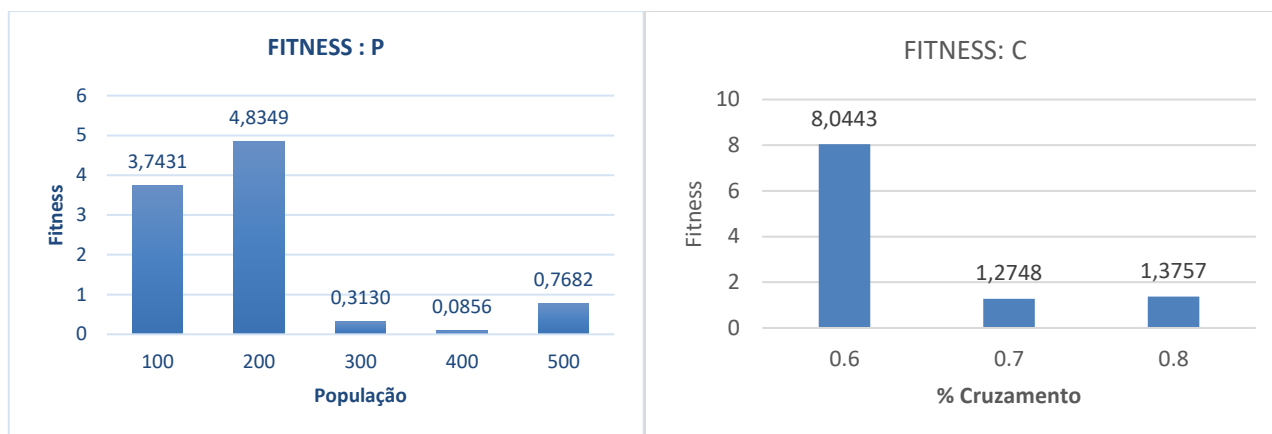


FIGURA 5. Análise de sensibilidade dos parâmetros do AGM para População (a) e Cruzamento (b).

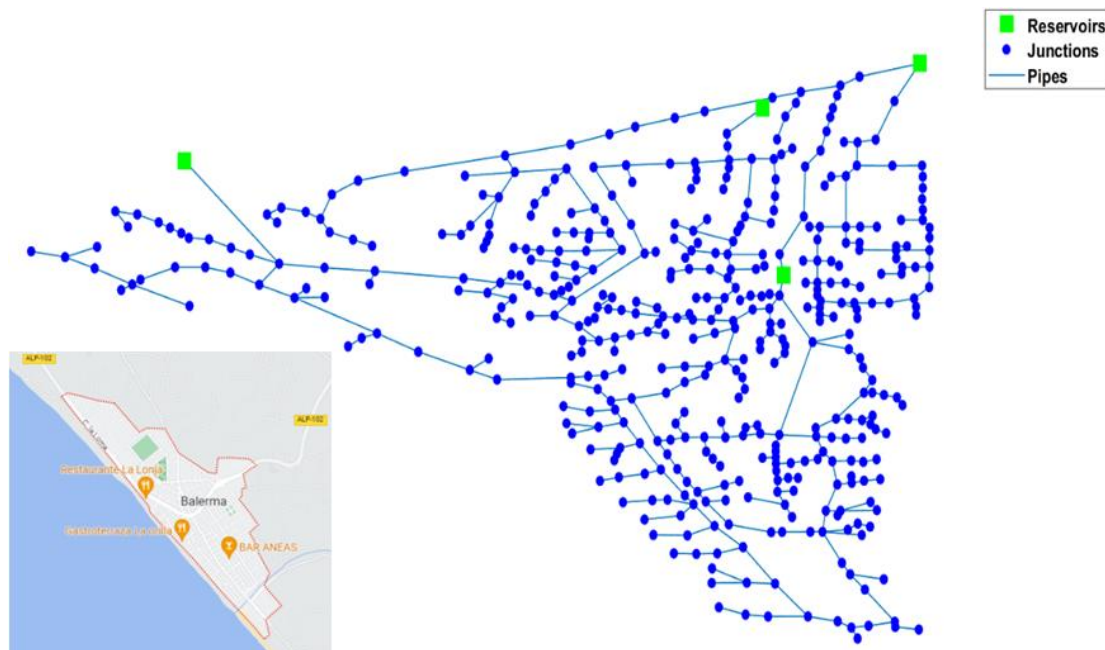


2.3 Estudo de caso: Balerna

O sistema é uma adaptação de uma rede de irrigação existente no distrito de irrigação Sol-Poniente, localizado em Balerna, na província de Almería (Espanha). Foi apresentado por Reca e Martinez (2006). A rede é abastecida com água de quatro reservatórios. A demanda média anual é de 25,2 MGD. Bi *et al.* (2015) incorporando o conhecimento do domínio em um modelo de algoritmo genético para esta rede.

Há um modelo hidráulico EPANET não calibrado disponível para o sistema, que será calibrado utilizando dados experimentais de Bi *et al.* (2015) e o algoritmo AGM. O modelo do EPANET tem 447 nós e 454 tubulações, e apresenta aproximadamente 100,262 Km de redes hidráulicas (Figura 6). O estudo de caso testa a viabilidade do algoritmo AGM. Foi realizada a calibração dos parâmetros hidráulicos da rede utilizando como variável a rugosidade.

FIGURA 6. Rede hidráulica de Balerna ilustrando os valores simulados dos Nós e Trechos.



3. RESULTADOS

Nesta seção, os resultados da calibração multivariável com AGM são avaliados e discutidos, sempre comparando-o com o método AG e com os dados experimentais obtidos do SPDA e Balerna.

3.1 SPDA

Foram conduzidas análises de sensibilidade de três parâmetros em cada algoritmo (AGM e AG). Para fazer uma comparação justa dos resultados entre diferentes métodos de otimização, o mesmo critério de parada (convergência) foi utilizado, o qual é a FO (Eq. 2). Assim, o critério de parada ocorrerá quando $f(x) < 10^{-1}$. Os parâmetros do AGM foram obtidos com análises de parametrização, que considerou os parâmetros que forneceram os melhores resultados nas calibrações (Tabela 1). O AGM é um método de busca heurística, assim, foram realizadas 10 calibrações para cada análise e uma média estatística foi obtida para calcular o desvio padrão dos resultados.

A implementação do AGM produziu resultados significativos, com erros relativos médios de 0,015% para a pressão e 2.86e-06% para a vazão (Figura 7 e 9). Além disso, as correlações de pressão e vazão mostram-se com bons ajustes e sem distúrbios pontuais (Figura 8 e 10), realçando a homogeneização dos resultados para todas as variáveis calibradas. Ademais, a convergência da otimização ocorreu de forma gradual e com boa velocidade (Figura 9). Os resultados foram alcançados com um reduzido custo computacional (2,88h), duas vezes menor que o custo do AG.

TABELA 1. Parâmetros selecionados para o AGM.

Parâmetros	Variação dos parâmetros	Melhores parâmetros
Gerações	10 - 100	50
População	100 - 500	400
Cruzamento	0,6 – 0,8	0,7

FIGURA 7. Comparação entre os valores de pressão e vazão obtidos na calibração AGM e os valores de pressão experimental em função dos nós de referência.

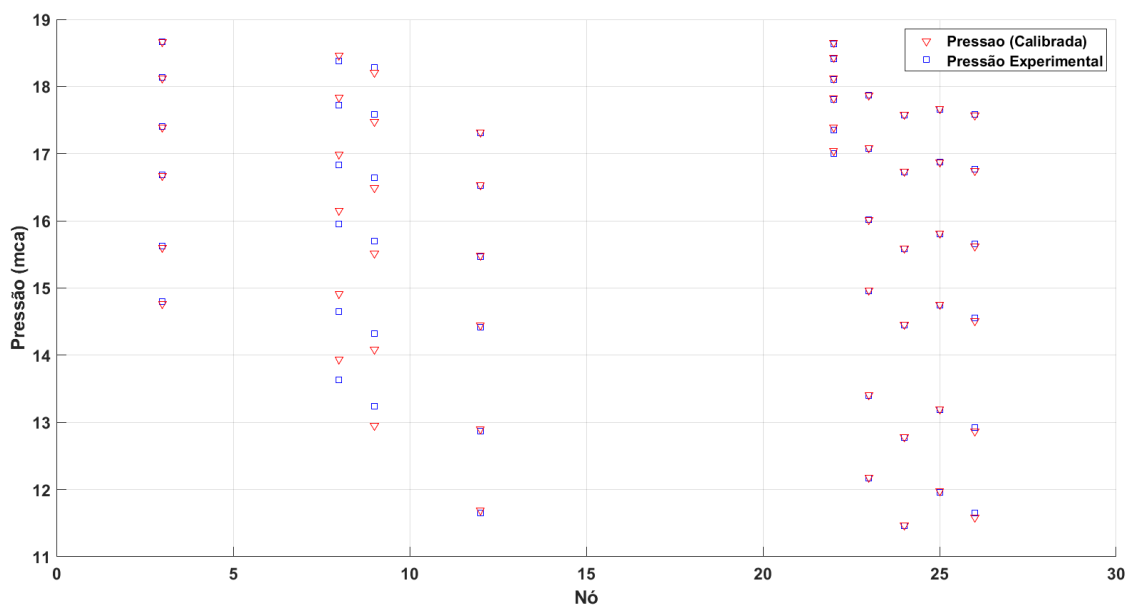


FIGURA 8. Correlação dos valores de pressão AGM.

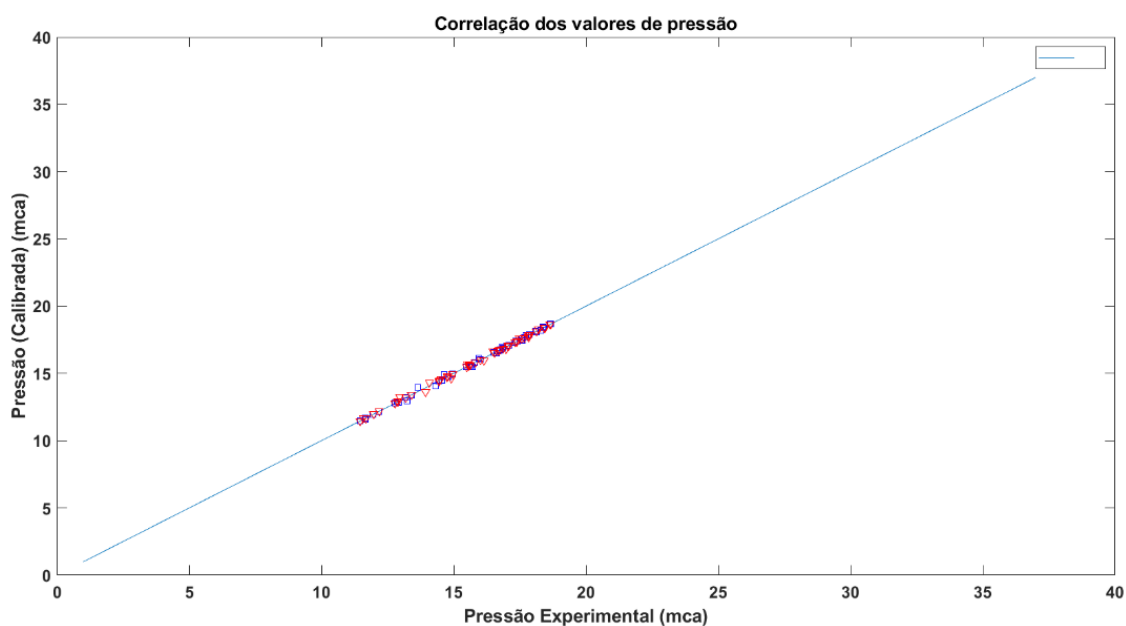


FIGURA 9. Comparação entre os valores de vazão obtidos na calibração AGM e os valores de vazão experimentais em função dos trechos de referência.

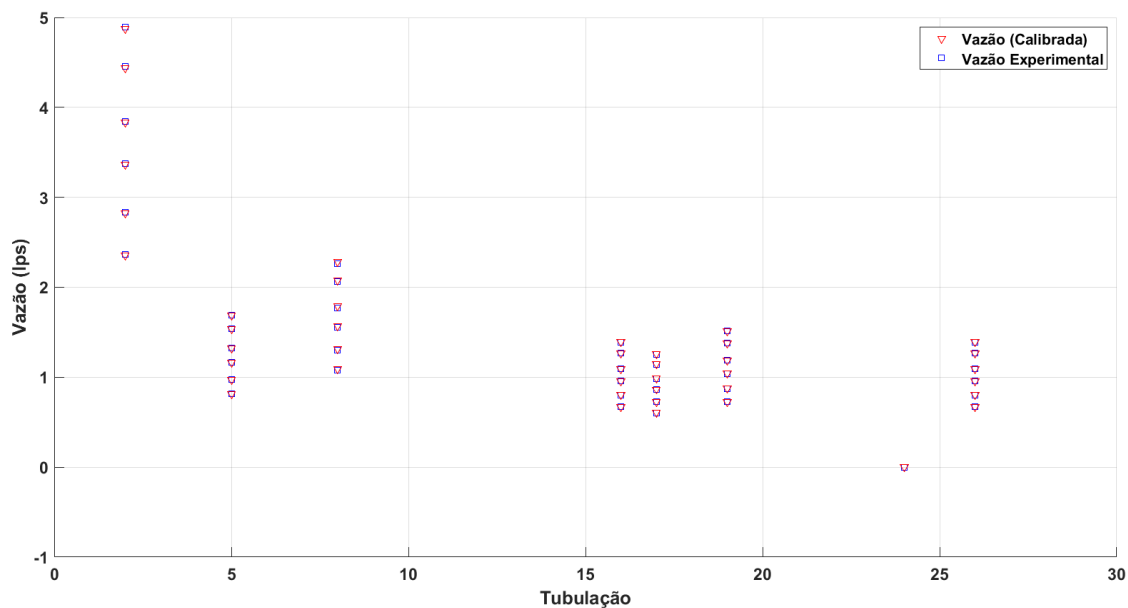


FIGURA 10. Correlação dos valores de vazão AGM.

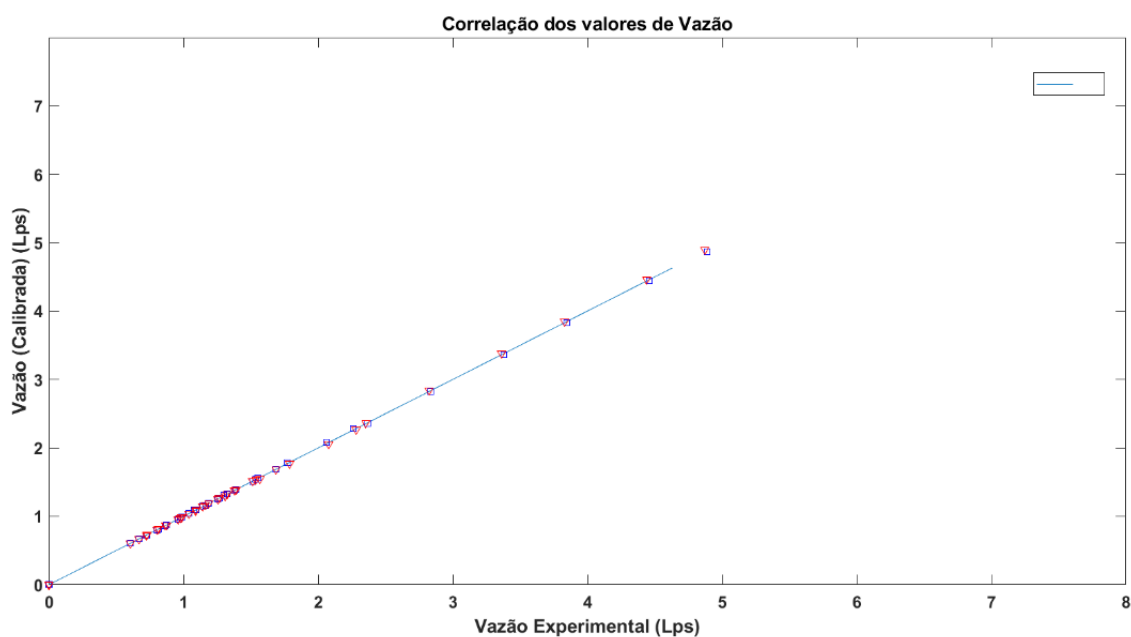
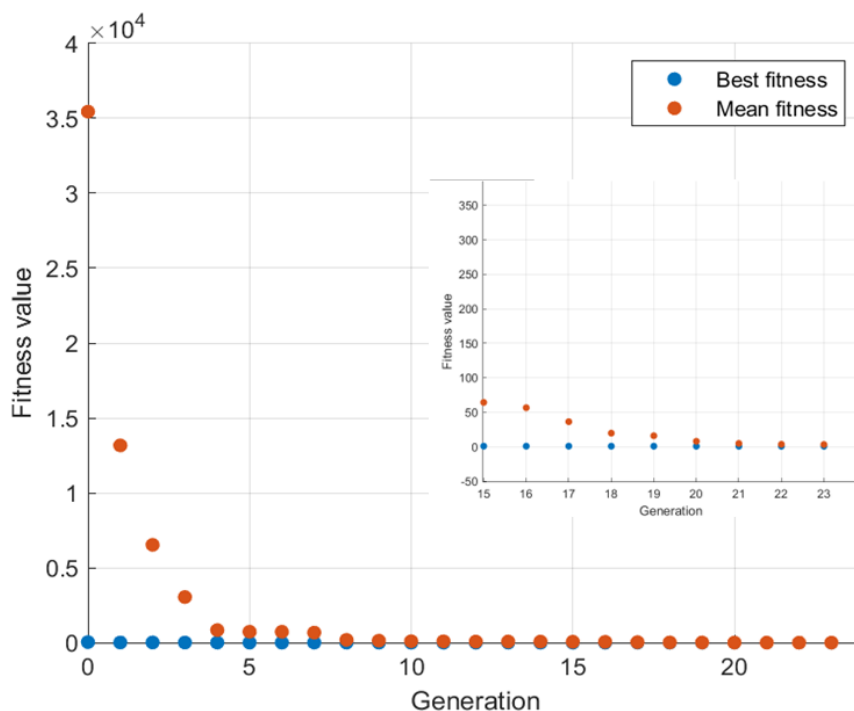


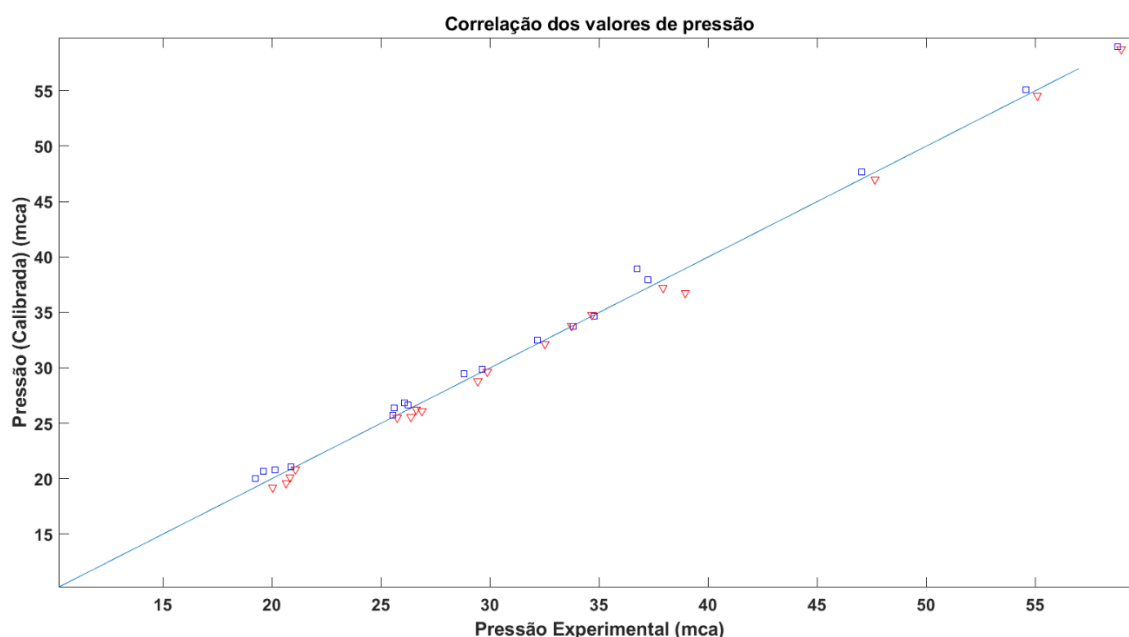
FIGURA 11. Convergência da função objetivo AGM.



3.1.1 Calibração Multivariável Multiobjetivo

Buscando explorar a capacidade do algoritmo de otimização, foi realizada a calibração considerando como variáveis a Rugosidade dos trechos e a Demanda dos nós. Os valores dos parâmetros do AGM foram obtidos com estudos e análises de parametrização iguais a da calibração anterior. Os resultados ressaltam a capacidade de calibração multivariável e multiobjetivo do AGM.

FIGURA 12. Correlações dos valores de pressão (a) e vazão (b) da calibração AGM.



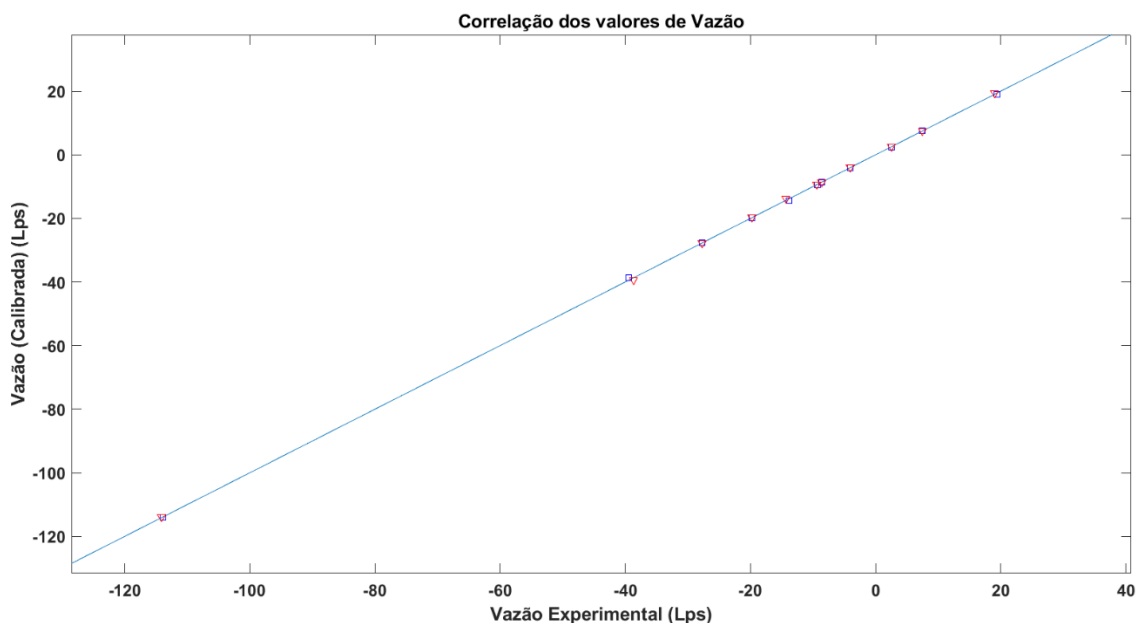
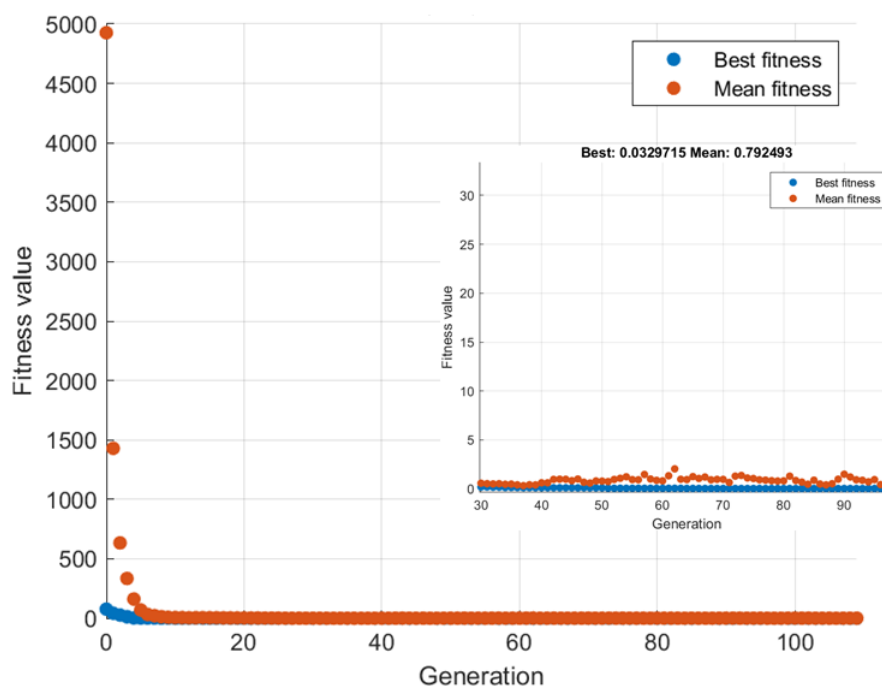


FIGURA 13. Convergência da função objetivo na calibração com AGM.



3.2 Balerma

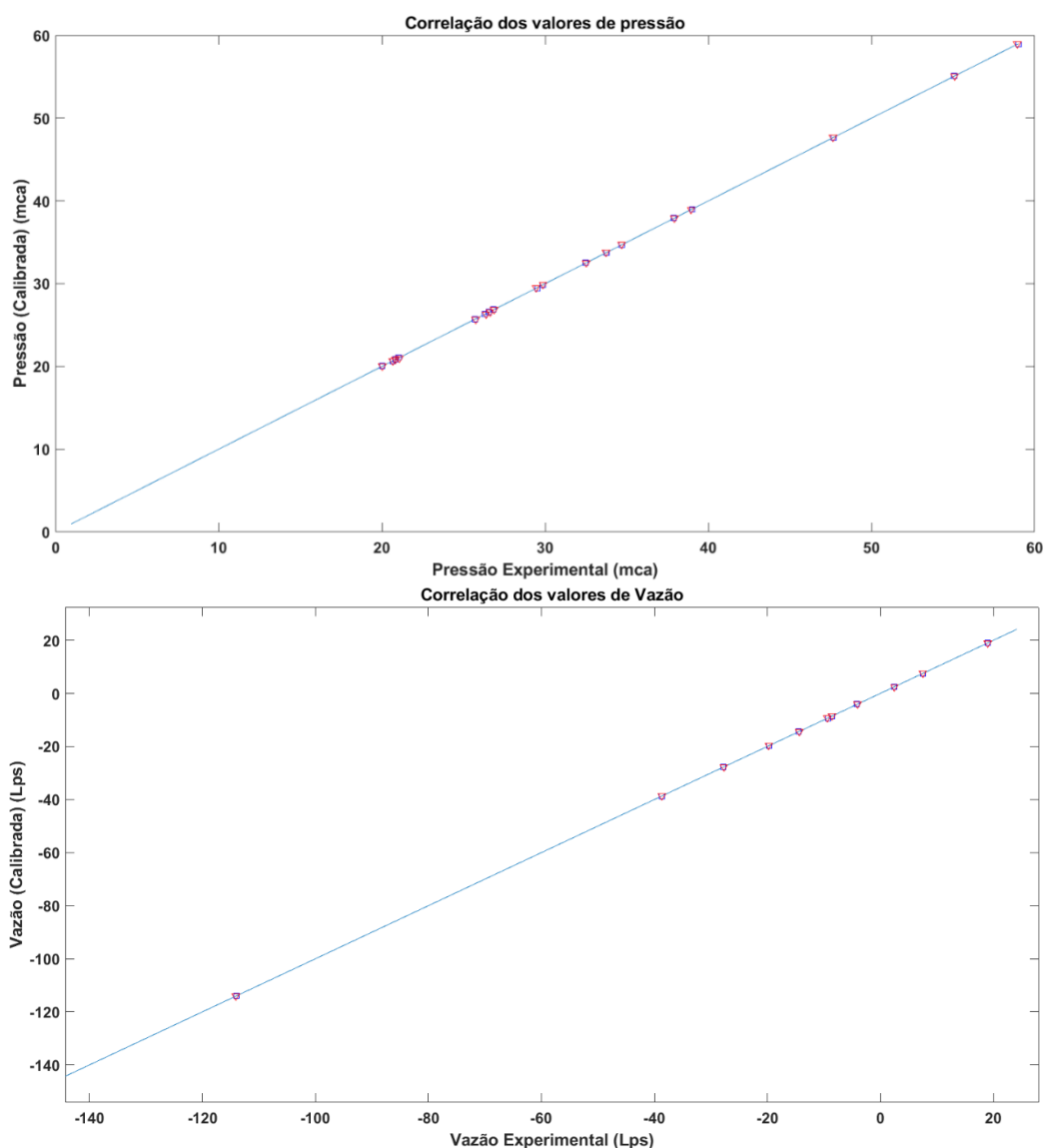
Os valores dos parâmetros do AGM foram testados por meio de estudos e análises de parametrização com metodologia semelhante aos casos anteriores (Tabela 2). A rugosidade de cada trecho e a demanda de cada nó representam uma variável cada, ou seja, cada um são graus de liberdade do problema de otimização. Desta forma, na rede de Balerma existem 447 variáveis ou graus de liberdade aplicáveis aos nós e 454 variáveis

aplicadas aos trechos. Desta forma, ao utilizar 18 pontos para a coleta de dados de pressão e 18 trechos para a coleta dos dados de vazão, o problema de otimização possui um alto grau de liberdade. Mesmo assim, os resultados da calibração mostraram que o AGM pode calibrar grandes redes urbanas (Figura 13 e 14).

TABELA 2. Parâmetros selecionados para o AGM.

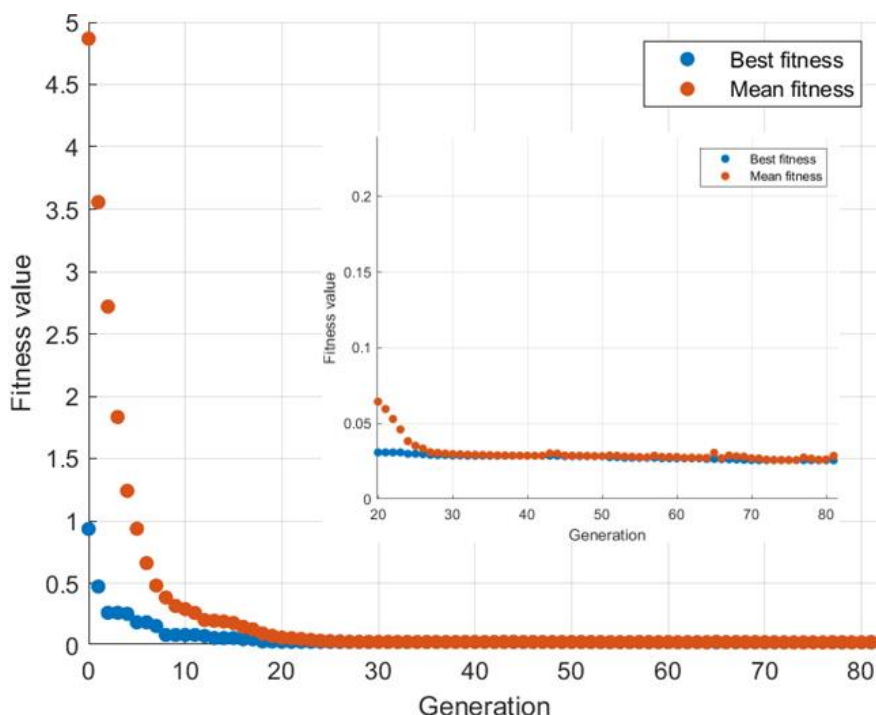
Parâmetros	Variação dos parâmetros	Melhores parâmetros
Gerações	10 – 100	35
População	200 - 1000	400
Cruzamento	0,6 – 0,8	0.7

FIGURA 14. Correlação dos valores de pressão (a) e vazão (b) calibração com AGM.



Os erros relativos médios foram de 0,02% para a pressão e de 0,03% para a vazão. Com um custo computacional de 1h. O processo de otimização converge com certa velocidade e de forma progressiva, necessitando de apenas vinte e cinco iterações (Figura 15) para satisfazer os requisitos necessários para calibração.

FIGURA 15. Convergência da função objetivo calibração com AGM.



4. CONCLUSÕES

O algoritmo AGM mostrou-se uma boa opção para a calibração de grandes modelos de SAA. Os algoritmos AGM e AG foram aplicados usando as mesmas condições para duas redes de benchmark. Os algoritmos foram validados através da calibração do SPDA e de uma rede real (Balerma). Os resultados foram robustos para calibração dinâmica para a rugosidade, com resultados superiores aos observados em Salvino (2015) que utilizou um AG, cujo os valores relativos de erros observados foram, 10,5% para a pressão e 6,5% para a vazão. A validação do algoritmo de calibração por AGM resultou em um erro de 0.015% para a pressão e 2.86e-06% para a vazão.

Para a rede de Balerma, os resultados foram consistentes considerando as dimensões e a complexidade SAA. Os erros relativos médios ficaram dentro do padrão esperado pela literatura, sendo 0,02% para a pressão e de 0,03% para a vazão. A calibração por intermédio do AGM desenvolvido aqui apresentou resultados superiores em comparação com o AG desenvolvido em Salvino (2015). A calibração por AGM obteve resultados superiores para o custo computacional,

quando comparado ao AG implementado para comparação. Além disso, o AGM apresentou maior velocidade de convergência. Com os resultados pode-se concluir que ambos os modelos são considerados eficazes, com especial atenção para o AGM, que é muito mais eficiente.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Brasil, 2023.
- Chandramouli, S., (2018). Water management: A case study of Vizianagaram.
- Berardi, L., Giustolisi, O. Calibration of Design Models for Leakage Management of Water Distribution Networks. Water Resour Manage 35, 2537–2551 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02847-x>
- 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 & Software, Vol. 69, 370-381.
- Boczar, T., Adamikiewicz, N., Stanisławski, W. (2017). Calibration of parameters of water supply network model using genetic algorithm. E3S Web of Conferences. 19. 02007. 10.1051/e3sconf/20171902007.
- Do, N. C., A. R. Simpson, J. W. Deuerlein, and O. Piller. (2016). “Calibration of water demand multipliers in water distribution systems using genetic algorithms.” J. Water Resour. Plann. Manage. 142 (11): 04016044. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000691](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000691).
- Dunca, G., Piraianu, V.-F., Roman, R., Ciuc, P.-O., & Georgescu, S.-C. (2017). Experimental versus EPANET Simulation of Variable Speed Driven Pumps Operation. Energy Procedia, 112, 100-107. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1070.
- Eliades, D.G., Kyriakou, M., Vrachimis S., Polycarpou, M.M. (2016). EPANET-MATLAB Toolkit: An Open-Source Software for Interfacing EPANET with MATLAB, in Proc. 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI), The Netherlands, Nov 2016, p.8. (doi:10.5281/zenodo.831493)
- Gao, T. 2017. “Pipe roughness estimation in water distribution networks using head loss adjustment.” J. Water Resour. Plann. Manage. 143 (5): 04017007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000752](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000752).
- Gomes, H. P., (2019). Abastecimento de Água. João Pessoa: LENHS/UFPB, 2019.

Gonçalves, J. P., Silva, F. G. B., Silva, A. T. Y. L., Lourenço, C. A. Operational strategies aiming at the water and energy sustainability of simulation and sizing of water supply networks. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 13, e257101321315, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21315>.

Georgescu, A.M., Perju, S., Georgescu, S.C. and Anton, A. (2014) Numerical Model of a District Water Distribution System in Bucharest. *Procedia Engineering*, 70, 707-714. <http://www.sciencedirect.com>. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.077>.

Sanda-Carmen Georgescu, Andrei-Mugur Georgescu, Remus Alexandru Madularea, Vlad-Florin Piraianu, Anton Anton, Georgiana Dunca. Numerical Model of A Medium-Sized Municipal Water Distribution System Located in Romania, *Procedia Engineering*, Volume 119, 2015, Pages 660-668, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.919>.

Kang, D. e Kevin Lansey, A. M. ‘Demand and Roughness Estimation in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management.*, ASCE, v.137(1), pp. 20–30. 2011.

Instituto Trata Brasil (2023). Disponível em: <http://tratabrasil.org.br/>. Acesso em 23 de Fevereiro de 2024.

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., et al. Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: Current status, research challenges and future directions. *Environ. Model. Softw.* 2014, 62, 271–299.

Meirelles, G., D. Manzi, B. Brentan, T. Goulart, and E. Luvizotto. 2017. Calibration model for water distribution network using pressures estimated by artificial neural networks. *Water Resour. Manage.* 31 (13): 4339–4351. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1750-2>.

Moghaddam, A., Mokhtari, M., Afsharnia, M., Minaee, R.P. Simultaneous Hydraulic and Quality Model Calibration of a Real-World Water Distribution Network. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 2020, 146, 06020007. <https://doi.org/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0001209>.

Moreira, H. A. M., Gomes, H. P., Villanueva, J. M., 2019. Fuzzy – Mandani controller for a supply system. *Anais do 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering* October 20-25, 2019, Uberlândia, MG, Brazil. DOI: <http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-0508>.

Neves, C. L., (2007). Calibração de Parâmetros de Modelos Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água para Estudos de Operação de Rede. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 143p.

Reca, J. and Martinez, J. (2006) Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks, *Water Resour. Res.*, 42.

Salvino, M. M., Carvalho, P. S. O., Gomes, H. P. (2015). Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjetivo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20(3), 503–512. doi:10.1590/S1413-41522015020000099484.

Savic, D. A., Kapelan, Z. S., Jonkergouw, P. M., (2019). Quo vadis water distribution model calibration, Urban Water Journal, v. 6, n. 1, p. 3 -22, Reino Unido.

SILVA, F. G. B., (2003). Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos. 2003. 234 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

Walski, T. Procedure for hydraulic model calibration. J. Am. Water Work. Assoc. 2017, 109, 55–61.

Zanfei, A.; Menapace, A.; Santopietro, S.; Righetti, M. Calibration procedure for water distribution systems: Comparison among hydraulic models. Water 2020, 12, 1421.

Zecchin, A. C., Maier, H. R., Simpson, A. R., Leonard, M., Nixon, J. B. Ant colony optimization applied to water distribution system design: Comparative study of five algorithms. J. Water Resour. Plan. Manag. 2007, 133, 87–92.

Zhang, Q., Zheng, F., Duan, H.-F., Jia, Y., Zhang, T., Guo, X. Efficient numerical approach for simultaneous calibration of pipe roughness coefficients and nodal demands for water distribution systems. J. Water Resour. Plan. Manag. 2018, 144, 04018063.

Zhao, Q., Wu, W., Simpson, A.R., Willis, A. Simpler Is Better—Calibration of Pipe Roughness in Water Distribution Systems. Water 2022, 14, 3276. <https://doi.org/10.3390/w14203276>