

I-186 - APLICAÇÃO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DIRIGIDO PELA PRESSÃO EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Júlia Daniele Silva de Souza⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Bolsista de Iniciação Científica da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE.

Matheus Beserra Cavalcanti

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Bolsista de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Thayse Amanda Siqueira Santos

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

José Eloim Silva de Macedo

Professor do Centro Universitário Maurício de Nassau. Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Doutorando em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE.

Saulo de Tarso Marques Bezerra

Professor Associado do curso de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil e Ambiental e Doutor em Engenharia Mecânica.

Endereço⁽¹⁾: Rua João Cordeiro de Souza, 184, Vassoural, Caruaru-PE, CEP: 50030-025, Brasil, Telefone: (81) 993330224. E-mail: juliadaniele_souza@hotmail.com.

RESUMO

Os modelos de simulação hidráulica têm uma importância incontestável tanto na fase de projeto quanto na fase de operação de um sistema de distribuição de água. Os modelos mais tradicionais dirigidos pela demanda, consideram que as demandas preestabelecidas para cada um dos nós são completamente atendidas, independentemente da pressão disponível. Esta consideração, por sua vez, configura-se como sendo a principal limitação deste tipo de modelo, tendo em vista que, na prática, o fluxo fornecido nos nós depende da pressão. Com isso, vários autores evidenciam a urgência na necessidade da utilização de modelos que sejam capazes de reproduzir o real comportamento da rede sob tais condições e, além disso, que sejam capazes de quantificar com maior precisão o déficit de fluxo disponível nos nós que compõem a rede. Estes modelos são conhecidos como sendo dirigidos pela pressão. Sendo assim, o trabalho apresenta um estudo realizado em um sistema de distribuição de água de um condomínio horizontal de alto padrão localizado na cidade de Caruaru-PE, no qual foi constatado que alguns dos nós da rede apresentam déficit no atendimento de suas respectivas demandas. O estudo apresenta dados de vazões totais calculados através da utilização do EPANET 2, um simulador hidráulico amplamente utilizado e que utiliza um algoritmo de cálculo dirigido pela demanda, e através de um método que adapta o motor de cálculo do EPANET 2 para simular a modelagem dirigida pela pressão. Através desta análise, foi constatado que, eventualmente, mais de ¼ da vazão prevista na fase de projeto pode não ser, de fato, atendida na prática. Esta diferença configura-se como sendo bastante significativa e a importância desta constatação pode ser exemplificada através de fatos como o de que, na rede em questão, existem pontos de consumo que simplesmente não são atendidos – aparentemente sem explicação, pois o projeto da rede foi feito através de “métodos” renomados.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de abastecimento de água, modelos de simulação hidráulica, EPANET, demanda dirigida pela pressão.

INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação hidráulica são imprescindíveis para o projeto e a operação de sistemas de distribuição de água. Os simuladores avaliam as equações de conservação de massa e de energia para determinar as pressões nos nós, vazões nos trechos e os níveis de reservatórios (KANG & LANSEY, 2014; TAO et al., 2014; YANG & BOCCELLI, 2014; LAUCELLI & GIUSTOLISI, 2015; KUN et al., 2015).

Os modelos de simulação hidráulica dirigidos pela demanda (MHDDem) são amplamente adotados pela comunidade técnico-científica. Estes modelos são formulados sob a suposição de que as demandas são preestabelecidas pelo projetista e totalmente atendidas, independentemente da pressão. Siew & Tanyimboh (2012) destacam que a hipótese de que todas as demandas são plenamente satisfeitas, independentemente da pressão, torna-se irracional e representa a principal limitação dos MHDDem. Na prática, a demanda disponível em cada nó da rede hidráulica depende das pressões disponíveis. Quando uma rede tem pontos de consumo com baixa ou falta de pressão, as demandas não serão atendidas na íntegra nos pontos com baixa pressão e poderão ser maiores que as previstas nos pontos com pressões elevadas.

As condições de deficiência de pressão são inevitáveis nos sistemas de distribuição de água e podem ser causadas por ocorrências comuns como: subdimensionamento das instalações, falha de bombas, rompimentos de tubos, fechamento de trechos para manutenção etc. Sob estas circunstâncias, o sistema pode não ser capaz de satisfazer todas as demandas da rede. Nestes casos, o modelo de simulação hidráulica dirigido pela demanda é incapaz de quantificar com precisão a magnitude exata da deficiência em termos de pressão nodal e vazão. Esta é uma informação crítica e não pode ser negligenciada na avaliação de desempenho dos sistemas.

Diante do exposto, a adoção de uma metodologia de análise de sistemas reais, que considere explicitamente a relação entre demandas nodais e pressão, é indispensável. Modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão (MHDPres) apresentam uma representação mais realista do sistema. Na prática, as condições corretas de operação do sistema podem ser obtidas considerando-se as demandas dos nós como dependentes de pressão. Recentemente, Elhay et al. (2015) enfatizaram a necessidade urgente de modelos hidráulicos que são adequados para condições extremas de operação e/ou eventos extremos.

Existem numerosos métodos de obtenção das demandas nodais para MHDPres na literatura. Inicialmente, esses métodos geralmente podem ser categorizados em dois grandes grupos. A primeira categoria dos MHDPres adota os modelos dirigidos pela demanda para determinar as grandezas hidráulicas dos sistemas. Por exemplo, Ang & Jowitt (2006) propuseram um algoritmo que, progressivamente, adiciona reservatórios artificiais a nós deficientes em pressão. A abordagem utilizada é semelhante à de Bhawe (1991). Kalungi & Tanyimboh (2003) desenvolveram um método heurístico na qual alguns aspectos do MHDPres foram usados em um ambiente de MHDDem para identificar nós com déficits de demandas. Os métodos citados adotam o uso repetitivo de MHDDem com ajustes sucessivos feitos em parâmetros específicos até que uma consistência hidráulica preestabelecida seja obtida. Com isto, estes possuem um alto custo computacional, apresentando dificuldade para ser efetivamente implementadas em grandes sistemas.

A segunda categoria de métodos acrescenta ao processo e cálculo dos simuladores hidráulicos uma abordagem que relacione a demanda com a carga hidráulica dos nós da rede. Estas relações são funções matemáticas adotadas para estimar o fluxo real nos nós com base na pressão nodal. Os MHDPres desenvolvidos por Germanopoulos (1985), Cullinane et al. (1992), Fujiwara & Ganesharajah (1993), Gupta & Bhawe (1996) e Udo & Ozawa (2001) consideram que a demanda nodal é satisfeita por completo quando a pressão é igual ou maior a desejada, e zero quando a pressão é igual ou menor que a mínima. A maior vantagem deste tipo de modelo é que as equações não lineares são resolvidas apenas uma vez. A desvantagem é a ausência de continuidade na função e/ou suas derivadas nas transições entre zero e fluxo nodal parcial, e/ou entre satisfação parcial e total da demanda nodal. Essas descontinuidades podem levar a dificuldades de convergência na solução computacional dos sistemas de equações (TANYIMBOH & TEMPLEMAN, 2010).

Tanyimboh & Templeman (2010) desenvolveram um algoritmo robusto baseado no método de Newton Raphson. O modelo foi denominado como PRAAWDS (*Program for the Realistic Analysis of the Availability of Water in Distribution Systems*) e apresenta um equacionamento da relação fluxo-carga (carga hidráulica) no nó com bons resultados e sem descontinuidades. Além disso, a derivada para a função de Tanyimboh & Templeman (2010) pode ser facilmente calculada, além de possibilitar a incorporação da relação fluxo-carga no motor de cálculo hidráulico do EPANET 2. Siew & Tanyimboh (2012) demonstraram a eficácia da integração da função contínua de Tanyimboh & Templeman (2010) no *Global Gradient Method* para compor um modelo capaz de simular redes reais em condições normais e com deficiência de pressão. Esta formulação é referida como o *Head Dependent Gradient Method* (HDGM) e foi implementada com sucesso dentro da estrutura do EPANET 2.

Abdy Sayyed et al. (2015) descreveram uma abordagem de modelagem que permite simular condições de operação com pressão insuficiente em uma única execução do EPANET 2, sem modificar o código-fonte do simulador. A simulação hidráulica dirigida pela pressão é executada por meio da adição dos nós com déficit de pressão de uma válvula de retenção, uma válvula de controle de fluxo e um emissor. Assim, a abordagem de modelagem proposta aprimora uma formulação anterior, evitando a necessidade de um reservatório artificial nos nós com pressão insuficiente. Consequentemente, o tubo de conexão para o reservatório artificial (para o qual dados adicionais devem ser fornecidos) não é necessário. A equação de descarga do emissor permite que a relação cabeça-fluxo nodal seja variada para refletir as características de qualquer rede. Os resultados sugerem que o procedimento é robusto, confiável e rápido o suficiente para uso regular.

Este trabalho objetivou a aplicação do modelo MHDPres proposto por Abdy Sayyed et al. (2015) no sistema de distribuição de água de um condomínio horizontal de alto padrão localizado na cidade de Caruaru-PE. Os resultados são comparados com um modelo MHDDem (EPANET 2).

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão (MHDPres)

O modelo de simulação hidráulico dirigido pela pressão (MHDPres) proposto por Abdy Sayyed *et al.* (2015) possui dois estágios de execução. No primeiro estágio, são inseridos elementos fictícios para simular a demanda dependente da pressão nos nós e, no estágio 2, executa-se a simulação para o estado estático ou período estendido (simulação dinâmica). Os pesquisadores propuseram que seja adicionado nestes nós (DN) uma válvula de retenção (CV), uma válvula de controle de fluxo (FCV) e um emissor (EN), como mostrado na Figura 2. O FCV restringirá o fluxo até o máximo desejado, o emissor simulará condições de fluxo parcial e o CV no nó de demanda evitará fluxos reversos. Esta inclusão pode ser realizada diretamente na interface gráfica do EPANET 2 ou automaticamente através de um programa computacional que inclua estes elementos nos dados de entradas (arquivo INP). Para concluir a simulação, o sistema modificado é analisado por meio EPANET 2.

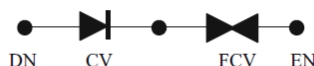


Figura 1: Configuração do conjunto de elementos artificiais adicionados aos nós com déficit de pressão.

A execução do algoritmo pode ser descrita pelos seguintes procedimentos:

- 1 – Adicionar dois nós próximos a cada nó de demanda, um trecho com uma CV com resistência insignificante (isto é, o comprimento do tubo possui um valor muito pequeno) entre o original e o primeiro nó adicionado, uma FCV entre o primeiro e o segundo nós adicionados.
- 2 – Zerar a demanda base em todos os nós.
- 3 – Definir a elevação nos dois fictícios igual à do nó de demanda.
- 4 – Definir as configurações de cada FCV para o respectivo nó de demanda.
- 5 – Informar o coeficiente de emissor C_d do segundo nó adicionado para o respectivo nó de demanda.
- 6 – Definir o expoente do emissor γ para o valor desejado.
- 7 – Realizar a análise executando o EPANET.

A simulação é realizada através do *toolkit* do EPANET e o modelo tem seu comportamento descrito por meio das Equações 1, 2 e 3.

$$q_j^{avl} = C_d \left(H_j^{avl} - H_j^{\min} \right)^\gamma; H_j^{avl} \geq H_j^{\min} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{q_j^{\text{req}}}{\left(H_j^{\text{des}} - H_j^{\text{min}}\right)^{\frac{1}{n_j}}} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{1}{n_j} \quad (3)$$

Onde: C_d – coeficiente do emissor do nó j ; H_j^{avl} – carga hidráulica disponível do nó j ; H_j^{des} – carga hidráulica desejável do nó j ; H_j^{min} – carga hidráulica mínima do nó j ; n_j – parâmetro da vazão nodal; q_j^{avl} – fluxo disponível do nó j ; q_j^{req} – fluxo requerido do nó j ; e γ – expoente do emissor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudos de Caso

Para avaliar a aplicação dos modelos MHDDem (EPANET 2) e MHDPres (ABDY SAYYED *et al.*, 2015), adotar-se-á o sistema de distribuição de água do condomínio horizontal Quintas da Colina (Figura 1), localizado na cidade de Caruaru-PE, como estudo de caso. Este sistema foi escolhido por apresentar problemas de abastecimento em pontos de consumo com baixa pressão. A população atendida é estimada em 1848 habitantes, a partir do número de residências e uma taxa de ocupação domiciliar de 4,2 pessoas por habitação (IBGE, 2000). A rede de distribuição é abastecida por um reservatório superior, capacidade útil de 21,33 m³, e possui uma extensão total de 6103 metros, sendo composta por tubos de PVC com diâmetros DN 50, DN 75 e DN 100. Considerando um consumo per capita de 150 L/hab./dia, a vazão máxima diária foi estimada em 5,77 L/s.

As avaliações foram realizadas separadamente para os dois setores do estudo de caso – sistema de distribuição de água do condomínio horizontal Quintas da Colina (Figura 1), localizado na cidade de Caruaru-PE. Para ambos os setores, adotou-se um valor de n_j igual a 1,85, similar ao empregado por Abdy Sayyed *et al.* (2015), autor da metodologia, em suas análises utilizando o algoritmo aplicado no trabalho em questão.

Na tentativa de encontrar uma alternativa para tornar a simulação representativa da rede real, optou-se por realizar um estudo com valores de pressão desejada diferentes para todos os nós, sendo esta determinada através da utilização de uma carga hidráulica calculada ao somar 10 m, que seria o montante mínimo adotado como sendo ideal de pressão desejada no nó, ao valor da cota do nó mais elevado do setor. Ao utilizar este valor de carga hidráulica como dado de entrada para cada um dos nós, o algoritmo automaticamente calcula o valor de pressão desejada no nó através da subtração da correspondente cota do nó deste valor de carga hidráulica.

Deste modo, parte-se do princípio de que, teoricamente, caso seja atendida essa condição de pressão desejada para o nó de condição mais crítica, justamente por estar na cota mais elevada, todos os outros nós apresentariam valores de pressão superiores ao mínimo adotado usualmente, ou seja: 10 m. A seguir, apresentase os resultados das simulações com os modelos MHDDem (EPANET 2) e MHDPres (ABDY SAYYED *et al.*, 2015) obtidos separadamente para cada um dos setores.

Setor 1

Para o Setor 1, a vazão total de projeto é de 2,23 L/s. O valor da cota do nó mais elevado é de 603,20 m. Os resultados das simulações com os modelos supracitados para este setor estão resumidos na Tabela 1.

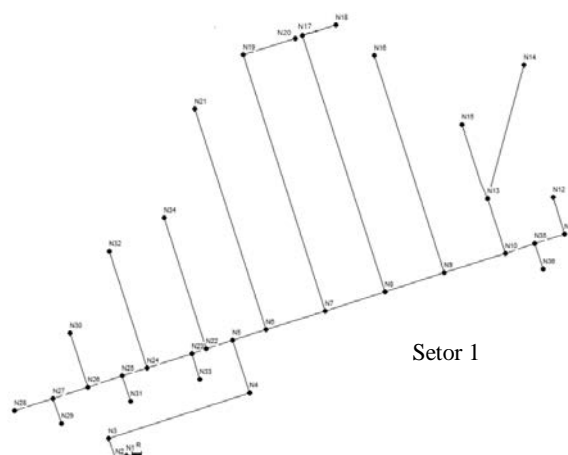


Figura 2: Setor do Estudo de Caso 1.

Tabela 1: Vazão total do Setor 1 com os modelos MHDDem e MHDPres.

Carga hidráulica (mca)	Vazão total (L/s)		Diferença (%)
	MHDPres	MHDDem	
613,20	1,88	2,23	15,78

Setor 2

A vazão total de projeto do Setor 2 é de 3,54 L/s. O valor da cota do nó mais elevado é de 601,95 m. Os resultados das simulações com os modelos supracitados para este setor estão resumidos na tabela 2.

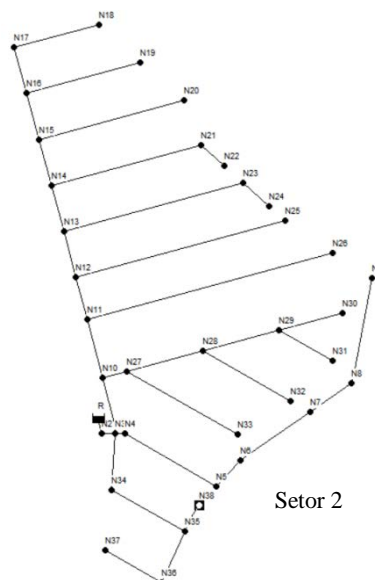


Figura 3: Setor do Estudo de Caso 2.

Tabela 2: Vazão total do Setor 2 com os modelos MHDDem e MHDPres.

Carga hidráulica (mca)	Vazão total (L/s)		Diferença (%)
	MHDPres	MHDDem	
611,95	3,16	3,54	10,74

Como visto nas Tabelas 1 e 2, além de apresentar os valores de vazão total para cada um dos setores, foi calculada a diferença percentual entre os valores encontrados para cada um dos modelos. Considerando a diferença percentual somada dos dois setores, notou-se que, para pressões desejadas calculadas conforme supracitado, a demanda de água disponível pelo modelo MHDPress difere em aproximadamente 26,53% do valor obtido no MHDDem, podendo, portanto, ser considerado um bom modelo de representação para a rede avaliada, pois foi capaz de reproduzir o déficit de fluxo existente em alguns nós.

CONCLUSÕES

A técnica adotada nesta pesquisa para a análise de um sistema de distribuição de água real, sujeito a déficit de pressão em alguns pontos de consumo, é baseada na formulação de Abdy Sayyed *et al.* (2015), que generalizou procedimentos anteriores em uma única execução no EPANET 2. A proposta de adicionar um conjunto de elementos artificiais aos nós de demanda é relativamente simples, e as simulações podem ser executadas nos demais simuladores hidráulicos “tradicionais”. O valor obtido de diferença percentual entre os modelos evidencia a importância da adoção de uma metodologia de análise de sistemas reais, que considere explicitamente a relação entre demandas nodais e pressão, tendo em vista a discrepância considerável entre o valor de vazão total do modelo tradicional e o valor calculado através do modelo mais pragmático. Conclui-se que a adoção de modelos dirigidos pela pressão em projetos de simulação, dimensionamento e calibração de sistemas de distribuição de água é importante para prever o comportamento destes de forma mais realista.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDY SAYYED, M.A.H.; GUPTA, R.; TANYIMBOH, T.T. Noniterative application of EPANET for pressure dependent modelling of water distribution systems. *Water Resources Management*, v. 29, n. 9, p. 3227-3242, 2015.
2. ANG, W.H.; JOWITT, P.W. Solution for water distribution systems under pressure-deficient conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 132, n. 3, p. 175-182, 2006.
3. BHAVE, P.R. Analysis of flow in water distribution networks. Technomic Publishing Co.; Lancaster, PA, 1991.
4. CULLINANE, M.J.; LANSEY, K.E.; MAYS, L.W. Optimisation-availability-based design of water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 118, n. 3, p. 420-441, 1992.
5. ELHAY, S.; PILLER, O.; DEUERLEIN, J.; SIMPSON, A. A robust, rapidly convergent method that solves the water distribution equations for pressure-dependent models. *Journal of Water Resource Planning and Management*, v. 142, n. 2, 04015047, 2016.
6. FUJIWARA, O.; GANESHARAJAH, T. Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks. *Water Resources Research*, v. 29, n. 8, p. 2917-2924, 1993.
7. GERMANOPOULOS, G. A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civil Engineering Systems*, v. 2, p. 171-179, 1985.
8. GUPTA, R.; BHAVE, P.R. Comparison of methods for predicting deficient network performance. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 122, n. 3, p. 214-217, 1996.
9. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil). Disponível em: <www.ibge.gov.br>.
10. KALUNGI, P.; TANYIMBOH, T.T. Redundancy model for water distribution systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 82, n. 3, p. 275-286, 2003.
11. KANG, D.; LANSEY, K. Novel approach to detecting pipe bursts in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, n. 1, p. 121-127, 2014.
12. KUN, D.; TIAN-YU, L.; JUN-HUI, W.; JIN-SONG, G. Inversion model of water distribution systems for nodal demand calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 141, n. 9, p. 04015002, 2015.
13. LAUCELLI, D.; GIUSTOLISI, O. Vulnerability assessment of water distribution networks under seismic actions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 141, n. 6, p. 04014082, 2015.

14. SIEW, C.; TANYIMBOH, T.T. Pressure-dependent EPANET extension. *Water Resources Management*, v. 26, n. 6, p. 1477-1498, 2012.
15. TANYIMBOH, T.T.; TEMPLEMAN, A.B. Seamless pressure deficient water distribution system model. *Water Management*, v. 163, n. 8, p. 389-396, 2010.
16. TAO, T.; HUANG, H.; LI, F.; XIN, K. Burst detection using an artificial immune network in water-distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, n. 1, p. 04014027, 2014.
17. UDO, A.; OZAWA, T. Steady state analysis of pipe networks considering reduction of outflow in the case of low water pressures. *Water software systems: Theory and applications*, In: COULBECK, B.; RANCE, J.P. (eds.), p. 173-182, 2001.
18. YANG, X.; BOCCELLI, D. Bayesian approach for real-time probabilistic contamination source identification. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, n. 8, p. 04014019, 2014.