

Desenvolvimento de Ferramenta Integrada ao EPANET para auxiliar a análise da Confiabilidade Mecânica em Projetos de Rede de Abastecimento de Água

Integrated Tool Development EPANET to assist in the analysis of Mechanical Reliability in Network Projects Water Supply

• **Data de entrada:**
08/05/2017

• **Data de aprovação:**
11/12/2017

Cristiano Dorça Ferreira*/Edevar Luvizotto Junior

DOI: 10.4322/dae.2019.003

Resumo

A confiabilidade é uma medida para a avaliação de uma rede de abastecimento de água, que tem sido incorporada nos últimos anos a modelos desenvolvidos para projeto e planejamento ótimos desses sistemas. A confiabilidade mecânica, que pode ser considerada a capacidade que a rede tem de atender aos seus usuários com pressões e vazões adequadas após alguma alteração em seu funcionamento normal, por intervenção de manutenção sobre esta, tem sido estudada por diversos pesquisadores na atualidade, com uma garantia extra na qualidade dos serviços prestados pelas empresas de abastecimento. Nesse sentido, o presente trabalho soma esforços na busca por modelos que ajudam a projetar sistemas com elevada confiabilidade mecânica, pela localização e seleção de válvulas de isolamento, associada a um modelo de prioridade de manutenção baseado nas tensões atuantes sobre as tubulações. A proposição é avaliada em estudo de caso hipotético.

Palavras-chave: Rede de Abastecimento e Água. Confiabilidade Mecânica. Projeto.

Abstract

Reliability is a measure for evaluating a water supply network, which has been incorporated in recent years into models developed for optimal design and planning of such systems. The mechanical reliability, which can be considered as the capacity that the network has to offer users adequate pressures and flows after some alteration in its normal functioning, by maintenance intervention on this, has been studied by several researchers nowadays, with an extra guarantee the quality of the services provided by the supply companies. In this situation, the present article adds efforts to search for models that help to design of systems with high mechanical reliability, for the location and selection of valves that isolate system. The proposition is evaluated in a hypothetical case study.

Keywords: Water Supply Network. Mechanical Reliability. Project.

Cristiano Dorça Ferreira – Engenheiro Civil (Unicamp). Mestre em Engenharia Civil (Unicamp). Doutorando em Engenharia Civil (Unicamp).

Edevar Luvizotto Junior – Engenheiro Civil (Unicamp). Mestre e Doutor em Engenharia Civil (USP). Pós-doutor pela Universidade Politécnica de Valência (Espanha). Professor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp.

***Endereço para correspondência:** Universidade Estadual de Campinas – Unicamp – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Avenida Albert Einstein, 951 – Cidade Universitária Zeferino Vaz, CEP 13083-189, Campinas, SP. Telefone (19) 3521-2354. E-mail: cristianodorca@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A literatura clássica apresenta o dimensionamento das redes de abastecimento de água baseado no atendimento das demandas dos usuários (população, indústria, comércio, prédios públicos e outros) com pressões e velocidades em conformidade com um intervalo normativo. Todavia, na última década, algumas pesquisas propõem levar em consideração a qualidade da água distribuída e a confiabilidade do sistema. A preocupação com a confiabilidade vem ganhando grande destaque, uma vez que tanto as falhas mecânicas como as falhas hidráulicas fazem parte do cotidiano da operação dos sistemas de abastecimento de água. "(OZGER E MAYS, 2003). Ao ocorrer uma dessas falhas, o funcionamento do sistema pode ser comprometido, ou seja, o atendimento aos consumidores não se dará de maneira devida.

Avaliar o desempenho de uma rede de abastecimento de água é entender a limitação do sistema e, para tanto, indicadores apropriados estão sendo propostos na atualidade. A confiabilidade é uma das mais populares medidas para a avaliação da rede de abastecimento, e tem sido largamente incorporada a modelos para projetos e planejamento otimizados.(Zhuang et al., 2013). "A confiabilidade é a capacidade do sistema de atender adequadamente ao abastecimento de água sob condições normais e anormais de funcionamento. (FARMANI et al. 2005a)" (Baños et al., 2011). Para Wagner et al (1988), a confiabilidade de uma rede de abastecimento deve ser definida em termos de medidas (índices) que refletem a magnitude, duração e/ou frequência de interrupções de serviço e falhas de fornecimento.

As condições anormais usualmente decorrem de manutenções, principalmente as emergenciais. Para realizar manutenção em uma rede de distribuição, é necessário que algumas válvulas sejam fechadas para que o abastecimento seja interrompido no local. Ao realizar essa manobra, alguns nós não serão mais abastecidos e algumas

tubulações deixarão de transportar água; conseqüentemente, a pressão disponível na rede de abastecimento sofrerá alteração.

Determinar as válvulas que deverão ser fechadas para realizar manutenção é uma tarefa importante, como observado, mas que é dificultada pelas ramificações da rede. A utilização de uma ferramenta computacional pode reduzir sobremaneira o tempo para a tomada de decisão, bem como a possibilidade de erros que comprometam a segurança e o abastecimento dos setores não isolados. Este estudo propõe o desenvolvimento de uma ferramenta, codificada em ambiente MATLAB (desenvolvido pela MathWorks), que acessa uma biblioteca de ligação dinâmica (DLL) do simulador hidráulico do Epanet (desenvolvido pela Environment Protectin Agency), por intermédio do seu toolkit. A seleção das regiões com maior probabilidade de ruptura e, portanto, as primeiras candidatas à manutenção, é baseada em um modelo não estatístico de previsão de vida útil das tubulações da rede de abastecimento. O fato de o modelo não levar em consideração dados históricos torna a sua previsão ideal para novos projetos, em que não se dispõe desta informação a priori.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Walski (1993) aponta as válvulas como elementos chaves a serem considerados na análise da confiabilidade de uma rede de abastecimento de água. Apesar disso, pouca atenção tem sido dada ao impacto da localização e do número de válvulas sobre esta. Muitos estudos assumem que as válvulas se localizam nas extremidades de todas as tubulações, possibilitando que essas sejam isoladas quando ocorrer uma ruptura. Contudo, na prática, o número de válvulas instaladas não é igual ao número de junções de tubulações.

Além disso, não é sempre que as válvulas são identificadas quando uma falha mecânica ocorre. Jun (2005) propôs um algoritmo para determinar

as válvulas que seriam fechadas e os pontos que deixariam de ser alimentados durante a manutenção da rede. O algoritmo proposto utiliza três Matrizes: A, B e C. A Matriz A representa a relação nó-tubo, a Matriz B representa as ligações nós-tubos que possuem válvulas e a Matriz C é o resultado da diferença entre as matrizes A e B.

Zhuang et al (2013) propôs um outro algoritmo utilizando duas Matrizes, sendo que uma Matriz representa a relação dos nós na rede de abastecimento de água e a outra Matriz representa a relação entre nós e ligações (tubos ou válvulas).

Zhuang et al. (2013) afirmam que um indicador real de confiabilidade de uma rede não deve ignorar as válvulas. Os mesmos autores observam que, uma vez fechadas para isolar a área de ruptura, o volume da água distribuído na rede será reduzido, pois a população na região isolada não será abastecida. Além disso, uma falha hidráulica pode ocorrer devido à baixa pressão causada pelo escoamento nos poucos tubos distribuindo a vazão necessária, decorrente da elevada perda de carga.

2.1 Determinar os tubos com maior probabilidade de manutenção

Os primeiros modelos estudados para determinar os pontos com maior probabilidade de manutenção foram os estatísticos, levando em consideração os dados históricos de manutenção da rede. Rostum (2000) analisou em seu estudo as ferramentas de modelos estatísticos para prever a manutenção na rede de abastecimento de água e concluiu que os modelos de otimização para decisões de reabilitação têm sofrido até agora com modelos "pobres" que descrevem o desenvolvimento de falhas para cada tubo, pois os modelos são determinados a partir de dados históricos. Conforme Rostum (2000), os modelos de previsão de manutenção baseados em registros históricos são modelos específicos de cada sistema e não podem ser generalizados.

Kurita e Dalfré (2008) apresentaram uma proposta de estimativa de vida útil de redes de abastecimento de água levando em consideração a carga externa composta pela ação do solo e o tráfego, pressão interna na tubulação, efeito da temperatura e o momento fletor.

Sarzedas (2009) apresentou uma lista completa dos fatores que causam falhas, sendo eles: projeto inadequado, instalação imprópria, oscilação ou transitório hidráulico, movimento do solo, corrosão interna, diferencial de temperatura, defeito de fabricação e impactos.

Jafar et al (2010) apresentaram a aplicação do Modelo de Redes Neurais Artificiais para analisar as falhas da rede de abastecimento de água em uma cidade no Norte da França. Para o desenvolvimento do seu estudo, foram utilizados dados de manutenção na rede para um período de 14 anos.

“Os métodos baseados apenas em dados de ocorrências e modelagem estatística podem estar ocultando problemas recorrentes nas tubulações, como por exemplo problemas de tráfego de veículos excessivo, problema de carga do solo excessiva ou problemas de ondas de sobrepressão ou subpressão devido a manobras de operação” (SALUSTIANO, 2011).

Pelletier et al (2013) concluíram em seu estudo que as pesquisas futuras relacionadas à previsão de manutenção em um sistema público de distribuição de água deverão focar em quantificar o impacto dos diferentes fatores de risco (diâmetro, tipo de material), pois os sistemas de distribuição pública de água com registros históricos de manutenção pobres terão os parâmetros de calibração estimados com incertezas e comprometendo a precisão dos resultados.

Tombau et al (2014) determinaram um modelo exponencial com base nos diversos modelos exponenciais existentes, sendo os parâmetros desse modelo

obtidos com base em registros de manutenção do sistema de distribuição de água em estudo.

Karimian (2015) desenvolveu um estudo utilizando a Regressão Polinomial Evolutiva para determinar a taxa de manutenção nos trechos de uma rede de distribuição de água, sendo que os fatores dessa regressão foram identificados a partir dos registros históricos do sistema de distribuição de água.

Para Scheidegger et al (2015), os novos modelos de previsão de manutenção em uma rede de abastecimento de água devem buscar ser o mais próximo da realidade do seu

3 METODOLOGIA

A primeira etapa é fornecer para o EPANET o traçado da rede de abastecimento de água, fornecendo, para cada nó, o seu consumo e a cota do terreno; e, para cada trecho, o seu comprimento e o diâmetro. O resultado da simulação desta rede pelo EPANET gerará os dados de carga hidráulica e a pressão disponível em cada nó.

Para que o EPANET execute a simulação na condição das válvulas fechadas, é necessário que lhe seja informado quais válvulas serão fechadas e os nós que não serão mais abastecidos para essa nova situação. A ferramenta proposta neste artigo utilizará apenas uma matriz, denominada *Matriz Rede*, de ordem igual ao número de nós da rede, e que será construída da seguinte maneira:

- O valor célula da linha (*i*) e coluna (*j*) será igual a 0 (zero) se o valor de *i* e *j* são nós que não são interligados na rede de abastecimento de água em análise.
- O valor célula da linha (*i*) e coluna (*j*) será igual a 1 (um) se o valor de *i* e *j* são nós que são interligados na rede de abastecimento de água e essa ligação é um tubo.
- O valor célula da linha (*i*) e coluna (*j*) será igual a 2 (dois) se o valor de *i* e *j* são nós que são interligados na rede de abastecimento de água em análise e essa ligação é uma válvula.

Para exemplificar o descrito anteriormente, será realizado um exemplo com a rede hipotética ilustrada na Figura 1.

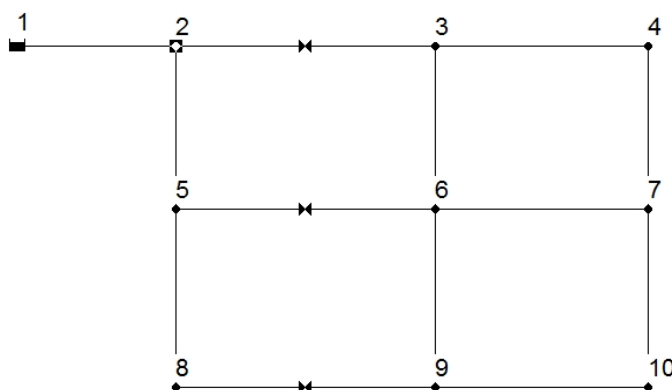


Figura 1 – Exemplo da Rede de Abastecimento de Água

Como se pode observar, o nó 1 está ligado somente ao nó 2 através de um tubo e, portanto, na Matriz linha 1 todos os valores serão igual a 0 (zero), exceto na coluna 2, em que o valor na linha 1 será igual a 1.

O nó 2 está ligado aos nós 1 e 5 com tubos e o nó 2 está ligado ao 3 com uma válvula. Portanto, na linha 2 a coluna 1 e 5 será igual a 1 (um), a coluna

3 o valor será igual a 2 (dois) e as demais colunas iguais a 0 (zero).

Esse mesmo procedimento é repetido para todos os nós até que seja construída a matriz A quadrada de ordem 10. A Figura 2 apresenta a Matriz Rede associada à topologia da rede indicada na Figura 1.

Matriz _ Rede =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0
3	0	2	0	1	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
5	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0
6	0	0	1	0	2	0	1	0	1	0
7	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
8	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0
9	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1
10	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

Número da Linha da Matriz Rede

Número da Coluna da Matriz Rede

Figura 2 – Matriz Rede com a indicação do número das linhas e colunas

Para determinar as válvulas que deverão ser fechadas e os nós que não serão mais abastecidos, será utilizada a Matriz Rede nos seguintes passos:

- 1) Criam-se dois Vetores vazios, sendo um denominado de Vetor Sem Água e o outro Vetor Válvula.
- 2) Determinam-se os nós das extremidades do tubo que necessitarão de manutenção. Armazenam-se os nós desse tubo no Vetor Sem Água.

- 3) Inicia-se a análise da linha da Matriz Rede correspondente ao primeiro número do Vetor Sem Água. O número da coluna que tiver o valor igual a 1 corresponde a um nó que está interligado ao tubo que passará por manutenção, portanto esse nó não receberá água durante a manutenção e será armazenado no Vetor Sem Água (caso esse elemento já exista no Vetor Sem Água, ele não será inserido novamente). O número da coluna que tiver o valor igual a 2 corresponde a um nó que está interligado com a válvula que deverá ser fechada

para a realização da manutenção. A partir dos nós da extremidade desta válvula, que será o número da linha e coluna do elemento 2, é determinada a válvula que deverá ser fechada e armazenada no vetor denominado de Vetor Válvula.

4) Repete-se o processo descrito no item 2, para o próximo número armazenado no Vetor Sem Água. O processo será finalizado quando todos os elementos do vetor sem água forem analisados.

Após realizar todo esse procedimento, os números no Vetor Sem Água são os nós que não receberão água durante a manutenção e o Vetor Válvula são todas as válvulas que deverão ser fechadas para a realização da manutenção.

A partir do exemplo da rede de abastecimento apresentado anteriormente, serão determinadas as válvulas que deverão ser fechadas e os nós que não serão abastecidos por água para a manutenção do tubo cujos nós são 4 e 7.

Os nós 4 e 7 são armazenados no Vetor Sem Água. Inicia-se a análise na linha 4 Matriz Rede (Figura 03) e observa-se que as colunas 3 e 7 possuem o valor igual a 1 e os demais valores são iguais a zero, ou seja, o nó 4 está ligado com o nó 3 através de tubo e também está ligado com o nó 7 através do tubo. Somente o nó 3 será armazenado no Vetor Sem Água, pois o nó 7 já existe no Vetor. Concluiu-se que os nós 4, 3 e 7 (Figura 04) não serão abastecidos por água durante a manutenção.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0
3	0	2	0	1	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
5	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0
6	0	0	1	0	2	0	1	0	1	0
7	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
8	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0
9	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1
10	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

Figura 3 – Matriz Rede com a linha 4 destacada

$$Vetor_Sem_Água = [4, 3, 7]$$

Figura 4 – Vetor Sem Água após a análise do nó 4

O próximo passo é determinar os nós ligados aos nós 3 e 7. Na linha 3 (Figura 05) verifica-se que o nó possui o valor de 2 na coluna 2, o valor 1 nas colunas 4 e 6 e o restante igual a zero. A ligação entre os nós 3 e 2 é uma válvula, e a ligação entre os nós 3 e 6 e 3 e 4 são tubos. A válvula cujos nós de extremi-

dades são os 3 e 2 é a primeira válvula que deverá ser fechada (Figura 07) para a realização da manutenção e, portanto, não é necessário determinar os nós com ligação com o nó 2. Como o nó 4 já existe no Vetor Sem Água, somente o nó 6 será inserido.

Na linha 7 (Figura 05), as colunas 4, 6 e 10 possuem o valor 1. Como os nós 4 e 6 já existem no Vetor Sem Água, somente o nó 10 será inserido (Figura 06).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0
3	0	2	0	1	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
5	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0
6	0	0	1	0	2	0	1	0	1	0
7	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
8	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0
9	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1
10	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

Figura 5 – Matriz Rede com as Linhas 3 e 7 destacadas

$$Vetor_Sem_Água = [4, 3, 7, 6, 10]$$

Figura 6 – Vetor Sem Água após a análise dos nós 3 e 7

$$Vetor_Válvula = [2 - 3]$$

Figura 7 – Vetor Válvula após a análise dos nós 3 e 7

Após a última análise, o Vetor Sem Água está composto pelos nós 4, 3, 7, 6 e 10. Como os nós 4, 3 e 7 já foram analisados, falta analisar os nós 6 e 10. A linha 6 da Matriz Rede (Figura 08) possui o número 1 (um) na coluna 3, 7 e 9. Será acrescentado no Vetor Sem Água (Figura 09) somente o nó 9, pois os nós 4 e 3 já foram inseridos anteriormente. A linha 10 possui o número 1 (um) na coluna 7 e 9. Como o Vetor Sem Água já possui os nós 7 e 9, não será inserido um novo nó.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0
3	0	2	0	1	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
5	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0
6	0	0	1	0	2	0	1	0	1	0
7	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
8	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0
9	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1
10	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

Figura 8 – Matriz Rede com as Linha 6 e 10 destacadas

$$Vetor_Sem_Água = [4, 3, 7, 6, 10, 9]$$

Figura 9 - Vetor Válvula após a análise dos nós 6 e 10

Na linha 6 verifica-se que o nó possui o valor de 2 na coluna 5, portanto a ligação entre os nós 6 e 5 é uma válvula. A válvula cujos nós nas extremidades são 5 e 6 deverá ser fechada para a realização da manutenção e será incluída no Vetor Válvula (Figura 10).

$$Vetor_Válvula = [2 - 3, 5 - 6]$$

Figura 10 – Vetor Válvula após a análise dos nós 6 e 10

Após a última análise, o Vetor Sem Água está composto pelos nós 4,3,7,6, 10 e 9. Como os nós 4, 3, 7, 6 e 10 já foram analisados, falta analisar o nó 9. A linha 9 da Matriz Rede (Figura 11) possui o número 1 (um) na coluna 6 e 10. Não será acrescentado nenhum valor no Vetor Sem Água, pois os nós 6 e 10 já foram analisados anteriormente.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0
3	0	2	0	1	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
5	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0
6	0	0	1	0	2	0	1	0	1	0
7	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
8	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0
9	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1
10	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

Figura 11 - Matriz Rede com as Linha 9 destacada

Na linha 9 verifica-se que o nó possui o valor 2 na coluna 8, e, portanto, a ligação entre os nós 9 e 8 é uma válvula. A válvula cujos nós de extremidades são 8 e

9 deverá ser fechada para a realização da manutenção e será incluída no Vetor Válvula (Figura 12).

$$Vetor_Válvula = [2 - 3, 5 - 6, 8 - 9]$$

Figura 12 – Vetor Válvula após a análise do nó 9

Todos os nós do Vetor Sem Água já foram analisados, portanto os nós que terão demanda zero de água são os nós presentes no Vetor Sem Água e as válvulas que deverão ser fechadas são as válvulas do Vetor Água.

Todo esse processo descrito anteriormente é realizado pelo Matlab, que fornece essas informações ao EPANET (as válvulas que serão fechadas são as válvulas que estão inseridas no vetor válvula e as demandas dos nós que serão alteradas para igual a zero são os nós presentes no vetor sem água), para que ele realize a simulação da rede com as válvulas fechadas. O Matlab recebe os valores da pressão dos nós do EPANET após a nova simulação e analisa a pressão nos nós em relação ao mínimo estabelecido.

3.1 Determinar o trechos com maior probabilidade de manutenção.

Kurita e Dalfré (2008) propuseram um modelo para prever os trechos da rede de abastecimento de água com maior probabilidade de ruptura com base nas tensões devidas à carga externa, pressão interna, diferencial de temperatura e momento fletor. O Modelo de Kurita e Dalfré (2008) considera o trecho com maior probabilidade de ruptura, o trecho que possui a maior tensão total que corresponde à soma de todas as tensões citadas anteriormente.

Ao contrário das demais propostas apresentadas, o modelo proposto por Kurita e Dalfré (2008) não leva em consideração os dados históricos, o que

torna a sua previsão para a manutenção ideal para projetos de novas redes de abastecimento e para redes existentes, já que grande parte das empresas de abastecimento de água não tem registros históricos de manutenção.

Cada termo da parcela refere-se a um fator de influência na tensão circunferencial total. σ_{θ}^w é a tensão causada pela carga externa composta pela ação do solo e/ou tráfego. σ_{θ}^{Pi} é a tensão relacionada à pressão interna no conduto. σ_{θ}^T é a tensão devida ao efeito da temperatura e σ_{θ}^f é a tensão gerada pela ação do momento fletor longitudinal.

A equação 1 mostra a parcela da carga do solo e/ou tráfego.

$$\sigma_{\theta}^w = q \left(\frac{3D}{\pi t^2} \right) - \text{equação 1}$$

As variáveis são o diâmetro D (em m), a espessura do conduto t (em m) a carga externa q (em N/m).

$$\sigma_{\theta}^T = \frac{\alpha_p E_p \Delta T}{2(1-\nu) \ln(r_o / r_i)} \left[1 - \ln\left(\frac{r_o}{r}\right) - \frac{r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \right] - \text{equação 4}$$

em que r_o é a distância entre o centro do tubo até a parede externa do tubo (em m), r_i é a distância entre o centro do tubo até a parede interna do tubo (em m), e r é a distância entre o centro do conduto até um ponto qualquer. Neste caso, r será a distância entre o centro e um ponto intermediário da espessura da parede (em m), α_p é o coeficiente de dilatação térmica do tubo ($\alpha_p = 79 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), E_p é o módulo de elasticidade do tubo ($E_p = 2.250.000.000 \text{ Pa}$), ΔT é a variação da temperatura ($\Delta T = 5^\circ\text{C}$) e ν é o coeficiente de Poisson do tubo para tubo plástico ($\nu = 0,42$).

A equação 2 mostra a parcela referente ao termo do efeito da pressão interna :

$$\sigma_{\theta}^{Pi} = (P_i) \left(\frac{D-t}{2t} \right) - \text{equação 2}$$

Onde P_i é a pressão interna da tubulação (em N/m²).

Como consequência do efeito do coeficiente de Poisson no sentido longitudinal, haverá um fator devido à flexão afetando a tensão circunferencial, dado pela Equação 3:

$$\sigma_{\theta}^f = -\nu \left(\frac{M_x D}{2I_z} \right) - \text{equação 3}$$

em que M_x é o momento fletor, I_z é o momento de inércia da seção do conduto (em m⁴) e ν é o coeficiente de Poisson para tubo plástico ($\nu = 0,42$).

A diferença da temperatura entre o solo e o conduto gera tensões circunferenciais, como descrito na equação 4 :

As redes de abastecimento de água no Brasil em sua maioria são executadas com tubos de PVC para tubos com diâmetro externo até 110 mm e DEFOFO MPVC para os tubos com diâmetro acima de 110 mm. Os valores da espessura das paredes e dos diâmetros internos e externos são obtidos a partir da ABNT NBR 5647-1 (Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos e conexões de PVC 6,3 com junta elástica e com diâmetros nominais até DN 100) e da ABNT NBR 7665 : 2007 (Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica).

Os valores do carregamento do tráfego, a variação de temperatura e a profundidade da tubulação são características específicas do local de cada rede de abastecimento de água.

Na figura 13 é apresentado o fluxograma do funcionamento da ferramenta desenvolvida, que irá subsidiar a análise da confiabilidade mecânica da rede. A análise ocorre somente para um único trecho considerado crítico.

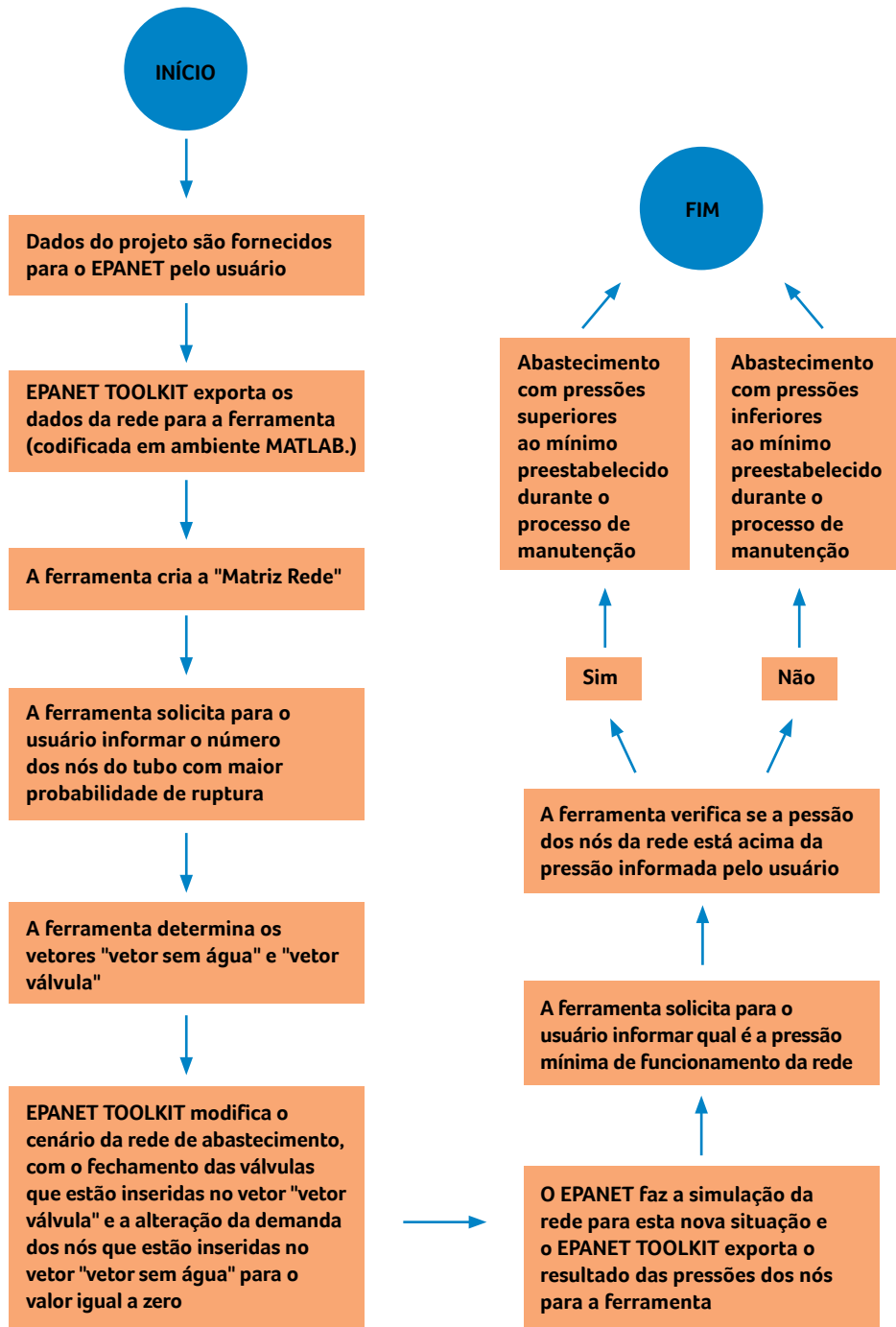


Figura 13 – Fluxograma do processo de análise da Confiabilidade Mecânica

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para ilustrar o funcionamento da ferramenta desenvolvida, será utilizado o exemplo de um projeto de rede de abastecimento de água desenvolvido pelo próprio autor com os dados de numeração dos nós, cota e consumos apresentados na Tabela 1, adotados hipoteticamente.

Neste trabalho, em todos os trechos será considerado hipoteticamente o valor do carrega-

mento do tráfego de veículos $q = 271,3 \text{ N/m}$, a variação de temperatura de $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ e a profundidade de toda a tubulação igual a 1,50m de profundidade.

Os valores de carga hidráulica e pressão são resultados da simulação do sistema por meio do EPANET e são apresentados na Tabela 1. A Figura 14 apresenta a rede representada no EPANET com a identificação dos nós e trechos.

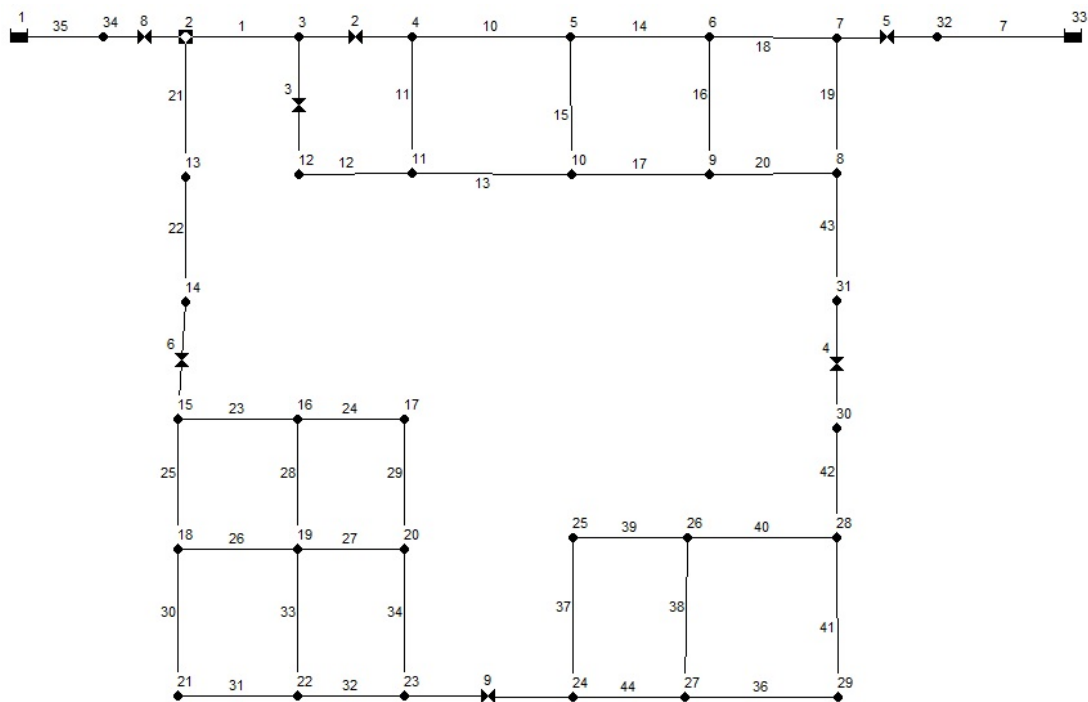


Figura 14 – Rede de abastecimento água hipotética com a numeração dos nós e trechos

A Tabela 1 mostra os nós e os respectivos valores de Cota de Terreno em metros, Consumo em litros por segundo por nó e os valores de Carga

Hidráulica em m.c.a e Pressão Disponível em m.c.a que são gerados a partir da simulação da rede no EPANET.

Tabela 1 - Nós com os respectivos valores de Cota do Terreno (em m), Consumo (em l/s), Carga Hidráulica (em m.c.a) e Pressão disponível (em m.c.a.)

Id Nó	Cota (m)	Consumo (LPS)	Carga Hidr. (m.c.a)	Pressão (m)
Nó 2	85	0.3	97.35	12.35
Nó 3	80	1.5	91.43	11.43
Nó 4	68	1	91.43	23.43
Nó 5	64	0.6	86.83	22.83
Nó 6	60	1.5	82.47	22.47
Nó 7	65	0.5	79.28	14.2
Nó 8	60	1.2	79.19	19.19
Nó 9	66	0.4	82.48	16.48
Nó 10	60	0.4	86.71	26.71
Nó 11	67	0.4	91.23	24.23
Nó 12	80	0.5	91.43	11.43
Nó 13	83	0.1	96.22	13.22
Nó 14	75	0.2	95.02	20.02
Nó 15	75	0.2	95.02	20.02
Nó 16	72	0.1	87.55	15.55
Nó 17	73	0.1	85.96	12.96
Nó 18	74	0.5	87.14	13.14

Id Nó	Cota (m)	Consumo (LPS)	Carga Hidr. (m.c.a)	Pressão (m)
Nó 19	73	0.3	84.98	11.98
Nó 20	70	0.2	84.42	14.42
Nó 21	69	0.3	85.59	16.59
Nó 22	72	0.1	84.87	12.87
Nó 23	65	0.1	79.96	14.96
Nó 24	68	1.2	79.66	11.96
Nó 25	66	1	79.16	13.16
Nó 26	65	1	79.15	14.15
Nó 27	69	1.2	79.28	10.28
Nó 28	65	1	79.16	14.16
Nó 29	64	1.2	79.16	15.16
Nó 30	65	0.6	79.16	14.16
Nó 31	69	0.9	79.16	10.16
Nó 32	69	0	79.2	10.2
Nó 34	86	0	97.35	11.35
RNF 1	100	-53.39	100	0
RNF 33	78	34.79	78	0

Tabela 2 – Trechos com respectivos Comprimentos e Diâmetros.

Tubo	Comp. (m)	Diâm Ext. (m)	Espes. (m)	Diâm. Int. (m)
1	150	0.17	0.0068	0.1564
10	150	0.17	0.0038	0.1624
11	40	0.085	0.0039	0.0772
12	120	0.06	0.0027	0.0546
13	120	0.06	0.0027	0.0546
14	150	0.17	0.0068	0.1564
15	50	0.06	0.0027	0.0546
16	50	0.06	0.0027	0.0546
17	100	0.06	0.0027	0.0546
18	120	0.17	0.0068	0.1564
19	120	0.17	0.0068	0.1564
20	120	0.06	0.0027	0.0546
21	110	0.11	0.0039	0.1022
22	120	0.11	0.0039	0.1022
23	110	0.06	0.0027	0.0546
24	110	0.06	0.0027	0.0546
25	100	0.06	0.0027	0.0546
26	110	0.06	0.0027	0.0546
27	50	0.06	0.0027	0.0546

Tubo	Comp. (m)	Diâm Ext. (m)	Espes. (m)	Diâm. Int. (m)
28	120	0.06	0.0027	0.0546
29	120	0.06	0.0027	0.0546
30	110	0.06	0.0027	0.0546
31	110	0.06	0.0027	0.0546
32	100	0.06	0.0027	0.0546
33	120	0.11	0.0048	0.1004
34	120	0.06	0.0027	0.0546
36	120	0.085	0.0039	0.0772
37	100	0.06	0.0027	0.0546
38	120	0.06	0.0027	0.0546
39	100	0.06	0.0027	0.0546
40	100	0.11	0.0048	0.1004
41	120	0.11	0.0048	0.1004
42	120	0.17	0.0068	0.1564
43	100	0.17	0.0068	0.1564
44	120	0.085	0.0039	0.0772
7	50	0.17	0.0068	0.1564
35	50	0.17	0.0068	0.1564

O trecho com maior probabilidade de manutenção será o trecho que possuir a maior Tensão Total, sendo a Tensão Total a soma da Tensão devida a Carga Externa, Pressão Interna, Momento Fletor Longitudinal e Diferença de Temperatura.

O valor da pressão interna nas tubulações será a média aritmética das pressões nas extremidades da tubulação. A tabela 3 mostra cada uma das tensões atuantes na tubulação e a tensão total em cada tubo.

Tabela 3 – Trechos com as respectivas tensões do sistema de abastecimento de água

Tubo	Ten. Carga Externa (MPa)	Tem. Pressão Interna (MPa)	Tem. Mom. Fletor (MPa)	Tem. Dif. Temp. (MPa)	Tem. Total (MPa)
1	0.95	2.85	5.00	0.0106	8.81
10	3.05	10.12	5.00	0.0058	18.17
11	1.45	4.96	19.99	0.0123	26.40
12	2.13	3.78	40.11	0.0120	46.04
13	2.13	5.41	40.11	0.0120	47.66
14	0.95	5.44	5.00	0.0106	11.40
15	2.13	5.26	40.11	0.0120	47.52
16	2.13	4.13	40.11	0.0120	46.39
17	2.13	4.58	40.11	0.0120	46.84
18	0.95	4.40	5.00	0.0106	10.36
19	0.95	4.01	5.00	0.0106	9.97
20	2.13	3.78	40.11	0.0120	46.04
21	1.87	3.48	11.93	0.0094	17.30
22	1.87	4.52	11.93	0.0094	18.34
23	2.13	3.77	40.11	0.0120	46.03
24	2.13	3.03	40.11	0.0120	45.28
25	2.13	3.52	40.11	0.0120	45.78
26	2.13	2.67	40.11	0.0120	44.92
27	2.13	2.80	40.11	0.0120	45.06
28	2.13	2.92	40.11	0.0120	45.18
29	2.13	2.91	40.11	0.0120	45.16
30	2.13	3.15	40.11	0.0120	45.41
31	2.13	3.13	40.11	0.0120	45.39
32	2.13	2.95	40.11	0.0120	45.21
33	1.24	2.72	11.93	0.0116	15.91
34	2.13	3.12	40.11	0.0120	45.38
36	1.45	2.65	19.99	0.0123	24.09
37	2.13	2.67	40.11	0.0120	44.92
38	2.13	2.59	40.11	0.0120	44.85
39	2.13	2.90	40.11	0.0120	45.16
40	1.24	3.10	11.93	0.0116	16.29
41	1.24	3.21	11.93	0.0116	16.40
42	0.95	3.40	5.00	0.0106	9.36
43	0.95	3.52	5.00	0.0106	9.48
44	1.45	2.31	19.99	0.0123	23.76
7	0.95	2.30	5.00	0.0106	8.26
35	0.95	3.04	5.00	0.0106	9.00

De acordo com a Tabela 3, a tubulação do Trecho 13 apresenta a maior tensão total e, consequentemente, possui maior probabilidade de ruptura na rede. Os nós localizados nas extremidades da tubulação 13 são os nós 11 e 10. O primeiro passo é informar para o sistema um dos nós das extremidades no tubo em que poderá ocorrer a falha; o sistema informará as válvulas que serão fechadas e os nós que serão abastecidos e os nós que não serão abastecidos com o fechamento das válvulas. Essas informações são fornecidas pelo Matlab de maneira rápida para o Epanet, de modo que o

mesmo execute a simulação da rede de abastecimento de água com estas condições.

As informações geradas pelo sistema são as seguintes :

- Pontos que possuem água: 1; 34; 2; 3; 13; 14; 15; 16; 18; 17; 19; 21; 20; 22; 23; 24; 25; 27; 26; 29; 28; 30; 32; 33.

- Pontos sem abastecimento de água: 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 31.

- Válvulas a serem fechadas : 2; 3; 4; 5.

O último passo é analisar a pressão dos nós na situação da rede em manutenção com relação à pressão mínima de serviço. Como a pressão mínima de serviço nos sistemas de abastecimento de água oscila entre os municípios, é necessário informar esse valor.

Se as pressões nos nós da rede, que continuarão sendo abastecidos por água durante a manutenção, forem superiores ao mínimo informado, aparecerá para o usuário a seguinte mensagem: “Abastecimento com pressão superior ao mínimo preestabelecido durante o processo de manutenção”. Se, em pelo menos um nó a pressão for inferior ao mínimo, uma mensagem aparecerá para o usuário: “Abastecimento com pressão inferior ao mínimo preestabelecido durante o processo de manutenção”. Junto com essa mensagem são apresentadas as pressões nos nós da rede durante a manutenção do sistema. A Tabela 4 apresenta os valores das pressões nos respectivos nós.

Tabela 4 – Valores das pressões nos nós da rede durante a simulação da manutenção com maior probabilidade de ocorrência.

Nó	Pressão (mca)	Nó	Pressão (mca)
2	14.85	22	8.5
3	19.84	23	6.28
13	15.12	24	3.28
14	21.28	25	3.57
15	21.28	26	4.27
16	12.4	27	0.76
17	8.83	28	4.26
18	9.97	29	5.3
19	7.27	30	4.26
20	9.28	32	9
21	12.5	34	13.85

Nesse exemplo, o algoritmo informou que a solução da rede de abastecimento analisada terá pressão inferior ao mínimo preestabelecido durante a manutenção da rede. Abaixo dessa informação estão as pressões nos nós para esse novo cenário, e pode-se observar que os nós 17 a 20, 22 a 30 e 32 terão pressão inferior ao mínimo de 10 m.c.a, pressão informada como o menor valor de pressão admitido para um abastecimento normal,

no exemplo, ou seja, durante a manutenção do trecho 13 os usuários da rede serão abastecidos com vazão inferior à sua demanda, ou serão atendidos de modo precário.

A ferramenta desenvolvida auxilia o projetista durante a elaboração de projetos mais eficientes, informando a pressão em todos os nós, para o cenário da manutenção da rede. O projetista, de posse desses dados, analisará a necessidade do abastecimento dos nós afetados com relação ao abastecimento interrompido e com pressão adequada.

Para se classificar que uma rede não possui confiabilidade mecânica, deve-se considerar para os nós afetados (com pressão inferior ao mínimo pré-determinado) a necessidade de não ter o abastecimento interrompido, a possibilidade do abastecimento com pressão reduzida, a quantidade de consumidores afetados, o custo para a implantação dessas melhorias e etc.

5 CONCLUSÃO

Como a água é um elemento indispensável para a vida de uma população, qualquer interrupção no seu fornecimento gera grandes transtornos ao usuário. Foi apresentada neste estudo uma ferramenta amigável e eficiente desenvolvida em MATLAB, associada ao EPANET TOOLKIT, para analisar a confiabilidade mecânica de uma rede de abastecimento de água. A ferramenta informa ao usuário de maneira rápida e precisa quais são as válvulas que deverão ser fechadas, os nós que não serão abastecidos, os nós que serão abastecidos e a pressão nestes, para o cenário de manutenção com maior probabilidade de manutenção.

A ferramenta apresentada é útil para auxiliar o projetista na avaliação da necessidade de redimensionar a rede de abastecimento de água, determinar as melhores posições para instalações de válvulas na rede de abastecimento e analisar o funcionamento do sistema durante eventos de manutenção

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 5647-1:2004 Versão Corrigida: 2007 (Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos e conexões de PVC 6,3 com junta elástica e com diâmetros nominais até DN 100) – Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro, Brasil
- ABNT NBR 7665 : 2007 (Sistemas para adução e distribuição de água –Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos) - Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro, Brasil
- BAÑOS, R. et al. Resilience Indexes for Water Distribution Network Design: A Performance Analysis Under Demand Uncertainty. **Water Resources Management**, v. 25, n. 10, p. 16, 2011.
- JAFAR, R.; SHAHROUR, I.; JURAN, I. Application of Artificial Neural (ANN) to model the failure of urban water mains. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 51, p. 11, 2010.
- JUN, H. **Strategic valve locations in a water distribution system**. 2005. 190 (Doutorado em Filosofia em Engenharia Civil e Ambiental). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- KARIMIAN, S. F. **Failure Rate Prediction Models of Water Distribution Networks**. 2015. 134 (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- KURITA, R. Y.; DALFRÉ, J. G. **Modelo para previsão de manutenção em sistemas de distribuição de água**. Unicamp, Campinas. 2008
- OZGER, S. S.; MAYS, L. W. A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distributions networks. **Thirtieth Congress, International Association of Hydraulic Research**, 2003, Thessaloniki, Greece. p.8.
- PELLETIER, G.; MAILHOT, A.; VILLENEUVE, J.-P. Modeling Water Pipe Breaks - Three Case Studies. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 2, p. 115-123, 2003.
- ROSTUM, J. Statistical Modelling of Pipe Failure in Water Networks. 2000. 104 (Doutorado em Engenharia). Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology NTNU, Trondheim, Norway.
- SALUSTIANO, A. L. S. **Análise Reversa de um Modelo de Previsão de Manutenção em Redes de Abastecimento de Água**. 2011. 125 (Doutorado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SARZEDAS, G. L. **Planejamento para a substituição de tubulações em sistemas de abastecimento de água. Aplicação na rede de distribuição de água da Região Metropolitana de São Paulo**. 2009. 113 (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SCHEIDEGGER, A.; LEITÃO, J. P.; SCHOLTEN, L. Statistical failure models for water distribution pipes - A review from a unified perspective. **Water Res**, v. 83, p. 237-47, Oct 2015. ISSN 1879-2448.
- TOMBAU, B. et al. General Model for Water-Distribution Pipe Breaks: Development, Methodology, and Application to a Small City in Quebec, Canada. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. Vol. 5, n. Issue 1, p. 9, 2014.
- WALSKI, T. M. Water distribution valve topology for reliability-analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 42, n.1, p.21-27, 1993
- WAGNER, J.M; Shamir, U.; Marks, D.H.. WATER DISTRIBUTION RELIABILITY: ANALYTICAL METHODS. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.114, p.23, 1988
- ZHUANG, B.; LANSEY, K.; KANG, D. Resilience/Availability Analysis of Municipal Water Distribution System Incorporating Adaptive Pump Operation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, p. 11, 2013.