

COMPETIÇÃO AQUALIBRIUM: UMA ANÁLISE DIDÁTICA DO ESTUDO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO VIA ‘SERIOUS GAMES’

José Gescilam Sousa Mota Uchôa¹; Iran Eduardo Lima Neto²; Jakobus van Zyl³

RESUMO – O presente trabalho propõe o uso da competição Aqualibrium com a ferramenta livre de simulação hidráulica EPANET para a criação de um *serious games* onde os alunos podem aprender as dificuldades de se projetar e verificar redes de distribuição de água. Foram analisadas 6 diferentes combinações de malha e tubulações da competição Aqualibrium. Diferentes formas para o cálculo da perda de carga localizada foram estudadas. As simulações apresentaram desvio médio absoluto menor que 5% em comparação com os dados experimentais, diferente dos trabalhos da literatura que já simularam a rede Aqualibrium. Apesar do objetivo didático, ao final são discutidas as limitações dos modelos de perda de carga localizada, principalmente para número de Reynolds pequenos.

ABSTRACT– The present work proposes the use of the Aqualibrium competition with the free hydraulic simulation tool EPANET to create a serious game where students can learn the difficulties of designing and verifying water distribution networks. Six different mesh and piping combinations from the Aqualibrium competition were analyzed. Different ways to calculate the local pressure loss have been studied. The simulations showed a mean absolute deviation of less than 5% compared to the experimental data, unlike the works in the literature that have already simulated the Aqualibrium network. Despite the didactic objective, at the end of the work the limitations of the local pressure loss models are discussed, mainly for small Reynolds numbers.

Palavras-Chave – Competição Aqualibrium, EPANET, *Serious Games*

INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de água por serem estruturas fundamentais para a vida urbana acompanharam a evolução da ciência moderna. A partir da introdução de tubulações de ferro no século 18, e com os significados avanços na capacidade de fabricação de materiais no século 19, surge a necessidade da análise das vazões e pressões em redes cada vez mais complexas, o que levou ao surgimento de áreas do conhecimento como a análise de rede de distribuição de água (Ramalingam *et al.*, 2002).

A complexidade das redes deve-se a relação de não linearidade entre as vazões e as pressões, a presença de variáveis discretas tais como os diâmetros das tubulações, o custo do material dentre outras, além das incertezas sobre os padrões de demandas e projeções futuras. Apesar disso, o avanço

1) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos (SP). gescilam@gmail.com

2) Universidade Federal do Ceará – UFC, Campus do Pici, Bloco 713 - 1º andar. Fortaleza (CE). iran@deha.ufc.br

3) Universidade de Auckland, rua Symonds 20, Auckland 1010, Nova Zelândia. E-mail: k.vanZyl@auckland.ac.nz

dos métodos numéricos desde a década de 1970 com a introdução recente de algoritmo genético permitem a redução do gasto computacional das simulações hidráulicas de redes de distribuição de água (Suribabu, 2010).

Entretanto, tal complexidade compreende muitas vezes uma barreira no estudo de redes de distribuição de água. Dessa maneira, é crescente o uso de novos modelos pedagógicos como o aprendizado experimental. Estudos recentes alegam as vantagens da implementação dos métodos ativos como complemento dos métodos passivos de aprendizagem de maneira a integrar nos conhecimentos, técnicas, habilidades e decisões que os futuros engenheiros enfrentarão no seu ambiente de trabalho (Miranda *et al.*, 2020).

Neste contexto, a abordagem pedagógica facilitada por meio dos *serious games* promove o aprendizado no ensino interdisciplinas e cada vez mais complexo da engenharia hidráulica e sanitária de maneira contextualizada (Medema *et al.*, 2019).

Assim, o presente trabalho se propõe ao estudo de redes de distribuição de água com o uso da competição Aqualibrium e do código aberto de interface entre o EPANET e MATLAB desenvolvida por Eliades *et al.* (2017).

O objetivo da competição Aqualibrium é distribuir água de um reservatório central (3 L) para outros três de maneira a manter um equilíbrio entre eles. Apesar da simplicidade do problema, os três reservatórios podem ser distribuídos em mais de 3000 combinações na malha de 16 pontos do jogo, e as possíveis combinações de tubulações somam mais de 280 bilhões de possibilidades (Meniconi *et al.*, 2016).

Além disso, a interface entre o EPANET e MATLAB usada neste trabalho permitiu uma análise das simulações das configurações de malhas usadas no Aqualibrium através de diferentes abordagens de perdas de cargas localizadas.

Os desvios entre os resultados das simulações e os dados medidos são discutidos de maneira didática neste trabalho dando enfoque à perda de energia ao longo do sistema, e às limitações dos modelos utilizados para a análise do problema em questão.

METODOLOGIA

Competição Aqualibrium

O objetivo principal da competição é distribuir o volume de 3 L de água do reservatório principal em três outros reservatório de maneira uniforme. Ao final, é aplicada uma penalidade segundo a equação que segue:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^3 |W_i - 1L|}{1L} \cdot 100 \quad (1)$$

onde W_i é o peso respectivo de cada reservatório. Logo, ganha o jogo a equipe que tiver a menor penalidade.

Para isso, os participantes contam com uma malha de 16 pontos (ver Figura 1), onde três reservatórios são dispostos. O reservatório principal é conectado ao nó 01 através de uma tubulação flexível e uma válvula. As tubulações têm comprimento fixos de 28 cm, e diâmetros interno de 3 mm (tubulações azuis) e 6 mm (tubulações vermelhas), além disso as equipes dispõem de um conjunto de conectores de diferentes formatos.

Os participantes devem respeitar as seguintes regras e procedimentos:

- i. As tubulações devem seguir o alinhamento da malha;
- ii. Não deve haver mais de 8 espaços de malha livres. Isso garante que ao menos um anel é formado.
- iii. Antes de se iniciar o jogo, deve-se remover o ar de dentro das tubulações.

As demais regras e instruções podem ser consultadas no site oficial da competição (van Zyl, 2022).



Figura 1 – Esquema global do jogo Aqualibrium com reservatório principal a 1 m do nível da malha e detalhe da malha do jogo.

Nesta fase inicial, os reservatórios foram dispostos no nós 6, 12 e 14. Três configurações de malha foram testadas e são apresentadas na Figura 2. Para efeitos didáticos, a configuração de malha **a** foi analisada também com somente tubulações de 3 mm, e em seguida com tubulações de 6 mm. Da mesma maneira para a configuração de malha **c**. Ao final, foram testadas uma configuração mista de tubulações, três configurações com tubulações de 3 mm e duas configurações com tubulações de 6 mm.

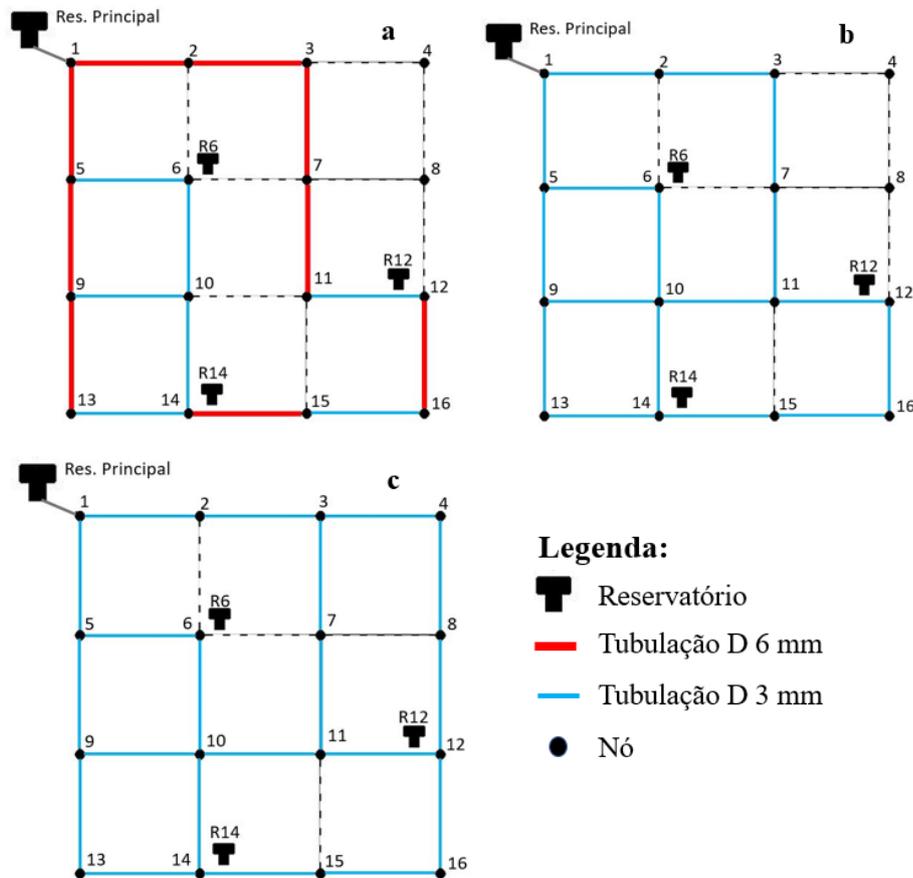


Figura 2 – Configurações de malha da competição Aqualibrium analisada com reservatórios nos Nós 6, 12 e 14.

As medições foram realizadas três vezes para cada uma das 6 configurações. Além disso, para a configuração de malha **a** com tubulações mistas como apresentado na Figura 02, foi analisada a influência do tipo de conector de saída. As novas regras da competição sugerem usar uma curva de 90°, ao passo que as regras antigas indicavam o uso de curvas de 180°.

Simulações EPANET

O software EPANET faz uso do princípio do balanceamento hidráulico da rede, ou seja, para um determinado instante resolve-se simultaneamente as equações de conservação de massa em cada nó e as perdas de cargas em cada tubulação. Para isso, o software emprega o algoritmo Global Gradient (Rossman *et al.*, 2020). Todini e Rossman (2013) discutem as vantagens desse algoritmo sobre os demais métodos de solução de redes.

Um conjunto de ferramentas já disponíveis no EPANET foi utilizada para garantir que as simulações representem bem o modelo como *Pressure Sustaining Valve* e *Check Valve*. Além disso, como o tempo de experimento foi no máximo de cerca de 2 minutos, um passo de tempo de 2

segundos foi adotado a fim de minimizar os erros numéricos introduzidos pelo método de Euler empregado no EPANET (Rossman *et al.*, 2020).

A interface entre o EPANET e MATLAB permitiu a implementação de fases de solução. Na primeira fase são ignoradas as perdas de cargas localizadas, ou seja, só foi considerado as perdas de cargas distribuídas calculadas através da equação de Darcy-Weisbach. A rugosidade das tubulações foi assumida de 10^{-5} mm.

Na segunda e terceira fase são implementadas as perdas de cargas localizadas calculadas de acordo com a equação abaixo:

$$\Delta H = k \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

onde V é velocidade média de referência, e k é um coeficiente adimensional que depende da geometria, do número de Reynolds, da rugosidade da parede, dentre outras condições como a condução do escoamento e a distribuição de vazões em certos casos (Porto, 2006).

Na segunda fase, são implementadas as perdas de cargas distribuídas pelas constantes K_s apresentadas em Porto (2006). Enquanto na terceira fase, as equações semiempíricas de Gardel e Levin, discutidas em Wood *et al.* (1993), foram utilizadas para o cálculo das constantes K_s para as conexões em Tê. Essas equações dependem não somente das características geométricas, mas também da distribuição do fluxo como apresentada na Figura 3. Dessa maneira, um método iterativo foi implementado com condição de parada quando a variação da média das vazões das tubulações entre duas interações fosse menor que 1%.

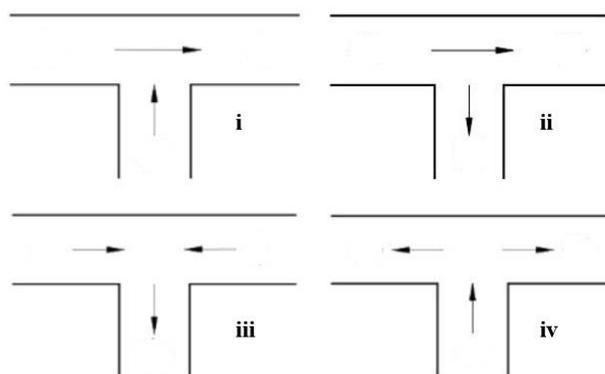


Figura 3 – Condições de distribuição de fluxo das equações semiempíricas de Gardel e Levin.

RESULTADOS

Os resultados experimentais indicam que a curva de 180° na entrada dos reservatórios pode introduzir incertezas na competição, uma vez que a média do desvio padrão dos resultados de penalidade da configuração **a** mista são os seguintes:

Tabela 1 – Número de curvas de 180° nos reservatórios e o desvio padrão médio das penalidades.

Número de Curvas de 180°	Desvio Padrão
3	26,47
2	20,11
1	8,77

Tal resultado pode ser explicado pela dificuldade na remoção de ar nessas curvas de 180°, introduzindo incertezas nos resultados. Além disso, efeitos inerciais e transientes podem contribuir para explicação desse fenômeno uma vez que as tubulações apresentam diâmetros de 3 e 6 mm.

Os resultados de penalidade indicam que a escolha dos diâmetros em certas configurações pode influenciar pouco nos resultados de penalidade como apresentado na Tabela 2. Essa observação pode indicar que fatores como a configuração da malha e em consequência o número e tipo de conexões (curva 90°, tê dentre outros) podem influenciar mais nos resultados pelo tamanho reduzido da rede. Uma análise de sensibilidade precisa ser realizada para confirmar este resultado.

Tabela 2 – Penalidades para as configurações de malha e tubulações estudadas.

Configurações	Penalidade
a - Mista	29,31
a - Azul	39,51
a - Vermelha	22,22
b - Azul	71,28
c - Azul	35,11
c - Vermelha	24,12

Os resultados das simulações apresentaram desvio médio absoluto de 4,38% em comparação com os valores experimentais diferente dos valores reportados por Meniconi *et al.* (2016). Eles apresentaram valores discrepantes entre as simulações EPANET e as configurações da competição Aqualibrium.

De uma maneira geral, a Fase 3 apresentou melhores resultados que a Fase 2, e a Fase 2 apresentou melhores resultados que a Fase 1. Entretanto, para as configurações de tubulações azuis (3 mm), a rotina de trabalho utilizando as equações de Gardel e Levin apresentaram resultados piores que as constantes de Porto (2006) como apresentado para a configuração de malha a (ver Tabela 3) e b.

Tal fenômeno poderia ser explicado pelo fato de que as equações de Gardel e Levin foram propostas para casos de tubulações curtas com grande diâmetro (Wood *et al.*, 1993). Entretanto, mais estudos precisam ser realizados para investigar esse fenômeno.

Tabela 3 – Desvio médio absoluto das configurações de tubulação com a configuração de malha **a** de acordo com as Fases estudadas.

Configurações	Desvio médio absoluto		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3
a - Mista	6,98%	5,29%	1,41%
a - Azul	3,85%	2,62%	3,01%
a - Vermelha	6,16%	5,04%	3,71%

De uma maneira geral as configurações com tubulações azuis apresentaram número de Reynolds (Re) menores com escoamentos predominantemente laminar (ver Figura 4). Re médio delas foi de 1800, e algumas tubulações apresentaram $Re < 500$.

Usualmente aplicações com número de Reynolds pequenos exigem modelos que são computacionalmente exigentes em termos de complexidade de implementação, tempo e consumo de recursos (Martins *et al.*, 2017). Mais investigações experimentais e numéricas precisam ser realizadas para confirmar a necessidade da implementação de ferramentas mais avançadas como a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para o estudo da competição Aqualibrium.

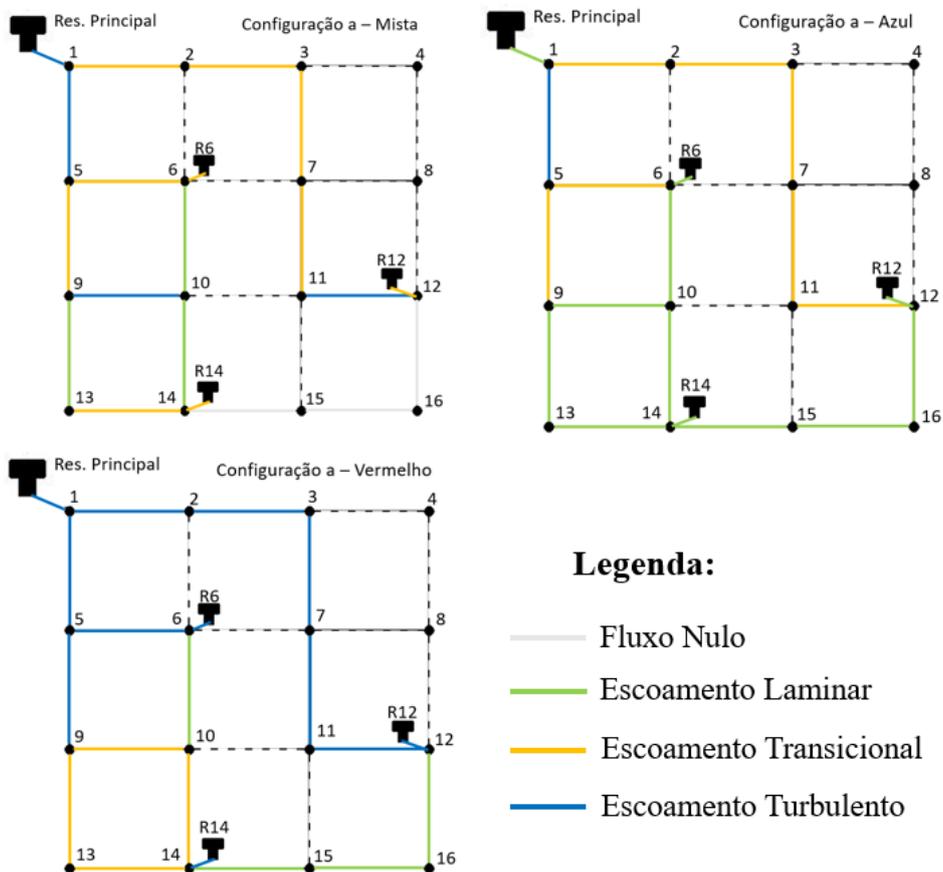


Figura 4 – Regime de escoamento para a configuração de malha **a** de acordo com a configuração de tubulações.

De uma maneira geral, percebe-se que o aumento do número de nós, aumenta o desvio absoluto médio nas Fases 1 e 2 (ver Tabela 4). Entretanto, vale ressaltar que a faixa de Reynolds encontrada nas simulações está fora da faixa recomendada para as equações apresentadas por Porto (2006), usualmente $Re > 10^5$. Apesar disso, os desvios numéricos absolutos máximos da Fase 2 foi de 6,30%. Tal resultado pode ser explicado pelo equilíbrio das configurações de malha estudadas. Estudos com outras configurações de malha precisam ser analisados.

Tabela 4 – Desvio médio absoluto das configurações de tubulações azuis (3 mm) de acordo com a Fases 1 e 2 por número de nós totais.

Configurações	Número de Nó			Desvio absoluto	
	Nl	Nt	Nx	Fase 1	Fase 2
a - Azul	4	7	0	3,85%	2,62%
b - Azul	3	7	1	3,53%	4,25%
c - Azul	4	7	1	6,71%	6,30%

onde Nl é o número de curvas de 90°, Nt é o número de Tê's, e Nx o número de conexões em cruzeta.

Novas aplicações didáticas

O desenvolvimento de novos componentes para a competição, e novas aplicações são discutidas em van Zyl *et al.* (2022). A competição Aqualibrium e seus componentes estão sob a licença *Creative Commons* isso permite às instituições de ensino a criarem os seus próprios componentes e aplicações, e ainda contribuir para o projeto.

Assim, os autores desse trabalho pretendem aplicar o Aqualibrium para o estudo de critérios hidráulicos tais como o índice de resiliência de Todini (2000) que avalia a capacidade do sistema em suportar condições de estresse, o índice de uniformidade de pressões de Alhimiary e Alshaily (2007) que avalia a uniformidade das pressões ao longo de todo o sistema e a idade da água de Marchi *et al.* (2014) com o objetivo de caracterizar a qualidade da água de abastecimento.

CONCLUSÃO

O presente trabalho simulou o funcionamento de 6 redes de distribuição de água através da competição Aqualibrium, e em seguida fez uso do software EPANET com interface com o MATLAB para estudar a perda de carga nos sistemas.

Apesar do propósito didático do trabalho, vale ressaltar que as discussões apresentadas aqui podem ser aplicadas em sistemas reais. Percebe-se que apesar de o estudo de perdas de cargas localizados em conexões estar bem estabelecido na literatura, não há equações para todas as faixas de Re, especialmente para Re baixos.

Vale ressaltar que nesse trabalho, não foram considerados os efeitos inerciais e transientes que podem ser importantes uma vez que os diâmetros das tubulações são pequenos (3 mm a 6 mm).

Como trabalho futuro, planeja-se o estudo de mais combinações de malha e tubulações, além das implementações dos coeficientes de perda de carga k em função de Reynolds.

Assim, a implementação desse *Serious Games* utilizando a competição Aqualibrium e software EPANET pode permitir o aprendizado sobre a dificuldade de projetar e verificar sistemas de distribuição de água de uma maneira divertida e por meio de um aprendizado experimental.

AGRADECIMENTOS – Agradecemos ao PET CIVIL da Universidade Federal do Ceará (UFC) pelas contribuições na etapa experimental desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALHIMIARY, H. A. A.; ALSUHAILY, R. H. S. (2007) “*Minimizing leakage rates in water distribution networks through optimal valves settings*”. In: World Environmental and Water Resources Congress 2007, Reston. Proceedings. Reston: American Society of Civil Engineers, 2007.
- ELIADES, DEMETRIOS G., KYRIAKOU, MARIOS, VRACHIMIS, STELIOS, e POLYCARPOU, MARIOS M. (2017). “*EPANET-MATLAB Toolkit: An Open-Source Software for Interfacing EPANET with MATLAB*”. Proc. Of Critical Information Infrastructures Security. Computing & Control for the Water Industry (CCWI), Amsterdam, The Netherlands, 7-9 Nov. 2016
- MARCHI, A.; SALOMONS, E.; OSTFELD, A.; KAPELAN, Z.; SIMPSON, A. R.; ZECCHIN, A. C.; MAIER, H. R.; WU, Z. Y.; ELSAYED, S. M.; SONG, Y. (2014) “*Battle of the Water Networks II*”. Journal Of Water Resources Planning and Management, Jul. 2014, v. 140, n. 7, p. 1-31.
- MARTINS, N. M. C., BRUNONE, B., MENICONI, S., RAMOS, H. M., e COVAS, D. I. C. (2017). “*CFD and ID Approaches for the Unsteady Friction Analysis of Low Reynolds Number Turbulent Flows*”. Journal of Hydraulic Engineering, 143(12), 04017050.
- MEDEMA, W., I. MAYER, J. ADAMOWSKI, A. E. J. WALS e C. CHEW (2019). “*The Potential of Serious Games to Solve Water Problems: editorial to the special issue on game-based approaches to sustainable water governance*”. Water, v. 11, n. 12, p. 2562.
- MENICONI, S., BRUNONE, B., VAN ZYL, K., e MAZZETTI, E. (2016). “*Aqualibrium Competition: Laboratory Data and EPANet Simulations*”. Procedia Engineering, 186, 522–529.
- MIRANDA, M., SAIZ-LINARES, Á., da COSTA, A., e CASTRO, J. (2020). “*Active, experiential and reflective training in civil engineering: evaluation of a project-based learning proposal*”. European Journal of Engineering Education, 1–20. doi:10.1080/03043797.2020.1785400

- RAMALINGAM, D., LINGIREDDY, S., e ORMSBEE, L. E. (2002). *“History of Water Distribution Network Analysis: Over 100 Years of Progress”*. Environmental and Water Resources History.
- ROSSMAN, Lewis A. et al. (2020). *“EPANET 2.2 User Manual”*. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2020. 190 p.
- PORTO, Rodrigo de Melo. *“Hidráulica Básica”*. 4. ed. São Carlos: Eesc-Usp, 2006. 519 p.
- SURIBABU, C. R. (2010). *“Differential evolution algorithm for optimal design of water distribution networks”*. Journal of Hydroinformatics, 12(1), 66–82.
- TODINI, E. (2000). *“Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach.”* Urban water, v. 2, n. 2, p. 115-122, 2000.
- TODINI E. e ROSSMAN L.A. (2013). *“Unified Framework for Deriving Simultaneous Equation Algorithms for Water Distribution Networks.”* J. Hydraul. Eng., 139(5), 511-526.
- VAN ZYL, Jakobus. (2022). *“Aqualibrium Competition”*. 2022. Disponível em: <http://www.aqualibriumcompetition.net/joomla/>. Acesso em: 06 maio 2022.
- VAN ZYL, Jakobus et al. (2022). *“Teaching Pipe And Pump Hydraulics: Hands-On Laboratory Exercises Using The Aqualibrium Model”*. 2Nd International Joint Conference On Water Distribution Systems Analysis & Computing And Control In The Water Industry, Valencia, v. 1, n. 1, p. 1-1, jul. 2022. No prelo.
- WOOD, D. J., REDDY, L. S., e FUNK, J. E. (1993). *“Modeling Pipe Networks Dominated by Junctions”*. Journal of Hydraulic Engineering, 119(8), 949–958.