

I-144 – AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE TRANSITÓRIO HIDRÁULICO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Mariele de Souza Parra Agostinho⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento, da UFPR. Engenheira Civil na Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Engenharia Hidráulica na Universidade Federal do Paraná. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Toronto. Professor Associado do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná.

Endereço⁽¹⁾: Avenida João Gualberto, 1259, 10º Andar - Juvevê - Curitiba - PR - CEP: 80.030-001 - Brasil - Tel: +55 (41) 3582-2162 - e-mail: marielespa@sanepar.com.br

RESUMO

O principal objetivo deste estudo é avaliar a potencial sensibilidade de eventos de transitório hidráulico em redes de distribuição de água, usando 14 indicadores. Este estudo também procura descobrir como os efeitos de inércia e compressibilidade são potencialmente relevantes, determinar estratégias de proteção para atenuar eventos transitórios e diminuir o risco de ruptura da tubulação causada por elevação e/ou excesso de pressão. Um total de 208 cenários de três redes de distribuição de água na Região Metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil: RVAM, GAAV e GEAV, foram considerados e comparados. Os 14 indicadores de transitórios foram utilizados para realizar uma análise de sensibilidade a: celeridade, vazão, número de junções, diferentes dispositivos de proteção e zonas de pressão. Este estudo comprovou a forte necessidade deste estudo nos sistemas do Brasil, onde ainda faltam diretrizes transitórias para a proteção da rede de distribuição. O estudo de diferentes zonas de pressão (RVAM, GAAV e GEAV) indicou que o risco não é um caso isolado em uma rede específica, mas comum e frequente em todas elas. Os diferentes materiais provaram a forte influência da celeridade durante a simulação, enquanto os materiais plásticos (PVC e PEAD) apresentaram resultados semelhantes, o ferro dúctil apresentou resultados bastante diferentes e complicados. A análise transitória hidráulica de sistemas esquelizados e completos provou a imprecisão e o perigo da esquelização do modelo, uma vez que pode subestimar ou superestimar a análise.

PALAVRAS-CHAVE: Transitório hidráulico, Rede de distribuição de água, Indicadores.

INTRODUÇÃO

Transitório Hidráulico é um fenômeno que ocorre sob condições de fluxo instável como uma consequência de comunicação que é transmitida como uma onda de pressão no sistema de tubulação (Chaudhry, 1979). Como o golpe de aríete pode ser desastroso, a busca por indicadores tem sido uma tarefa importante, mas desafiadora. Sistemas de Distribuição de Água são sistemas muito especializados e totalmente integrados, sendo que seus principais desafios estão associados a: altos custos de energia, escassez de água, vazamento contínuo, frustração do cliente e ameaças associadas a eventos transitórios, que contribuem para altos custos do sistema e impactos ambientais, como é descrito mundialmente e de grande preocupação no Brasil (Karney, 2014).

Atualmente, os estudos de transitórios hidráulicos exigidos pelas empresas brasileiras de saneamento estão limitados às adutoras de água e tubulações de recalque de esgoto e, a maioria deles apresenta baixo nível técnico e com erros de concepção básica. Além disso, não há diretrizes nacionais para estudar transitórios em redes de distribuição de água no Brasil.

O principal objetivo deste estudo é avaliar a potencial sensibilidade de eventos transitórios sob a representação de três topologias reais distintas de redes de distribuição usando 14 indicadores, os quais estão resumidos na Tabela 1. Este estudo visa descobrir como os fenômenos de inércia e compressibilidade são potencialmente relevantes, determinar estratégias de proteção para atenuar eventos transitórios e diminuir o risco de ruptura de

tubulações por elevação e/ou excesso de pressão, o que acaba por contribuir para a máxima proteção do sistema, a redução da perda de água e a salvaguarda da saúde pública.

MATERIAIS E MÉTODOS

Indicadores

Jung e Karney (2006) propõem um método para aperfeiçoar a seleção preliminar, o dimensionamento e a colocação de dispositivos hidráulicos em um sistema de tubulações para controlar sua resposta transitória, que é a solução ideal global usando algoritmo genético e um método computacional que otimiza um problema tentando iterativamente melhorar uma solução candidata com relação a uma determinada medida de qualidade (PSO), envolvendo uma combinação desconhecida de dispositivos hidráulicos para lidar eficazmente com as condições transitórias, considerando três funções objetivas simples: (1) minimizar a pressão máxima; (2) maximizar a pressão mínima; e (3) minimizar a diferença entre a pressão máxima e a pressão mínima no sistema.

Além disso, Shinozuka & Dong (2005) estudaram comportamentos transitórios do sistema resultantes de rupturas na tubulação e mau funcionamento do equipamento devido a riscos naturais e provocados pelo homem, incluindo ataque terrorista, usando o método de detectar e localizar rapidamente o dano / mau funcionamento em um sistema de distribuição de água aproveitando mudanças bruscas de parâmetros hidráulicos, tais como pressão e vazão em eventos de desastre. Para este propósito, o código HAMMER foi usado integrado a uma plataforma ARC/GIS para que os recursos de inventário, operacionais e de gerenciamento pudessem ser integrados na análise transitória no início. Eles demonstraram por simulação numérica que a gradiente local da pressão, por exemplo, pode servir como assinatura chave para encontrar a fonte de dano/mau funcionamento.

Para avaliar o risco, Radulj (2009) propôs um índice chamado de Índice de Risco Transitório (TRI). O objetivo de um TRI é avaliar o risco cumulativo de todos os eventos transitórios para um período de monitoramento de pressão e, em seguida, idealmente estendê-lo para a vida útil completa de um sistema. A noção básica aqui é que eventos transitórios de pequena magnitude (tanto positivos quanto negativos) ocorrem frequentemente, mas com consequências menores, e os eventos de grande magnitude (positivos e negativos) ocorrem com pouca frequência, mas com alta consequência. Diferentemente do caso de uma análise de risco tradicional, não é apenas o evento raro e de alta consequência que apresenta um risco para o sistema, mas, na verdade, é o efeito combinado de todos os eventos. Embora o TRI provavelmente não seja a única métrica ou abordagem viável, os índices do sistema, como esses, são muito fáceis de entender, comparar e, portanto, são bastante úteis para entender o desempenho transitório e, portanto, o risco de um sistema.

Por outro lado, Jung & Karney (2011), a fim de determinar um projeto ideal de rede de distribuição de água e minimizar os efeitos de um evento transitório, propôs um índice chamado Fator Potencial de Dano de Surto (SDPF). O SDPF é a integral das pressões transitórias que são inferiores ao nível mínimo ou superior ao nível máximo. Estes níveis são determinados pelo usuário como uma porcentagem de sobre e sob pressão em relação à pressão de estado estacionário inicial. Martin (1983) introduziu o índice de gravidade da cavitação $S = Tcs_a / (2L)$, inferindo a duração da cavitação, Tcs . Friedman et al. (2004) confirmou que transitórios de pressão negativa podem ocorrer no sistema de distribuição e que a água intrusa pode viajar a jusante do local de entrada. Os locais com maior potencial de intrusão foram os locais com vazamentos e quebras, áreas de lençol freático alto e abóbadas de vácuo de ar alagadas.

Neste estudo, as métricas apresentadas foram aplicadas em simulações de zonas de pressão de um sistema real de distribuição de água com algumas modificações e / ou adaptações, conforme apresentado na Tabela 1.

Para calcular os indicadores C1, C2, C6 a C9 e C12, foi criado um programa no RSTUDIO que é um ambiente de desenvolvimento integrado livre e de fonte aberta para R, uma linguagem de programação para computação estatística e gráfica. Este programa importa arquivos de saída do programa de simulação hidráulica transitória, Hammer (Bentley Systems, 2017). Gráficos e demais indicadores foram feitos no Excel.

Tabela 1: Indicadores

Risco	Indicadores	Autor	Código	Definição das variáveis
Avaliação do Risco associado à pressão negativa	Potencial de intrusão	Friedman et al. 2004	C1	Nº de junções com pressão < 0 m.c.a.
		Friedman et al. (2004) adaptado	C 2	% de junções com pressão < 0 m.c.a.
	Cavitação		C 3	Nº de junções com pressão de vácuo
			C 4	Tempo total de cavitação
	Índice da severidade da cavitação (S)	Martin (1983)	C 5	$S = \frac{T_{sc}a}{2L}$ a=celeridade; T _{SC} =duração quando ocorre cavitação; L=comprimento
	Fator de Dano Potencial Transitório (SPDF)	Jung and Karney (2011) adaptado	C 6	$SPDF = \frac{\int_{i=1}^{N_{nodes}} H_i dt}{junções}$ H _i = pressão em cada nó < H _{min} (pressão mínima permitida)
C 7			$SPDF^+ = \frac{\int_{i=1}^{N_{nodes}} H_i dt}{junções}$ H _i = pressão em cada nó > H _{max} (pressão máxima permitida)	
C 8			$SPDF = \frac{\int_{i=1}^{N_{nodes}} H_i dt}{junções}$ Hi > H _{max} or <H _{min}	
Avaliação do Risco associado à pressão negativa e positiva	Range de pressão	Jung & Karney (2006)	C 9	$\Delta P = H_{max} - H_{min}$ Diferença entre pressão máxima e mínima
	Hmax		C10	Pressão Mínima
	Hmin		C11	Pressão Máxima
	Índice do Risco de Transitório Positivo e Negativo	Radulj (2009) adaptado	C12	$TRI^- = \frac{\int_0^{t^+} P_{min} dt}{junções}$
			C13	$TRI^+ = \frac{\int_0^{t^+} P_{max} dt}{junções}$
Avaliação do Risco associado à variação de pressão	Índice de dano (D)	Shinozuka & Dong (2005)	C14	$D = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1}$ H ₂ e H ₁ = pressão em cada nó no tempo t ₁ e t ₂ , respectivamente.

Estudo de caso

Um total de 208 cenários de três redes de distribuição de água na Região Metropolitana de Curitiba: RVAM, GAAV e GEAV foram estudados. O fluxograma do estudo de caso é apresentado na Figura 1. Para simular o transitório hidráulico da zona de pressão RVAM definiu-se 13 macros cenários, conforme apresentado na Tabela 2a. Para cada um desses cenários, foram realizadas oito simulações, conforme apresentado na Tabela 2b, totalizando 104 cenários. Para simular o transitório hidráulico das zonas de pressão GAAV e GEAV definiu-se também 13 macros cenários conforme apresentado na Tabela 3a e para cada um desses cenários foram feitas quatro simulações, como na Tabela 3b, totalizando 52 cenários para cada rede.

Embora os sistemas sejam hidráulicamente independentes, a simulação foi realizada considerando o sistema completo. A rede RVAM foi representada por 218 junções, enquanto as redes GAAV e GEAV foram representadas por 566 e 670, respectivamente, produzindo um arquivo com 2.454 junções que foram simuladas por 240 segundos com intervalos de 0,3 segundos, ou seja, 800 etapas simuladas em cada cenário, e a causa do transitório hidráulico foi configurada para ocorrer 2 segundos após o início. A execução da simulação requer cerca de 10 minutos para a representação completa e 3 minutos para o esqueleto. Este arquivo foi carregado no software R para calcular os indicadores C1, C2, C6 a C9 e C12.

Tabela 2: RVAM: macro e micro cenários

Macro cenário	Material	Proteção
NP – PVC	PVC 0,6	Não
P1a - PVC	MPa	Ventosas
P1b - PVC	PVC 1 MPa	Ventosas
P2 – PVC	PVC 0,6 MPa	Chaminé de equilíbrio
P3 – PVC		RHO
NP – FD	FERRO DÚCTIL	Não
P1 – FD		Ventosas
P2 – FD		Chaminé de equilíbrio
P3 – FD		RHO
NP – PEAD	PEAD 1 MPa	Não
P1 – PEAD		Ventosas
P1 – PEAD		Chaminé de equilíbrio
P3 - PEAD		RHO

Micro cenário	Tubulações simuladas	Nº de junções	Causa do Transitório	Vazão
A 1 Max	Todas	1218	Desligamento repentino na elevatória RVAM e no booster	Máxima (duas bombas)
A 1 Min				Mínima (uma bomba)
S 1 Max	Rede esqueletizada	554		Máxima (duas bombas)
S 1 Min				Mínima (uma bomba)
A 2 Max	Todas	1218	Desligamento repentino na elevatória RVAM	Máxima (duas bombas)
A 2 Min				Mínima (uma bomba)
S 2 Max	Rede esqueletizada	554		Máxima (duas bombas)
S 2 Min				Mínima (uma bomba)

Tabela 3: GEAAV e GAAV: macro e micro cenários

Tabela 3: GEAV e GAAV - Causa do Macro e Micro cenários								
Macro cenário	Material	Proteção	Micro cenário	Tubulações simuladas	N° de junções		Causa do Transitório	Vazão
NP - PVC	PVC 0,6 MPa	Não			GAAV	GEAV		
P1 - PVC		Evitar o transitório – válvula fechando lentamente	A Max	Todas	566	670	Fechamento rápido de válvula a jusante do reservatório	Máxim a
P2 - PVC		Ventosas						A Min
P3 - PVC		RHO	S Max	Rede esqueletizada	120	104		Máxim a
NP - DI	Não	S Min	Mínima					
P1 - DI	FERRO DÚCTIL	Evitar o transitório – válvula fechando lentamente						
P2 - DI		Ventosas						
P3 - DI		RHO						
NP - HDPE	PEAD 1 MPa	Não						
P1 - HDPE		Evitar o transitório – válvula fechando lentamente						
P1 - HDPE		Ventosas						
P3 - HDPE		RHO						

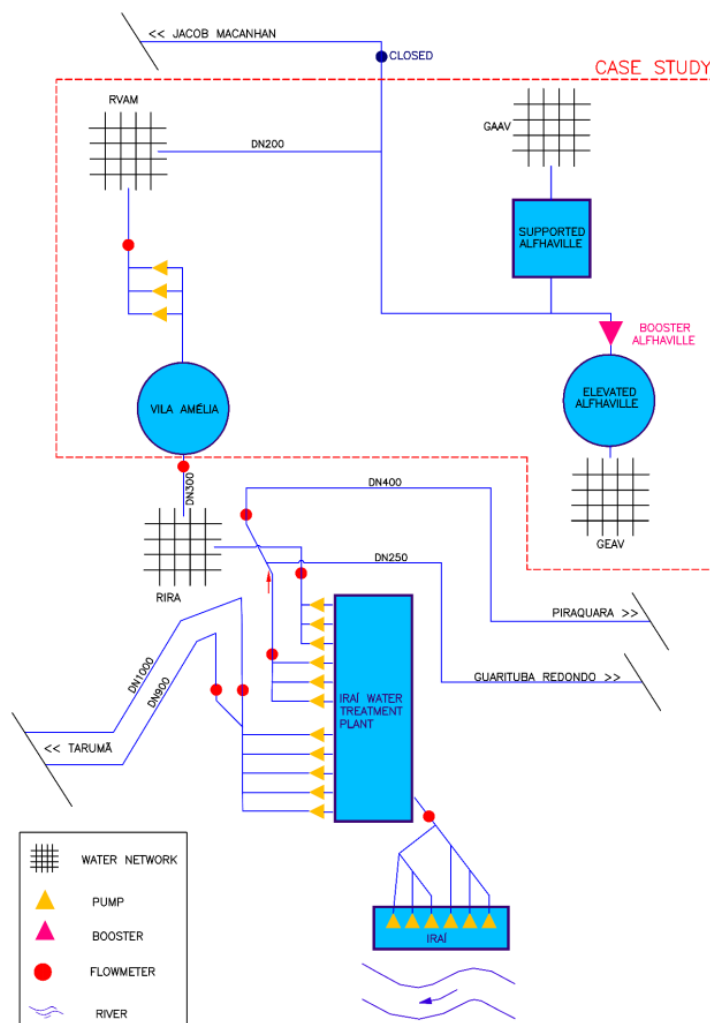


Figura 1: Fluxograma do estudo de caso

RESULTADOS

A Figura 2 representa os resultados obtidos nos 14 indicadores para o Rede de distribuição de água RVAM incluindo representação completa e esqueletizada. Analisando os resultados de três redes e comparando os cenários desprotegidos que representam todas as tubulações dos três materiais: PVC; ferro dúctil e PEAD, é possível observar que os maiores indicadores, ou maiores riscos devidos aos transitórios, são no cenário com ferro dúctil, seguidos por HDPE e por último PVC. Isto é devido à celeridade dos materiais, sendo a do ferro dúctil de duas a três vezes a dos materiais plásticos. Vale ressaltar que, embora o ferro dúctil tenha apresentado os piores resultados em relação a esses indicadores, as juntas atuais garantem a estanqueidade, mesmo em caso de vácuo parcial no tubo.

Comparando também os cenários com tubos completos e esqueletizados, os cenários esqueletizados tendem a subestimar as pressões extremas de surto, não representando corretamente o valor real dos riscos e não devem ser utilizados para análise de sistemas de distribuição de água.

Outro fato observado nessas três redes é que os cenários com materiais plásticos (PVC e PEAD) e os cenários de fluxo máximo tendem a ser os que apresentam piores resultados dos indicadores C1 a C4, ou seja, o cenário crítico, enquanto nesses mesmos indicadores, os cenários com ferro dúctil o fluxo mínimo tendem a ser os que apresentam piores resultados. No entanto, isso é apenas uma tendência e não é constante para todos os indicadores, sendo recomendável simular ambos os fluxos para qualquer material.

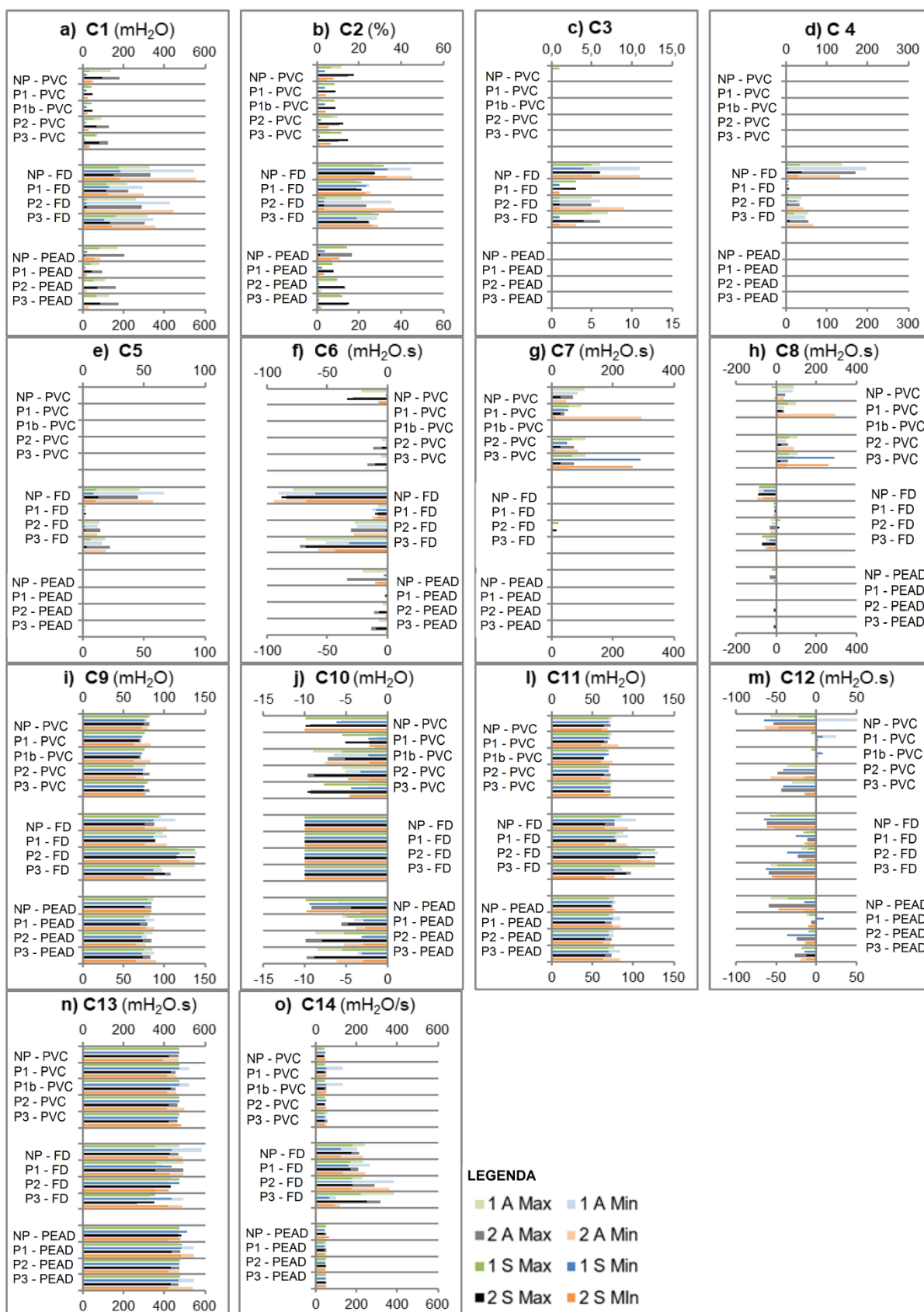


Figura 2: RVAM – a) C; b) C2; c) C3; d) C4; e) C5; f) C6; g) C7; H) C8; i) C9; j) C10; l) C11; m) C12; n) C13; o) C14

CONCLUSÕES

A operação dos sistemas de distribuição de água existentes, considerando menor consumo de energia, menor perda física e menos gastos com manutenção corretiva, é um dos maiores desafios enfrentados pelas empresas de saneamento.

No Brasil esta necessidade é cada vez mais conhecida e exigida pela população, comparar a crise de água e energia e a falta de investimento por parte do governo. Com isso em mente, este projeto fornece uma análise completa dos sistemas de distribuição de água com foco em transitórios hidráulicos, comprovando a forte necessidade deste estudo nos sistemas brasileiros.

O cálculo dos indicadores transitórios possibilitou a análise de sensibilidade da variação de: celeridade, vazão, número de junções, diferentes dispositivos de proteção e zonas de pressão, e comprovaram a forte necessidade deste estudo nos sistemas. O estudo de diferentes zonas de pressão (RVAM, GAAV e GEAV) indicou que o risco não é um caso isolado na rede de distribuição, mas comum e frequente.

Os diferentes materiais provaram a forte influência da celeridade durante a simulação. Enquanto os materiais plásticos (PVC e PEAD) apresentaram resultados semelhantes, o ferro dúctil apresentou resultados bastante diferentes e complicados.

A análise transitória hidráulica de sistemas esqueletizados e completos provou a imprecisão e as complexidades da esqueletização do modelo, uma vez que pode subestimar ou superestimar a análise transitória.

Os sistemas reais atualmente estão operando no cenário desprotegido do PVC e todos eles mostraram ser suscetíveis a condições transitórias hidráulicas. Portanto, eles estão expostos a pressões negativas e positivas durante os transitórios, abaixo e acima, respectivamente, da força permitida do tubo. Isso pode ocasionar em ruptura tubulações e junções, causando perda física de água e custos de reparo. Além disso, quando a pressão externa é maior que a interna, pode implicar na contaminação da água.

Diante dos resultados, este estudo incentiva as empresas brasileiras de saneamento a demandarem o cálculo do transitório hidráulico na água para projetos de redes de distribuição. No entanto, esse tipo de estudo ainda é um desafio a ser superado. O tempo gasto para executar um transitório hidráulico e a possível combinação de dispositivos de proteção em rede é muito maior do que executar apenas uma linha, devido à complexidade da mesma.

Para que isso seja aplicável, são necessários investimentos em cursos e o desenvolvimento de uma diretriz para as condições brasileiras. Para projetar novas redes de água, o transitório hidráulico deve ser calculado na concepção para ajudar na decisão de qual material será usado e na topologia da distribuição do tubo.

Os seguintes cenários devem ser simulados, com material apropriado escolhido pelo menos: (i) Nenhuma proteção; (ii) Transformar o transitório rápido em lento: deve explicar como isso é possível; (iii) Avaliação do fluxo máximo e mínimo; (iv) Dispositivos de proteção: pelo menos três cenários, com combinações de proteções.

Ao calcular os 14 indicadores propostos nesta pesquisa, é possível escolher qual proteção poderia ser utilizada. Em caso de proteção similar com dispositivos diferentes, deve considerar as despesas de operação e, em seguida, escolher a menor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BENTLEY SYSTEMS. Disponível em: <<https://www.bentley.com/en/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/hammer>>. Acesso em 9 de Set. 2017.
2. CHAUDHRY M. H. (1979). Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company. New York.
3. FRIEDMAN, M. L.; RADDER, S.; HARRISON, D.; HOWIE, M.; BRITTON, G.; BOYD, H.; WANG, R.; GULLICK, M.; LECHEVALLIER, D.; WOOD, D; FUNK, J. (2004). Verification and Control of Low Pressure Transients in Distribution Systems. AWWA Research Foundation. Denver, CO.

4. JUNG, B.; KARNEY, B. (2006). Hydraulic Optimization of Transient Protection Devices Using GA and PSO Approaches. *Journal of Water Resources Planning and Management*. January/February. ASCE 44-52.
5. JUNG, B.; KARNEY, B. (2011). Application of fluid transients on pipeline optimization: Worst-case scenario search and systematic protection. *Proc. Conf. on Probabilistic Methodologies in Water and Wastewater Engineering*, Toronto.
6. KARNEY, B., (2014). Water Infrastructure: Long Term Supply, Demand Management and Planning. *Journal of AWWA*, R2 (7), 62-70.
7. MARTIN, C. S. (1983). Experimental investigation of column separation with rapid closure of downstream valve. *Proc., 4th Int. Conf. on Pressure Surges*, British Hydromechanics Research Association (BHRA), Bath, U.K.
8. RADULJ, D. (2009). Assessing the hydraulic transient performance of water and wastewater systems using field and numerical modeling data. Master's thesis, Univ. of Toronto, Toronto, Canada.
9. SHINOZUKA, M.; DONG, X. (2005). Monitoring and management of water supply systems. 4th Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC) Int. Seminar on Safety of Infrastructures, KISTEC, Jakarta, Indonesia.
10. WALSKI, T. M.; KOELLE, E. Transients in Hydraulic Systems. In: WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SAVIC, D. A.; GRAYMAN, W.; BECKWITH, S.; and KOELLE, E. "Advanced Water Distribution Modeling and Management". 1. ed. Waterbury, CT, 2003. cap.13, p. 573-623.