

I-055 - TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS EM SISTEMAS URBANOS DE ÁGUA E ESGOTO: UMA REVISÃO SOBRE ESTUDOS DE CASO

Arthur Brito Nunes Diniz⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB).

Alexandre Kepler Soares⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Mestre e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Pós-Doutor no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal. Professor associado no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB).

Endereço⁽¹⁾ e ⁽²⁾: Anexo SG-12, Térreo, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília – UnB, CEP: 70.910-900, Brasília – DF. E-mail⁽¹⁾: arthurbndiniz@gmail.com ; E-mail⁽²⁾: aksoares.unb@gmail.com

RESUMO

A análise de transitórios hidráulicos é importante no estágio de operação de um sistema existente para o diagnóstico de problemas de mau funcionamento ou avaliação das causas relacionadas à ruptura de uma tubulação. Nestes casos, é extremamente importante usar modelos precisos que incorporem efeitos adicionais que normalmente não estão disponíveis em *software* comercial. Além disso, encara-se a complexidade da calibração dos modelos de transitórios hidráulicos ao lidar com sistemas reais com diferentes condições de contorno e incertezas associadas às características físicas da estrutura hidráulica em análise. Por isso, testes em sistemas físicos reais de modelos de transitórios hidráulicos não são comumente encontrados na literatura. Como resultado, desenvolvimentos teóricos na área da análise de golpes de aríete têm feito progressos substanciais nos últimos anos, porém, estudos confirmatórios em campo ainda são bastante escassos. O artigo apresenta uma breve revisão da literatura abordando os principais resultados de casos práticos, em sistemas reais, onde foram empregados a análise de transitórios hidráulicos na verificação e/ou avaliação de sistemas existentes.

PALAVRAS-CHAVE: Transitórios Hidráulicos, Sistemas Reais, Adutoras, Linhas de Recalque.

INTRODUÇÃO

A maioria dos sistemas hidráulicos é dimensionada considerando apenas a operação em regime permanente. Contudo, sabe-se que, em algumas situações, o regime do escoamento pode se tornar transitório, o que representa um risco à segurança, estabilidade, confiabilidade e ao bom funcionamento do sistema. Esse cenário é observado, por exemplo, durante abertura ou fechamento de válvulas, ou pelo acionamento ou desligamento (programado ou não) de sistemas elevatórios. A partir dessas ocorrências, o sistema sofre flutuações de pressão e vazão que, dependendo da magnitude, podem ocasionar a ruptura de tubulações e, portanto, a paralisação do funcionamento do sistema.

Nesse contexto, a análise de transitórios hidráulicos em sistemas hidráulicos é de grande interesse para os engenheiros e gestores. O seu êxito depende da aplicação de modelos com precisão satisfatória. Em fase de projeto, previsões mais aprimoradas das variáveis de estado permitem determinar uma estrutura mais econômica para o sistema e impedir acidentes associados ao Golpe de Aríete. Além disso, asseguram um avanço dos métodos e técnicas que fazem uso da análise transiente inversa para detectar vazamentos, bloqueios, ou trechos com avançada deterioração, fornecendo subsídios para um melhor gerenciamento dos sistemas já existentes.

Entretanto, registros de aplicações de modelos de transitórios hidráulicos em sistemas físicos reais (adutoras de água e esgoto, redes de distribuição de água) não são comumente encontradas na literatura e, quando tais sistemas são modelados, existem discrepâncias significativas entre as respostas medidas e os resultados previstos pelo uso de modelos transitórios usualmente aplicados. Como evidenciado por Starczewska *et al.*

(2014), ainda é limitado o conhecimento sobre o comportamento transitório em sistemas complexos, havendo a necessidade de aumentar os dados experimentais disponíveis para análise. Nesse sentido, ainda há muitos argumentos sem base experimental e problemas não resolvidos em torno dessa temática.

O presente artigo se propõe a apresentar uma revisão da literatura abordando os principais resultados de casos práticos, em sistemas reais, onde foram empregados a análise de transitórios hidráulicos na formulação de diagnósticos, verificação das condições operacionais, avaliação da eficácia do dispositivo de proteção contra surtos, detecção de vazamentos, dentre outros.

ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS EM SISTEMAS URBANOS DE ÁGUA E ESGOTO

A análise de transitórios hidráulicos é importante na fase de operação de sistemas existentes para o diagnóstico de problemas de mau funcionamento ou das causas relacionadas à eventual ruptura de tubulações. Neste caso, é extremamente importante usar modelos que simulam precisamente os eventos transitórios de forma a incorporar efeitos adicionais que normalmente não são considerados em modelos comerciais. Diferentes abordagens podem ser usadas para realizar essa análise. A complexidade do sistema atua diretamente na escolha do modelo e da combinação desse com a consideração de diferentes efeitos dinâmicos, como comportamento não elástico da parede do tubo, interação fluido-estrutura e cavitação.

Transitórios em sistema de bombeamento de água com descarga livre a jusante

Soares *et al.* (2013) realizaram um estudo focado na análise de transitórios causados pela parada súbita de um sistema de bombeamento em uma tubulação pressurizada destinada ao transporte de água. Para tanto, foram realizados testes em campo e coletados dados relativos às pressões e vazões no sistema de bombeamento que liga a Estação Elevatória do Prado ao Reservatório do Instituto Politécnico da Guarda (IPG) localizado na cidade da Guarda, Portugal. O objetivo do estudo consistiu em duas vertentes:

- Mostrar a complexidade da calibração do modelo hidráulico de transitórios na perspectiva de sistemas reais com diferentes condições de contorno e incertezas associadas com as características físicas;
- Demonstrar que algumas simplificações consideradas na análise de transitórios, como o fator de atrito constante e reservatório de nível fixo, não são razoáveis do ponto de vista da descrição do comportamento do sistema.

Como ilustrado na Figura 1, o sistema estudado consiste em uma adutora que liga dois reservatórios de água: o de Prado ao reservatório do IPG. A despeito do sistema de bombeamento de Prado possuir cinco conjuntos motobomba, a análise foi realizada com a operação de apenas uma delas. A tubulação principal é constituída de ferro fundido, diâmetro DN500 e um comprimento de 2225 m. No trecho final dessa tubulação, há uma redução que o acopla a um tubo de PVC DEFOFO DN400, que, por sua vez, conecta-se a três ramificações de PVC DN200, as quais evoluem até as três células do reservatório do IPG com descarga livre para a atmosfera (entrada por cima no reservatório).

O modelo hidráulico foi desenvolvido considerando o comportamento elástico da tubulação. As equações diferenciais parciais hiperbólicas foram resolvidas seguindo o Método das Características (MOC). Para levar em consideração o efeito da variação do atrito, as perdas por atrito foram calculadas segundo as formulações desenvolvidas por Vítkovský *et al.* (2000) bem como o modelo proposto por Vardy e Brown (2007).

Para a análise dos transitórios hidráulicos no sistema, foram considerados dois cenários:

1. Reservatório de nível fixo como condição de contorno de jusante e consideração do fator de atrito como constante e variável para cálculo das perdas de carga. Nesse cenário, o reservatório do IPG é conectado diretamente à tubulação. Ressalta-se que, na fase de projeto, é comum o emprego do fator de atrito constante e de reservatório de nível fixo a jusante (entrada por baixo), mesmo quando o sistema apresenta descarga livre para a atmosfera (entrada por cima);

- Um reservatório de nível variável como condição de contorno de jusante e consideração do fator de atrito variável. Nesse cenário, o reservatório não está ligado diretamente às tubulações, que fazem a descarga na atmosfera (sistema real). A variação do nível no reservatório como condição de contorno de jusante modela a variação da coluna líquida na extremidade final da adutora (tubos de PVC DN200).

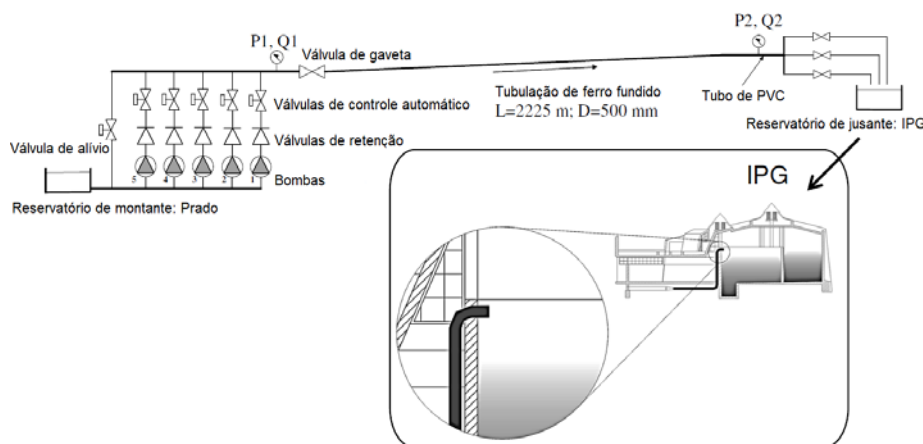


Figura 1: Esquema simplificado do sistema adutor da Guarda, Portugal (Adaptado de SOARES *et al.*, 2013).

Nos primeiros ensaios, a válvula de alívio foi isolada através do fechamento da válvula de gaveta. Assim, tal dispositivo de proteção não teve influência no comportamento do sistema, o que diminuiu o nível de incerteza no que diz respeito aos efeitos nas variações de pressão, tanto do atrito para condições de escoamento transitório como do tanque de nível variável de jusante.

Os resultados obtidos mostraram que a teoria clássica do golpe de aríete é imprecisa na descrição do comportamento hidráulico do sistema. Além disso, a consideração da condição de contorno do reservatório de nível fixo não é satisfatória para as condições de operação do sistema. Essa suposição provoca resultados a favor da segurança na medida em que computa valores majorados de pressões extremas. Entretanto, esse fato constitui situação desfavorável quando o objetivo da análise é o diagnóstico de sistemas existentes. O fator de grande importância para a maior precisão dos resultados foi a modelagem do alívio da pressão observada nas pressões extremas (fator de empacotamento) durante o transitório hidráulico (Figura 2). Esse procedimento foi feito a partir da modelagem das seções finais da tubulação, composta por três ramificações de tubos em PVC, como um reservatório de nível variável e descarga livre no reservatório de jusante.

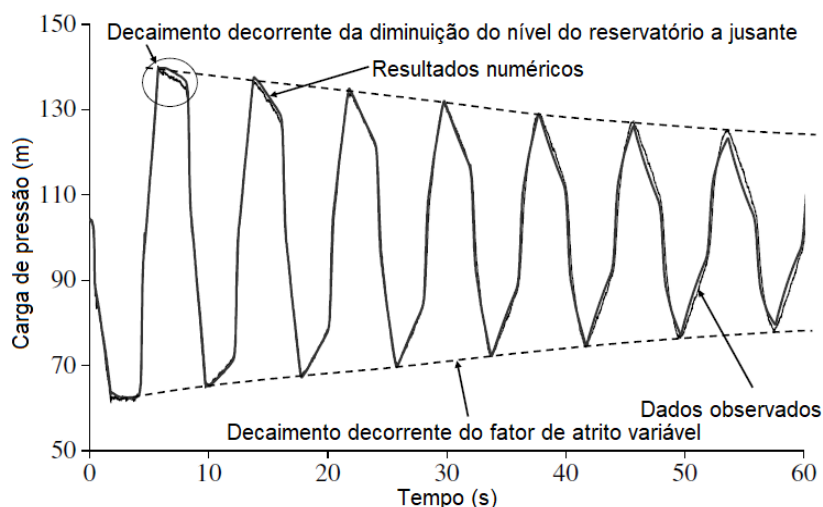


Figura 2: Cargas de pressão observadas em P1 e resultados numéricos do modelo elástico (Adaptado de SOARES *et al.*, 2013).

Posteriormente, foram feitos monitoramentos para as situações com e sem a atuação da válvula de alívio, como mostrado na Figura 3. Os ensaios de parada do conjunto motor-bomba foram realizados para a mesma vazão. Verificou-se que a válvula de alívio (*Set Pressure* = 150 mca) atenua as sobrepressões quando a carga de pressão atinge 150 mca. A variação da carga de pressão apresenta um formato de cunha quando a válvula se abre e descarrega água no reservatório de sucção das bombas.

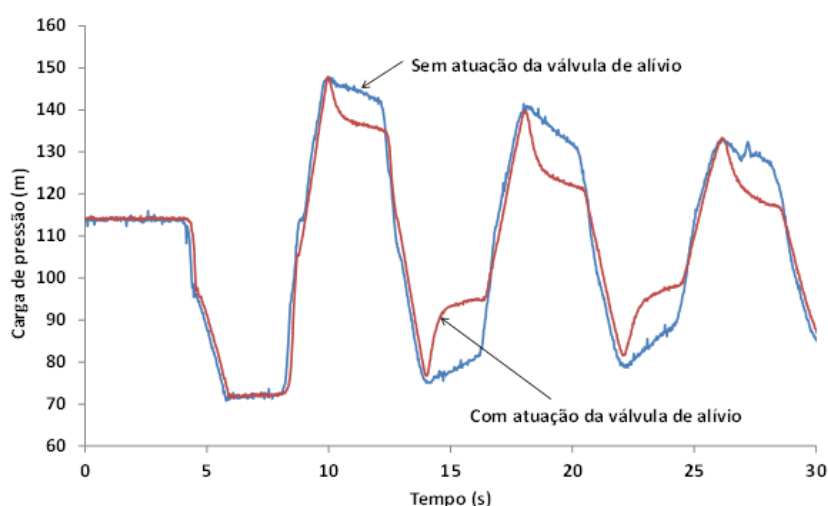


Figura 3: Cargas de pressão observadas com e sem a atuação da válvula de alívio

Transitórios em sistemas de bombeamento de água com diversas derivações

Brunone *et al.* (2014) testaram a confiabilidade do uso de transientes de pressão como uma importante ferramenta no gerenciamento de sistemas reais de distribuição de água. O sistema estudado é constituído de tubos em aço e é localizado em Novara, província no noroeste de Milão, Itália. O sistema possui quatro bombas principais que fazem, cada uma, a adução da água no sistema a uma vazão de 400 l/s. A tubulação principal (Figura 4) tem diâmetro nominal DN800 (com exceção dos primeiros 27,5 m). Uma válvula de retenção é instalada imediatamente à jusante do sistema de bombeamento. Os testes foram realizados com apenas uma das bombas em funcionamento.

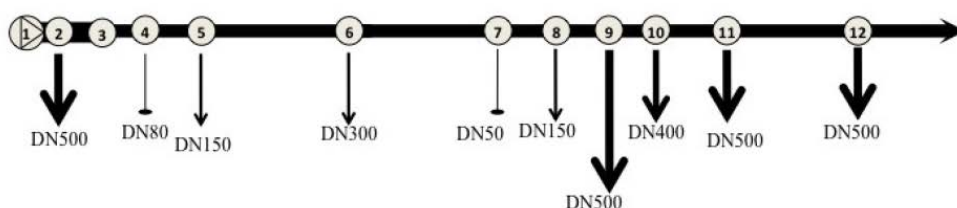


Figura 4: Esquema da tubulação principal e das derivações do sistema de bombeamento de Novara, Itália (BRUNONE *et al.*, 2014).

O objetivo do trabalho consistiu em apresentar alguns testes de campo executados durante regimes transitórios e desenvolver uma ferramenta de diagnóstico de sistema de tubulação que detecte simultaneamente a condição de operação de qualquer dispositivo, anomalias na rede (vazamentos, válvula parcialmente fechada, bloqueio parcial da tubulação) e determine as condições de funcionamento das conexões.

Durante os testes, o sinal de pressão (He) era medido em uma única seção e analisado por meio da Transformada Wavelet (TW), que permitia detectar singularidades no sinal de pressão e, consequentemente, calcular a velocidade da onda de pressão nas tubulações mais próximas de onde o transitório era gerado. Com os valores das velocidades da onda de pressão e o esquema da rede, um Modelo Lagrangeano (ML) foi executado para capturar as principais características do sinal de pressão e avaliar as causas de suas discontinuidades. Esse modelo é baseado na solução de equações diferenciais que governam transitórios sem

atrito em tubulações pressurizadas (Swaffield e Boldy, 1993), além de assumir a instantaneidade da manobra geradora do transitório.

A topologia do sistema permitiu definir a condição de contorno em qualquer nó e, consequentemente, avaliar as ondas refletidas e transmitidas de uma onda incidente. O ML acompanha a onda gerada pela manobra e suas subsequentes ondas refletidas e transmitidas em cada nó e registra suas trajetórias e tempos de chegada nos nós do sistema. Caso o valor da velocidade da onda de pressão de alguma tubulação não seja conhecido, a calibração se faz necessária. Por fim, o ML identificou quais ondas passaram a seção de medição e calculou o instante da passagem, gerando um sinal numérico de pressão (H_n), conforme mostrado na Figura 5. H_n é comparado com H_e com a finalidade de avaliar as diferenças, como por exemplo, singularidades observadas no H_e e ausentes no H_n e vice-versa, que podem significar presença de anomalias na rede.

A função de resposta do impulso é realizada pelo ML em duas considerações: conexões terminais da rede fechadas e ativas (Figura 5). Em ambos os casos, observou-se que muitas discontinuidades do sinal de pressão experimental apontado pela TW não correspondem a impulsos no ML. Um dos principais problemas da ML é o fato de a manobra não ser instantânea. Mesmo após convolução entre a função da resposta ao impulso calculado pelo ML e a derivada do sinal de pressão, o modelo não registrou corretamente as singularidades evidenciadas pela TW.

A imprecisão do ML pôde ser atribuída a alguns fatores como:

- Escala do transdutor utilizado muito grande comparada com as máximas pressões observadas;
- A manobra se processa em uma velocidade consideravelmente lenta;
- Há várias conexões próximas à estação de bombeamento;
- Não há uma seção característica próxima a seção de medição que seja útil ao cálculo da velocidade da onda de pressão.

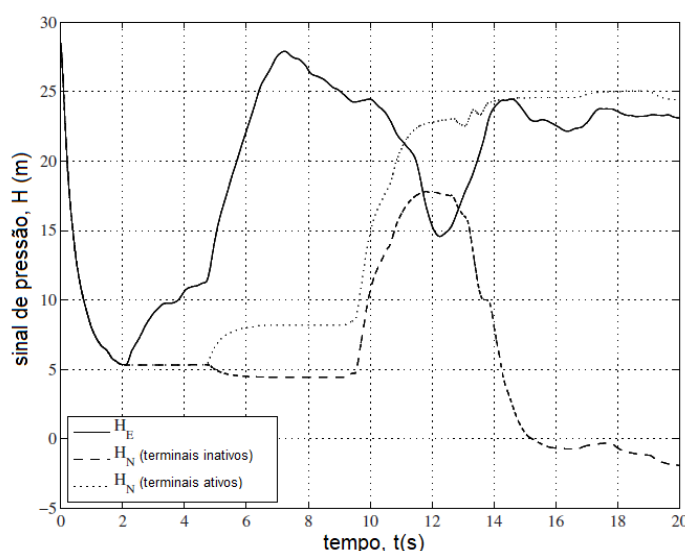


Figura 5: Sinal de pressão observado *versus* resultados numéricos para todas as derivações fechadas (linha tracejada) ou abertas (linha pontilhada) (BRUNONE *et al.*, 2014).

Transitórios em linhas de recalque de esgotos

Soares e Covas (2015) apresentaram análises experimentais e numéricas de transitórios hidráulicos causados pela parada súbita dos conjuntos motor-bomba de uma estação elevatória de esgotos. Dados de pressão foram coletados para diferentes manobras das bombas e cargas de pressão menores do que a carga de pressão atmosférica foram observadas caracterizando escoamento cavitante gasoso.

O sistema de bombeamento de esgotos, localizado em Lisboa, Portugal, consiste de uma estação elevatória com três bombas submersíveis instaladas em paralelo. A operação normal é realizada com uma ou duas bombas para

a vazão máxima, sendo a terceira utilizada como reserva. A jusante de cada bomba há uma válvula de controle automática e uma válvula de retenção do tipo contrapeso. O dispositivo de proteção é composto por um by-pass com válvula de retenção, a qual deveria abrir quando pressões transitórias negativas ocorressem. A linha de recalque é composta por tubos de ferro dúctil DN700, comprimento total de 1300 m, com descarga para a atmosfera em sua extrema jusante. A Figura 6 apresenta o perfil topográfico da linha de recalque.

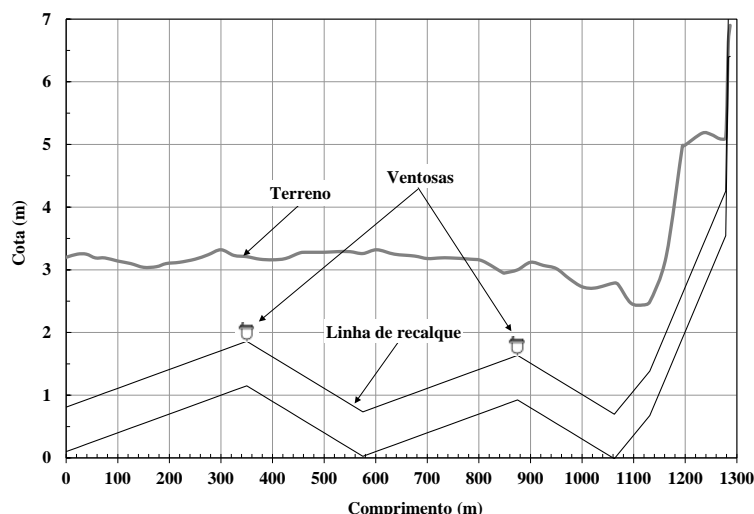


Figura 6: Perfil topográfico da linha de recalque de esgotos em Lisboa, Portugal (SOARES e COVAS, 2015).

Um modelo hidráulico que incorpora os efeitos da cavitação transiente em condutos forçados foi desenvolvido com base no modelo líquido-gás DGCM (*Discrete Gas Cavity Model*). Os resultados numéricos foram comparados aos dados medidos em campo e diferentes cenários foram utilizados para a calibração do modelo, que demonstrou toda a complexidade envolvida no diagnóstico de transitórios hidráulicos em sistemas existentes, caracterizados por distintas condições de contorno e incertezas associadas aos escoamentos internos.

Diversos cenários foram considerados para as análises hidráulicas, dos quais dois foram mostrados no trabalho. O primeiro considerou o modelo clássico do golpe de aríete sem a inclusão de cavitação e fator de atrito variável. Já o segundo cenário levou em consideração as perdas por atrito para regimes transitórios, além da cavitação pelo modelo DGCM. Entretanto, o levantamento da curva de fechamento/abertura das válvulas de retenção foi considerado o procedimento mais sensível para o ajuste do modelo hidráulico.

Comparações entre os resultados numéricos obtidos e os dados observados imediatamente a jusante das válvulas de retenção são apresentados na Figura 7. As válvulas de retenção (VR) fecham no instante $t = 12$ s e voltam a abrir quando a carga de pressão cai abaixo da carga de pressão atmosférica. Após o fechamento instantâneo das válvulas de retenção, o comportamento do transiente hidráulico é similar ao do clássico modelo para uma manobra rápida. As cargas de pressão extremas são bem representadas pelo modelo, pois são ligeiramente superiores às observadas e, portanto, a favor da segurança. O modelo conseguiu reproduzir as condições de escoamento até o tempo de 60 s e as válvulas de retenção permitem altos valores de vazão retornada ao poço de sucção (Figura 7b).

Os resultados demonstraram que o modelo clássico do golpe de aríete foi impreciso para a reprodução do sistema hidráulico, mas é indicado para estudos em fase de projeto, pois resulta em valores extremos maiores, o que reduz os riscos de falha devido aos transitórios hidráulicos. Entretanto, e para a fase de diagnóstico, um modelo completo foi utilizado para que os distintos fenômenos fossem precisamente reproduzidos (fator de atrito variável e cavitação). A solução de proteção da elevatória por um by-pass mostrou-se ineficaz, uma vez que a válvula de retenção do by-pass não abria quando a linha de recalque apresentava pressões negativas. A Figura 8 mostra os resultados das pressões monitoradas durante a parada súbita de um ou dois conjuntos elevatórios.

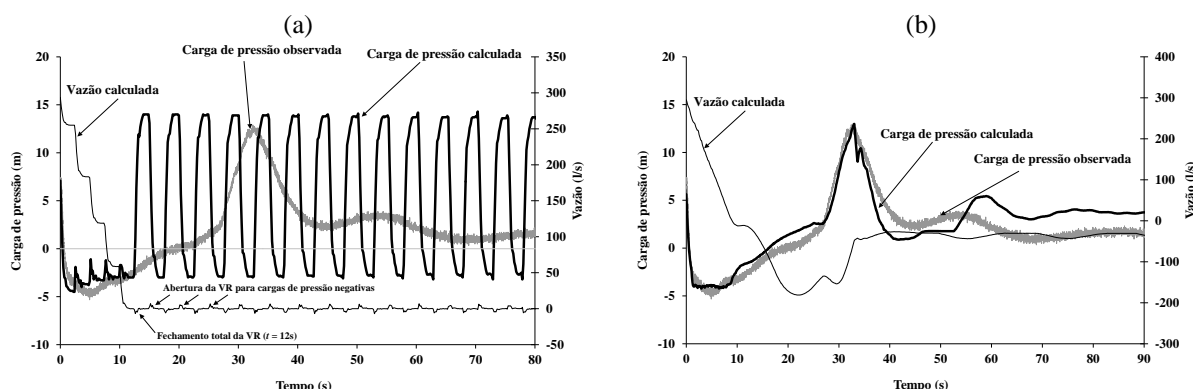


Figura 7: Resultados numéricos versus dados observados para o cenário 1 (a) e cenário 2 (b) (SOARES e COVAS, 2015).

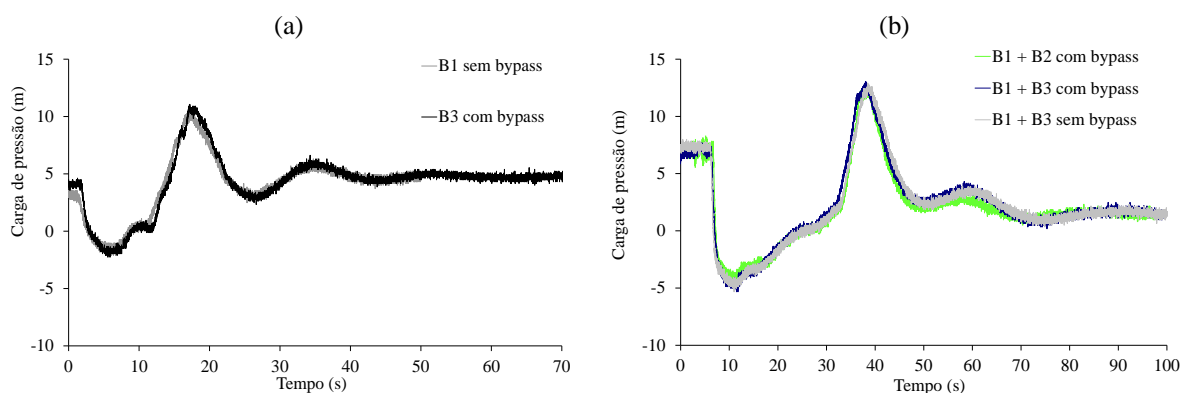


Figura 8: Dados de cargas de pressão monitoradas durante a parada súbita de um (a) ou dois (b) conjuntos motor-bomba.

Axworthy e Chabot (2004) realizaram um estudo em uma elevatória de esgoto da cidade de Saguenay, Canadá, cujo projeto original considerou, de maneira eficaz, apenas a proteção contra sobrepressões, negligenciando os efeitos de uma eventual subpressão no sistema ocasionado por um fator gerador de transitórios hidráulicos, como a parada súbita de uma bomba. A estação elevatória do sistema estudado (Figura 9) bombeia esgoto bruto por meio de uma linha com 1,6 km de extensão, DN250, sendo os primeiros 720 m constituídos de ferro dúctil e os outros 915 m de PVC. A carga estática de aproximadamente 70 m é significativa para uma adutora de menor porte e garante que a junção da coluna líquida seja rápida após a parada súbita da bomba, com separação da coluna e a subsequente repressurização da tubulação principal. Isso significa que qualquer cavidade de vapor que se forma durante a separação da coluna entrará em colapso rapidamente, resultando em pressões positivas muito altas que podem danificar a tubulação. Portanto, a instalação de dispositivos de controle que eliminem a formação de cavidades de vapor mostrou-se essencial para a operação segura desse sistema.

Após inauguração da adutora de Saguenay, moradores que viviam ao longo do percurso da linha relataram ruídos elevados em seus porões até que, posteriormente, ocorresse o deslocamento do tubo principal da linha de recalque. Resultados preliminares de um teste de campo mostraram que uma grande onda de baixa pressão era introduzida na tubulação após a perda de potência de uma bomba (desligamento). Assim, um dispositivo de proteção adicional foi proposto e, para tal, foi desenvolvido um modelo hidráulico de transitórios baseado no Método das Características (MOC), além de realizados testes de campo com respectiva coleta de dados. Para o cálculo das perdas de carga em condições de escoamento transitório foi utilizado o modelo proposto por Axworthy *et al.* (2000), que incorpora os efeitos do atrito variável. O modelo DVCM (*Discrete Vapour Cavity Model*) apresentado por Wylie e Streeter (1993) foi usado para representar a cavitação vaporosa na adutora quando a pressão cai e atinge a pressão de vapor.

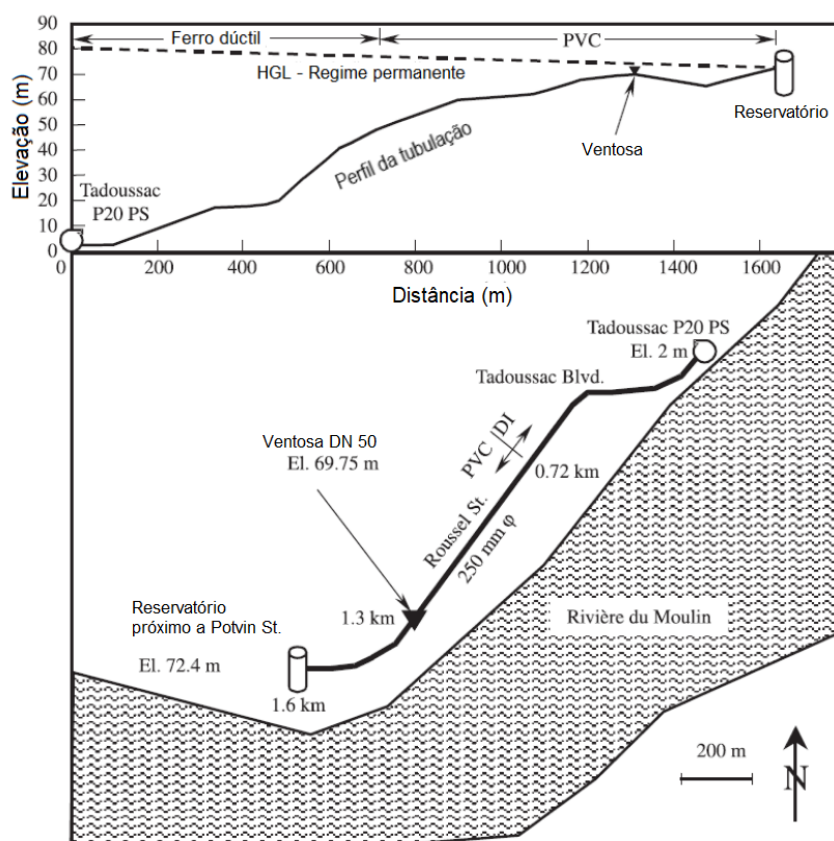


Figura 9: Esquemas que ilustram o perfil da linha de recalque de esgotos de Saguenay, Canadá
 (Adaptado de AXWORTHY e CHABOT, 2004).

Os resultados da simulação do modelo, a partir dos dados da bomba, mostraram boa concordância com os valores observados como pode ser observado na Figura 10. Os resultados da análise de pressão, mostrados na Figura 11, indicaram que havia uma queda da pressão para a pressão de vapor ao longo de um comprimento significativo da tubulação e que quaisquer cavidades de vapor que se formavam entrariam em colapso após a repressurização do sistema.

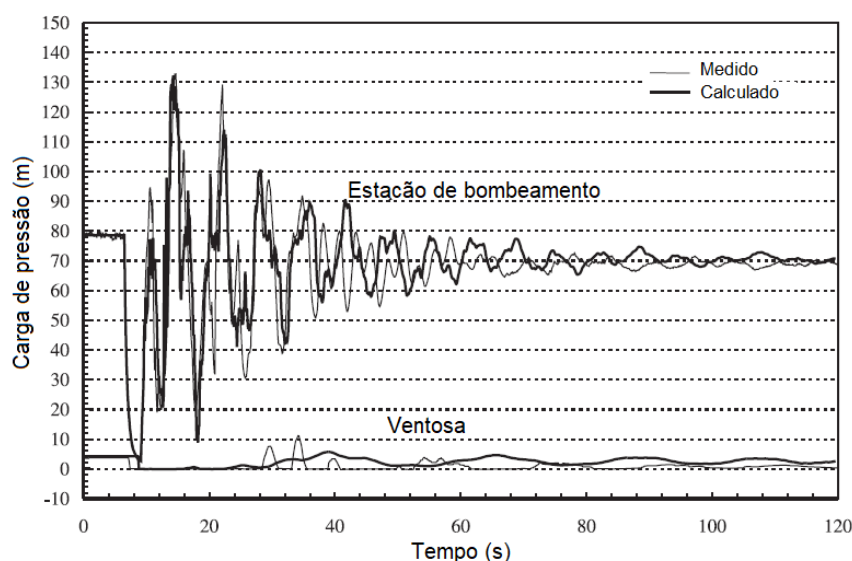


Figura 10: Carga de pressão na estação de bombeamento e na ventosa após perda de potência
 (Adaptado de AXWORTHY e CHABOT, 2004).

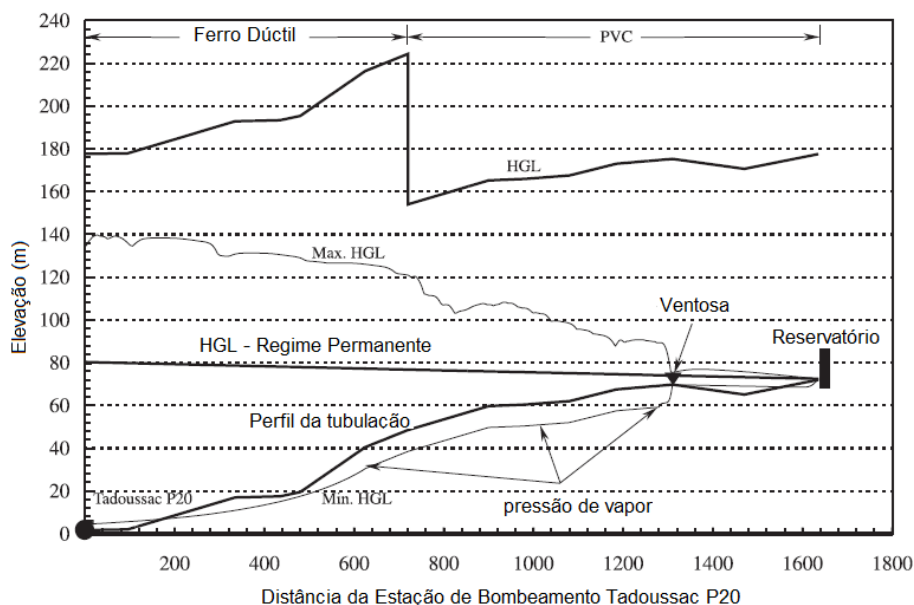


Figura 11: Envoltórias de cargas piezométricas após perda de potência com modelo de cavitação vaporosa e fator de atrito variável (Adaptado de AXWORTHY e CHABOT, 2004).

Os resultados obtidos a partir do modelo hidráulico foram usados para desenvolver alternativas de proteção contra transitórios, a fim de eliminar a formação de cavidades de vapor após o desligamento da estação de bombeamento. As restrições do local impediram a instalação de um reservatório hidropneumático na estação de bombeamento, o qual havia sido selecionado como a melhor alternativa de proteção. No entanto, como havia condições físicas para a instalação de um inversor de frequência na sala de controle da estação de bombeamento, essa foi a alternativa escolhida. Uma vez instalado o inversor de frequência, um segundo teste de campo foi realizado e os resultados do modelo computacional foram verificados por comparação com os dados medidos, como pode ser observado na Figura 12. Apesar de não ter sido a melhor alternativa, a instalação do inversor de frequência eliminou a formação de cavidades de vapor na tubulação que anteriormente ocorria nos inúmeros eventos diários de desligamento da estação de bombeamento. Além disso, não foi mais relatado deslocamentos da tubulação na estação de bombeamento e as reclamações dos moradores em relação ao ruído em suas casas pararam.

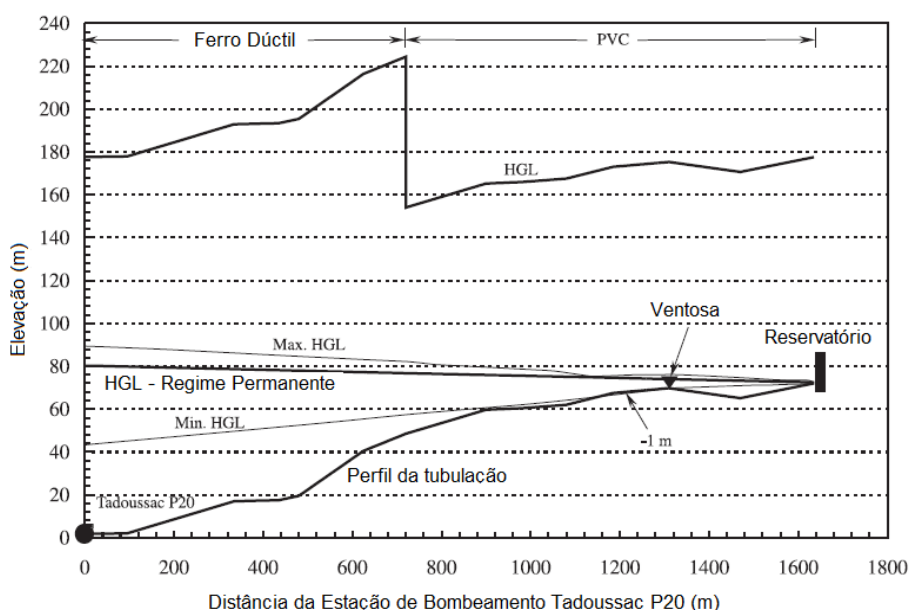


Figura 12: Envoltórias de cargas piezométricas após instalação do inversor de frequência (Adaptado de AXWORTHY e CHABOT, 2004).

Transitórios em sistema hidrelétrico reversível

Covas *et al.* (2008) realizaram uma análise detalhada de transitórios em um sistema hidráulico localizado na Ilha da Madeira, Portugal. Um sistema hidrelétrico com multiusos (geração de energia elétrica, fornecimento de água para abastecimento e irrigação) foi convertido em uma Usina Hidrelétrica Reversível (UHR) através da construção de dois reservatórios e uma estação de bombeamento. Dadas as novas condições de operação, foi realizado um estudo de transitórios hidráulicos, no estágio de projeto, utilizando a teoria clássica do golpe de aríete. Conforme mostrado na Figura 13, a água é turbinada e armazenada em dois reservatórios recém-construídos localizados nas cidades de Socorridos e no Covão durante as horas de pico de eletricidade e bombeada novamente para o Covão fora do horário de pico (ou seja, durante a noite). Parte da potência de bombeamento é gerada a partir da energia eólica.

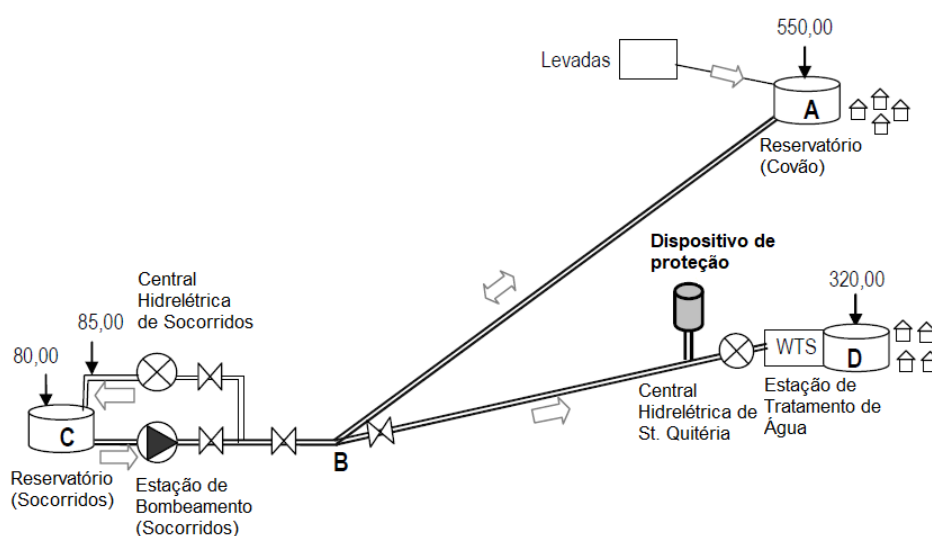


Figura 13: Sistema hidrelétrico Covão - Socorridos - St. Quitéria, Ilha da Madeira, Portugal (Adaptado de Covas *et al.*, 2008).

Foi realizada uma análise dos transitórios hidráulicos utilizando o modelo elástico clássico com a incorporação do fator de atrito variável (transiente rápido e com frequência alta). Diferentes cenários foram simulados para condições operacionais normais ou extremas. As pressões relativas máximas obtidas na estação de bombeamento de Socorridos excederam o limite teórico de 15% (desligamento simultâneo e brusco das três bombas: 26%; desligamento normal das três bombas: 16%). Foram calculadas as pressões para o cenário mais crítico (desligamento simultâneo e brusco das três bombas). Como as pressões máximas excederam 15% na extremidade a jusante da estação de bombeamento de Socorridos e as pressões mínimas foram inferiores à pressão atmosférica em 700 m da ramificação de St. Quitéria, entendeu-se necessário especificar e instalar uma proteção contra golpes de aríete no sistema. Foi especificado um reservatório hidropneumático na extremidade a montante da usina hidrelétrica de St. Quitéria. Uma análise de sensibilidade foi realizada para definir o volume total do vaso, o volume mínimo e máximo de ar e o diâmetro da ligação do tanque e do by-pass. Os resultados da simulação podem ser observados na Figura 14.

Após a instalação do dispositivo de proteção, dados de pressão no regime transitório foram coletados para diferentes condições de operação das bombas. Os resultados numéricos obtidos no estágio de projeto foram comparados com os dados de pressão coletados em campo. Pressões negativas não ocorreram no sistema, o que significa que o sistema foi adequadamente protegido contra golpes de aríete. No entanto, os resultados numéricos calculados não se ajustaram tanto na amplitude quanto no tempo com os dados físicos coletados. As principais incertezas associadas às simulações numéricas foram os níveis dos reservatórios (que afetaram as pressões de estado estacionário) e o comportamento dinâmico da válvula de retenção do reservatório hidropneumático (não se fechava instantaneamente e permitia fluxo reverso). Os autores recomendaram uma análise mais aprofundada do comportamento dinâmico das válvulas de retenção “pseudo-ideais” para superar as incertezas encontradas.

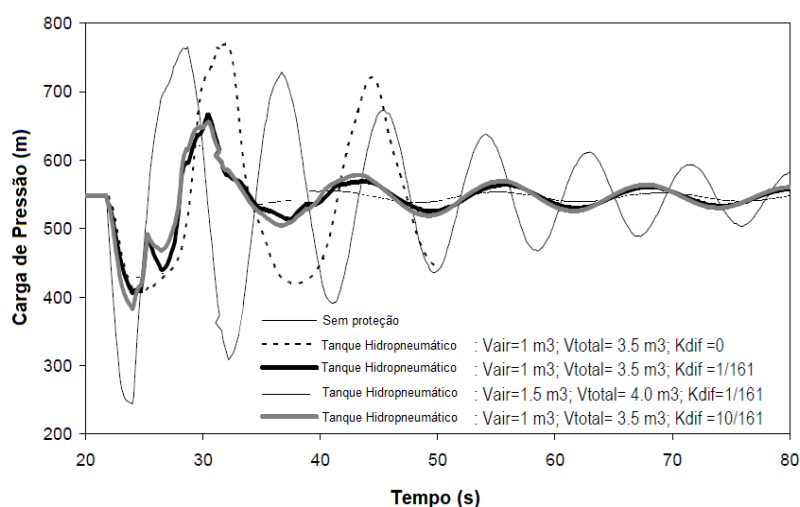


Figura 14: Desligamento simultâneo e brusco das três bombas sem e com proteção contra golpes de aríete para diferentes volumes de ar iniciais e diâmetros do by-pass (Adaptado de Covas *et al.*, 2008).

Método Transiente Inverso aplicado a sistemas de distribuição de água

McInnis e Karney (1995) utilizaram a parada súbita de bombas para induzir transitórios hidráulicos na rede de Bearspaw, Canadá. A Rede Bearspaw era relativamente grande, com uma extensão total de aproximadamente 90 km de tubulação. A maioria das tubulações na Rede Bearspaw é de concreto e havia aproximadamente 6.800 conexões de serviço de água. A resposta da rede de Bearspaw foi modelada usando um método explícito unidimensional, a partir do Método das Características, para a solução das equações governantes de continuidade e quantidade de movimento que descrevem o fluxo transitório. O modelo foi simplificado para remover tubos com menos de 300 mm de diâmetro e incluiu ajustes de velocidade de onda de até 15% para atender aos requisitos de discretização. Foram então desenvolvidos e calibrados três modelos de demanda para fornecer resultados comparáveis às medições de campo. No entanto, os modelos de demanda replicaram mal o decaimento dos transitórios nas medições de campo. Além disso, as demandas calibradas estavam acima da estimativa de erro para a demanda máxima do sistema e, portanto, irrealistas. McInnis e Karney (1995) desenvolveram um modelo alternativo de calibração do fator de atrito para o regime “quase permanente” (*quasi-steady*) para melhorar a comparação entre a resposta medida e modelada da rede de Bearspaw sem a necessidade de calibrar a demanda. No entanto, a calibração reduziu o coeficiente de rugosidade “C” da equação de Hazen-Williams de 120-150 (para todos os tubos) para aproximadamente 15. Este coeficiente “C” é fisicamente inviável para a rede de Bearspaw, por exemplo, sob condições de estado estacionário.

Covas *et al.* (2004) realizaram testes em uma adutora da cidade de Dundee (Reino Unido), com o objetivo de detectar vazamentos a partir de sinais de pressão durante transitórios. Dados coletados foram utilizados para testar e validar diferentes metodologias de detecção de vazamentos (baseadas em sinais de pressão), como a análise do tempo da reflexão da onda de vazamento e o Método Transiente Inverso. Ambas as metodologias foram bem-sucedidas na detecção e localização de vazamentos de magnitude “razoável”, desde que as características físicas e hidráulicas do sistema sejam conhecidas, o transitório seja gerado por uma manobra rápida e, no caso do Método Transiente Inverso, o modelo numérico utilizado seja preciso. Esse método também se mostrou particularmente útil para o diagnóstico, monitoramento e controle de sistemas existentes, promovendo uma melhor compreensão das causas de rupturas induzidas por transitórios hidráulicos.

Stephens *et al.* (2004) apresentam resultados referentes à implementação do Método Transiente Inverso em um sistema real. Vazamentos, bolsas de ar e bloqueios com características definidas foram introduzidos em duas tubulações de ramificação única e seus efeitos durante um transitório induzido foram medidos. Os resultados de campo demonstram que vazamento, bolsa de ar e bloqueio na tubulação podem afetar a resposta transitória de uma tubulação de uma rede de abastecimento. Além disso, a sensibilidade das respostas a uma bolsa de ar e, em menor grau, um vazamento, permitiu que o Método Transiente Inverso fosse aplicado com sucesso. Entretanto, a aplicabilidade geral desse método pode ser limitada por erros associados ao modelo utilizado na simulação. Recomendou-se o aprofundamento a partir da realização de novos estudos visando entender as complexidades

teóricas e práticas que inibem a modelagem precisa de transitórios em sistemas físicos, fator determinante na aplicação do Método Transiente Inverso.

Considerando o debate a respeito da importância relativa dos efeitos do fator de atrito variável em sistemas reais, Stephens *et al.* (2005b) apresentam os resultados de um conjunto de medições de campo, relativas aos efeitos de transitórios hidráulicos em uma adutora de 13,5 km localizada no sul da Austrália. A modelagem foi realizada usando métodos de função de ponderação para calcular a contribuição do atrito em regime variável. Os testes de campo permitiram estabelecer conclusões mais amplas sobre a importância relativa do atrito em regime variável. Para ambos os casos (considerando a tubulação com vazamento e sem vazamento), a inclusão de atrito instável melhorou consideravelmente o desempenho do modelo hidráulico. No entanto, os números de Reynolds para os testes foram relativamente baixos e favoráveis a efeitos do atrito em regime variável. Em condições com números de Reynolds mais altos, esses efeitos são reduzidos. Os resultados também confirmam que o efeito do atrito em regime variável diminui quando o amortecimento devido a vazamentos está presente. A magnitude do vazamento foi suficiente para reduzir a influência do atrito variável de 9,6% para 5,5%. No entanto, a inclusão da modelagem considerando o fator de atrito variável é particularmente importante se a modelagem inversa transitória for usada para detectar vazamentos.

Stephens *et al.* (2011) apresentam uma abordagem para determinar mudanças topológicas no sistema usando análise de resposta transitória. Informações precisas não estão disponíveis em relação a todos os elementos físicos que contribuem para a resposta transitória de um sistema de distribuição de água. Assim, um modelo parametrizado é desenvolvido e calibrado para representar as respostas de transitórios de um sistema físico real. O sistema utilizado para o teste de campo é localizado no município de Willunga, Austrália. A rede de Willunga foi selecionada por causa de seu tamanho (relativamente pequeno), possuir um único reservatório de fornecimento de água por gravidade, uniformidade do material de tubulação (cimento amianto) e a possibilidade de controlar o nível de demanda. O trabalho conseguiu abrir caminho para a aplicação bem-sucedida da análise de resposta transitória ao problema da detecção de válvula fechada no sistema. Segundo os autores, os resultados devem facilitar o desenvolvimento de técnicas baseadas em análise de resposta transitória para a avaliação não invasiva de problemas em redes de abastecimento de água. Discrepâncias entre os resultados numéricos e observados foram verificados. As possíveis razões para as desigualdades incluem os efeitos de variações de demandas, retenção de ar no interior das tubulações, atrito no regime variável e amortecimento mecânico causado pela interação de tubos e juntas com os solos adjacentes. Tais efeitos são investigados pela inclusão de um modelo viscoelástico, ou seja, baseado em amortecimento mecânico.

Stephens *et al.* (2013) aplicaram o Método Transiente Inverso para estimar a localização e magnitude do desgaste do revestimento e corrosão interna de tubulações metálicas. O método utiliza um modelo de transitórios hidráulicos e um algoritmo (SCE-UA) de busca inversa para analisar padrões de reflexões de pressão obtidas após propagação de ondas de pressão serem induzidas em uma tubulação. A aplicação é feita em campo em um trecho de tubulação de aço DN750 de 6 km de comprimento e com revestimento interno de argamassa de cimento. Embora o método proposto fosse capaz de identificar aproximadamente a localização e a magnitude dos danos na parede interna da tubulação, o desenvolvimento da técnica deve melhorar significativamente a precisão com a qual os danos podem ser localizados e caracterizados. No geral, os autores destacaram a necessidade do equilíbrio entre a aprimoração do modelo, o esforço da análise inversa e a precisão necessária com a qual o dano pode ser inferido.

DISCUSSÃO

Dada a complexidade de sistemas reais e o elevado número de variáveis envolvidas no processo, o estudo de transitórios hidráulicos nesse contexto constitui tarefa dificultosa e ainda pouco explorada na literatura. Os principais trabalhos desenvolvidos em sistemas reais foram sumarizados na Tabela 1. A grande maioria optou por fazer uso do Método das Características (MOC) como meio de analisar os transitórios hidráulicos. Segundo Chaudhry (2014), o método apresenta correta simulação da propagação de ondas, é eficiente e de fácil programação. Além disso, as condições de contorno podem ser as mais diversas. As vantagens do MOC decorrem de o fato do fenômeno transitório seguir uma lei de propagação de ondas que associa o tempo com a abscissa x definida ao longo da canalização através da celeridade.

Tabela 1: Principais estudos de transitórios hidráulicos aplicados em sistemas urbanos de água e esgoto

Artigo	Sistema (Local)	Modelos	Aplicação/Finalidade	Recomendações
McInnis e Karney (1995)	Rede de abastecimento (Bears paw, Calgary, Canadá)	Modelo Elástico (<i>software</i> TransAM) - MOC	Estudar os efeitos da representação do modelo de demanda no comportamento hidráulico previsto do sistema	Aprofundar os estudos dos efeitos de transientes hidráulicos em redes complexas de abastecimento.
Di Santo et al. (2002)	Rede de abastecimento (Minervino Murge, Itália)	Modelo da Coluna Rígida e Modelo da Coluna Elástica - MOC	Analisar a influência do reservatório hidropneumático e da extremidade final da adutora (descarga livre).	Considerar o fator de atrito variável nas análises dos modelos de transientes.
Covas et al. (2004)	Adutora (Lintrathen, Dundee, UK)	Método Transiente Inverso e Análise do Tempo da Reflexão do Vazamento a partir dos sinais de pressão	Detectar vazamentos em tubulações utilizando sinais de pressão em transientes.	Utilizar do Método Transiente Inverso para estimar a localização e o tamanho do vazamento; melhorar o entendimento das causas de rupturas de tubulações devido a transientes hidráulicos.
Stephens et al. (2004)	Rede de abastecimento (Adelaide, Austrália)	Modelo Elástico (+ modelo com fator de atrito variável) / Método Transiente Inverso - MOC	Implementação do Método Transiente Inverso para detecção de vazamentos, bolhas de ar e bloqueios na tubulação.	Aprofundar os estudos das complexidades teóricas e práticas que inibem a modelagem precisa de transientes em sistemas reais.
Axworthy e Chabot (2004)	Adutora (Saguenay, Quebec, Canadá)	<i>Discrete-Vapour-Cavity Model</i> (DVCVM) (+ fator de atrito variável) - MOC	Projetar e testar um dispositivo adicional de proteção contra surtos.	Computar o atrito variável no modelo hidráulico de transientes.
Stephens et al. (2005a)	Rede de abastecimento (Willunga, Austrália)	Modelo Elástico e Modelo Viscoelástico - MOC	Determinar mudanças na topologia do sistema através da análise de transientes	Incluir a análise dos efeitos dinâmicos na análise das respostas transitórias
Stephens et al. (2005b)	Adutora (Hanson, Austrália)	Modelo Elástico (+ modelo com fator de atrito variável) - MOC	Estudar a importância relativa da incorporação do atrito variável na modelagem de transientes.	Aprofundar os estudos para determinar em que circunstâncias o atrito variável é importante na modelagem de transientes.
Covas et al. (2008)	Usina Hidrelétrica Reversível (Madeira, Portugal)	Modelo Elástico - MOC	Analisar transientes hidráulicos; especificar e avaliar a eficácia de dispositivo de proteção contra surtos; verificar as condições operacionais.	Fazer análise mais aprofundada do comportamento dinâmico de válvulas de retenção “pseudo-ideais”.
Stephens et al. (2011)	Rede de abastecimento (Willunga, Austrália)	Modelo Elástico, Modelo Elástico com fator de atrito variável, Modelo Viscoelástico - MOC	Avaliar a capacidade dos modelos existentes em reproduzir observações de campo; desenvolver modelos hidráulicos mais aprimorados.	Considerar os efeitos dinâmicos na modelagem dos transientes hidráulicos
Stephens et al. (2013)	Adutora (Whyalla, Austrália)	Modelo Elástico / Método Transiente Inverso - MOC	Estimar a localização e a magnitude da corrosão interna e perda do revestimento da parede interna em tubulações metálicas.	Desenvolver técnica para aumentar a precisão com a qual os danos podem ser localizados e caracterizados.
Soares et al. (2013)	Adutora (Guarda, Portugal)	Modelos Elástico e Modelo Elástico com fator de atrito variável - MOC	Verificar diferentes abordagens de análise de transientes hidráulicos em adutoras: influência do fator de atrito e condição de contorno (reservatório de nível fixo)	Aprofundar estudo dos efeitos da consideração do atrito variável; usar de métodos numéricos mais recentes em detrimento do método das características.
Brunone et al. (2014)	Rede de abastecimento (Novara, Itália)	Modelo Elástico / Transformada Wavelet – Modelo Lagrangeano	Desenvolver uma ferramenta de diagnóstico de sistemas de tubulação.	Utilizar modelos numéricos mais complexos; diminuir o número de conexões próximas ao sistema de bombeamento; adicionar mais seções de medição de pressão.
Soares e Covas (2015)	Adutora de esgotos (Lisboa, Portugal)	<i>Discrete-Gas-Cavity Model</i> (DGCM) (+ modelo fator de atrito variável) - MOC	Analisar transitórios hidráulicos causados pela parada súbita dos conjuntos motor-bomba de uma estação elevatória de esgotos	Utilizar modelos que incorporem efeitos dinâmicos (fator de atrito variável e cavitação) ao fazer a análise de transientes em sistemas existentes.

Ressalta-se a necessidade da consideração dos efeitos dinâmicos para maior convergência entre os valores observados das medições de pressão e aqueles obtidos numericamente. Destaca-se que a maioria dos *softwares* comerciais disponíveis no mercado capazes de realizar análises de transitórios hidráulicos e utilizados nos dimensionamentos de estruturas hidráulicas, não consideram, nos seus cálculos, os efeitos dinâmicos a exemplo do fator de atrito variável. Essa abordagem, a partir da teoria clássica do golpe de aríete, demonstra-se ineficaz na simulação das respostas hidráulicas dos sistemas analisados. Apesar de tal consideração se mostrar mais conservadora para fins de dimensionamento e, portanto, induzir maiores sobrepressões, ela não se adequa para os fins de diagnóstico de sistemas já existentes.

CONCLUSÕES

O presente estudo expôs os principais trabalhos envolvendo sistemas urbanos de água e esgoto que passaram por algum tipo de análise de transitórios hidráulicos. Os casos práticos foram reunidos de forma a possibilitar a melhor compreensão e descrição das ferramentas utilizadas, objetivos projetados e recomendações estabelecidas.

Diferentes abordagens podem ser usadas para realizar a análise de transitórios hidráulicos: formulações simplificadas para estimar pressões extremas (por exemplo, a fórmula Joukowsky para manobras rápidas e a formulação de Michaud para manobras lentas), modelos clássicos de transitórios baseados em um conjunto de simplificações e modelos de transitórios mais completos que levam em consideração diferentes efeitos dinâmicos (por exemplo, comportamento não elástico da parede do tubo, interação fluido-estrutura ou cavitação).

Os resultados obtidos pela maioria dos *softwares* comerciais são baseados na teoria clássica do golpe de aríete. Estes são satisfatórios para estimar pressões extremas e permitir o projeto de dispositivos de proteção contra surtos. No entanto, esses modelos são frequentemente muito imprecisos para a análise e diagnóstico de sistemas existentes. Devido à complexidade envolvendo sistemas reais, isto é, os inúmeros fatores, parâmetros e efeitos envolvidos na operação das estruturas hidráulicas, a modelagem de transitórios se torna bastante importante para o controle da operação de sistemas visando a segurança, confiabilidade e o bom funcionamento do sistema. Não obstante, a precisão da modelagem de transitórios hidráulicos em redes de condutos forçados está se tornando mais importante porque os operadores dos sistemas procuram entender a relação entre as mudanças dinâmicas no sinal de pressão e a falha dos sistemas de tubulação envelhecidos. Além disso, a introdução de um dispositivo de atenuação de surtos para proteger os sistemas existentes ou a avaliação do efeito de novas ligações de tubos e a avaliação dos efeitos dinâmicos das mudanças nos regimes de vazão e pressão precisam ser orientados usando, entre outras ferramentas, modelos de transitórios hidráulicos que apresentem boa correspondência com os parâmetros observados em campo.

A falta de dados de transitórios em sistemas reais, como redes de distribuição de água, pode ser explicada de duas maneiras principais. Primeiro, os gestores desses sistemas, por vezes, subestimam a ocorrência e a severidade de transitórios em redes de tubulação porque acreditam que o caráter de rede do sistema reduz o impacto de eventos relacionados ao golpe de aríete. No entanto, há pouca base racional para essa atitude, e a literatura sugere que o oposto pode ser verdade em alguns casos (Karney e McInnis, 1990). Em segundo lugar, o custo e a dificuldade de desenvolver modelos de transitórios de redes de tubulação complexas, incluindo a coleta de dados de campo para a calibração do modelo, impediram, em certa medida, estudos mais aprofundados dos fenômenos de transitórios da rede. Como resultado, desenvolvimentos teóricos na área da análise de golpes de aríete têm representado progressos substanciais nos últimos anos, porém, estudos confirmatórios em campo ainda são bastante escassos.

Os estudos apresentados demonstraram que, com a escolha adequada do modelo hidráulico e consideração dos efeitos dinâmicos, há boa correspondência entre os valores de pressão medidos e os obtidos numericamente. Há, entretanto, a necessidade de estudos que aprofundem a influência dos efeitos dinâmicos nos diversos tipos e topologias de sistemas hidráulicos.

AGRADECIMENTOS

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos de mestrado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AXWORTHY, D.H., CHABOT, N. Pressure transients in a Canadian sewage force main. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.31, n.6, p.1039-1050, 2004.
2. AXWORTHY, D.H., GHIDAOU, M.S., MCINNIS, D.A. Extended thermodynamics derivation of energy dissipation in unsteady pipe flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4): 276–287. 2000.
3. BRUNONE, B., MENICONI, S., FERRANTE, M., CARRETTINI, C., CHIESA, C., CAPPONI, C., SEGALINI, D. The Characterization of Milan WDS by Pumping Switching off: Field Test Assessment. *Procedia Engineering*, v.70, p.201-208, 2014.
4. CHAUDHRY, M. H. *Applied Hydraulic Transients*. 3 ed. Columbia, South Carolina, USA: Springer. 2014.
5. COVAS, D., RAMOS, H., BRUNONE, B., YOUNG, A. Leak detection in water trunk mains using transient pressure signals: field tests in Scottish Water. *Proceedings of the 9th International Conference on Pressure Surges*, BHR Group, Chester, England, UK. 2004.
6. COVAS, D.I.C., RAMOS, H.M., BETÂMIO DE ALMEIDA, A. Hydraulic transients in Socorridos pump-storage hydropower system. *Surge Analysis – System Design, Simulation, Monitoring and Control*, 10th International Conference on Pressure Surges, BHR, Edinburgh, UK, 2008.
7. DI SANTO, A. R., FRATINO, U., IACOBELLIS, V., PICCINNI, A. F. Effects of free outflow in rising mains with air chamber. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.128, n.11, p.992–1001. 2002.
8. KARNEY, B., MCINNIS, D. Transient analysis of water distribution systems. *J. AWWA*, 82(7), 62-70. 1990.
9. MCINNIS, D., KARNEY, B.W. Transients in Distribution Networks: Field Tests and Demand Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.121, n.3, p.218-231, 1995.
10. SOARES, A. K., COVAS, D. I. C., RAMOS, H. M. Damping Analysis of Hydraulic Transients in Pump-rising Main Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.139, n.2, p.233-243, 2013.
11. SOARES, A. K., COVAS, D. I. C. Análises Hidráulicas e Experimentais de Transitórios Hidráulicos em Estação Elevatória de Esgotos. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília-DF. *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2015.
12. STARCZEWSKA, D., COLLINS, R., BOXALL, J. Transient behavior in complex distribution network: a case study. *Procedia Engineering*, v.70, p.1582-1591, 2014.
13. STEPHENS, M. L., LAMBERT, M. F., SIMPSON, A. R. Determining the Internal Wall Condition of a Water Pipeline in the Field Using an Inverse Transient. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.139, n.3, p.310-324, 2013.
14. STEPHENS, M., SIMPSON, A.R., LAMBERT, M.F., VÍTKOVSKÝ, J.P. Field measurements of unsteady friction effects in a trunk transmission pipeline. *Anais do 7th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis*, ASCE, Anchorage, Alaska, USA. 2005b.
15. STEPHENS, M.L., LAMBERT, M. F., SIMPSON, A. R., VITKOVSKY, J. P. Calibrating the Water-Hammer Response of a Field Pipe Network by Using a Mechanical Damping Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.137, n.10, p.1225-1237, 2011.
16. STEPHENS, M., LAMBERT, M. F., SIMPSON, A. R., VITKOVSKÝ, J. P., NIXON, J. Field tests for leakage, air pocket, and discrete blockage detection using inverse transient analysis in water distribution pipes. *Anais do 6th Water Distribution Systems Analysis Symposium*, World Water and Environmental Resources Congress, ASCE. Salt Lake City, UT, USA. 2004.
17. STEPHENS, M., LAMBERT, M., SIMPSON, A., VÍTKOVSKÝ, J., NIXON, J. Using field measured transient responses in a water distribution system to assess valve status and network topology. *Anais do 7th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis*, Anchorage, Alaska, USA. 2005a.
18. SWAFFIELD, J., BOLDY, A. *Pressure surges in pipe and duct systems*. Avebury Technical, Gower Press, Aldershot. 1993.
19. VARDY, A. E., BROWN, J. M. Approximation of turbulent wall shear stresses in highly transient pipe flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11), 1219–1228. 2007.

20. VÍTKOVSKÝ, J. P., LAMBERT, M. F., SIMPSON, A. R. Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow. Proc., 8th Int. Conf. on Pressure Surges—Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems, A. Anderson, ed., Publication No. 39, BHR Group, Suffolk, UK, 471–498. 2000.
21. WYLIE, E.B., STREETER, V.L. Fluid transients in systems. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 1993.