

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO: ESTADO DA ARTE

Maria Mercedes Gamboa-Medina¹ & Luisa Fernanda Ribeiro Reis²

RESUMO--- A problemática dos vazamentos em redes de distribuição de água para abastecimento e as metodologias que atualmente estão em desenvolvimento para sua detecção e localização são estudadas. Apresenta-se a análise de uma extensa bibliografia nacional e internacional que aborda o problema e, principalmente, diferentes tipos de solução. Tais soluções são classificadas em dois grupos principais segundo sejam baseadas na modelação hidráulica, tanto no regime permanente quanto no não permanente, ou simplesmente baseadas na análise de dados de no monitoramento de variáveis dependentes: pressão e vazão. São analisadas ambas as abordagens e resumidos os princípios conceituais, bem como as suas principais vantagens e limitações. Finalmente são comparados os diferentes tipos de solução, e destacadas as potencialidades da metodologia de análise de sinais como um caminho promissor a ser seguido.

ABSTRACT--- Problems related to leaks in water supply networks and methodologies currently under development for leakage detection and location are studied. The analysis of an extensive international and national literature to address the problem and, especially, different types of solution are presented. Such solutions are classified into two main groups according to whether they are based on the hydraulic modeling, both in steady and in non-steady state, or simply based on monitoring of dependent variables: pressure and flow. Both approaches are analyzed and their conceptual principles summarized, as well as their advantages and limitations. Finally, different types of solutions are compared and the potential of signal analysis methodology is highlighted as a promising path to be followed.

Palavras-chave: vazamentos, detecção e localização, metodologias.

¹ Mestranda em Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. CEP 13566-99 São Carlos-SP, Brasil. mmgamboam@usp.br

² Professora Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. CEP 13566-99 São Carlos-SP, Brasil. fernanda@sc.usp.br

1. INTRODUÇÃO

A distribuição de água potável à população é considerada tarefa prioritária a ser desempenhada pelos municípios de uma forma geral. Porém, a distribuição de água em quantidade e qualidade desejadas, constitui um desafio que exige segurança e eficiência dos sistemas de abastecimento.

Dentre os referidos desafios pode-se destacar a problemática do combate dos vazamentos nas redes de distribuição de água para abastecimento. Eles ocorrem ao longo das redes de distribuição e podem comprometer, juntamente com outros tipos de perdas físicas ou comerciais, até 80% da vazão do sistema em municípios brasileiros (SNSA 2010).

Os problemas derivados dos vazamentos, além do desperdício do recurso que deve ser usado racionalmente, incluem também grandes perdas econômicas, perdas de energia, riscos para a saúde pública pela entrada de poluentes na rede, incremento de riscos geológicos e comprometimento estrutural de obras de engenharia tais como pavimentos, edifícios, pontes, etc.

Visando o controle dos vazamentos, diferentes tipos de metodologias para a sua detecção têm sido desenvolvidos. As metodologias mais simples e antigas, mas ainda mais usadas na prática, incluem a inspeção das redes que pode ser desde visual até usando sensores acústicos (geofones) ou injeção de gás; são importantes também os testes de vazões ou pressões realizados em segmentos isolados da rede (step-testes), e o uso de sensores acústicos automáticos (loggers).

Estes métodos de detecção têm grandes limitações quando aplicados a redes de distribuição de água potável, dada a subjetividade e a dependência dos resultados às condições dinâmicas de execução, associadas às inspeções, além da sua impossibilidade para fornecer informação suficientemente atualizada do sistema inteiro; as experiências na rede também são de difícil aplicação a uma rede de grandes dimensões, somente conseguem informações do tramo específico inspecionado e têm como complicação adicional a interferência ao serviço para os usuários. Quanto ao uso de sensores acústicos, estes permitem a coleta de informações contínuas, mas a sua implementação numa rede levaria a custos muito altos pela quantidade de equipamentos necessários dada a distância máxima de espaçamento entre sensores consecutivos; adicionalmente as mudanças de pressão como as produzidas pela operação de válvulas redutoras de pressão e também as mudanças no material das tubulações reduzem a sensibilidade dos sensores para a detecção do vazamento (Wu *et al.* 2010).

Frente às limitações das técnicas tradicionais, principalmente passivas, existe a necessidade de desenvolver o controle ativo de vazamentos, entendido como o processo de detecção e localização de vazamentos permanente sobre a rede (WLTF-IWA 2007). Uma forma de abordagem do problema, que visa superar as ditas limitações, é o uso da relação que tem um vazamento com as características hidráulicas do sistema. Assim, as características no sistema são diferentes quando existe um vazamento do que na ausência deles. A dificuldade é que as relações entre as variáveis são complexas e ainda não bem compreendidas teoricamente.

O uso de modelagem para a detecção de vazamentos é classificado em duas categorias principais, a primeira delas baseada nos modelos hidráulicos do sistema e a outra na análise direta das variáveis dependentes do problema: vazões e pressões.

Dentro do primeiro grupo, parte-se do princípio que um vazamento é um fenômeno hidráulico e que tem influência sobre o funcionamento hidráulico do sistema, de forma que os métodos estão sempre ligados à necessidade de reproduzir com a maior fidelidade possível o comportamento hidráulico do sistema em termos das suas variáveis dependentes. Assim, o problema da modelagem hidráulica é abordado sob diferentes perspectivas, algumas delas estudando o comportamento do sistema no regime permanente, isto é, como se as mudanças fossem instantâneas, e outras muitas no regime transitório, considerando os efeitos de onda produzidos por diferentes fenômenos responsáveis pela produção de oscilações bruscas de variáveis hidráulicas no interior das redes.

Diversos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos na procura de formas de detecção e localização de vazamentos com o suporte da modelagem hidráulica associada à coleta de informações que podem ser medidas na rede automaticamente, em particular de vazões e pressões. Essa abordagem tem várias linhas de pesquisa com resultados parciais positivos e promissores, mas a sua implementação efetiva apresenta dificuldades devido, em parte, as limitações que a envolvem.

O desconhecimento da teoria de alguns dos fenômenos próprios das redes de abastecimento de água é uma limitação clara dos modelos (Colombo 2007), assim como a necessidade de um conhecimento preciso e detalhado de todas as características físicas dos sistemas que não é fácil de obter em redes reais. Como destacado por (Romano et al. 2009), também pode ser necessária uma alta frequência de amostragem realizada em uma grande quantidade de pontos, fazendo que o custo do equipamento necessário para o monitoramento torne o procedimento inviável economicamente.

A segunda abordagem, baseada no monitoramento de variáveis dependentes diretamente, desenvolve-se visando à superação de ditos problemas e à criação de um sistema de detecção e localização de vazamento mais facilmente implementável em redes de distribuição de água para

abastecimento. Reconhecendo o mesmo princípio da influência dos vazamentos sobre as características hidráulicas do escoamento, a idéia básica é interpretar as leituras contínuas de pressão e vazão e, em tempo real, identificar as anomalias ou variações associáveis a vazamentos e sua localização. O feito de não depender da modelação hidráulica, com as suas incertezas e limitações, é já um aspecto promissor, além da possibilidade de usar equipamento e esquemas de medição menos complexos ou custosos (Romano *et al.* 2009).

Nos tópicos seguintes deste trabalho é comentada a incidência e importância da problemática, e depois apresentado o estado da arte na modelagem de vazamentos em redes de distribuição de água para abastecimento em cada uma das abordagens de análise antes descritas.

2. IMPACTO DOS VAZAMENTOS

Os vazamentos nas redes de abastecimento de água constituem a maior parte das perdas físicas do sistema, lembrando que as perdas físicas ou reais ocorrem por vazamentos ou extravasamentos, e as perdas aparentes ou comerciais correspondem à água que não é contabilizada e aquelas que, ainda medidas, não são tarifadas pelo prestador do serviço; o somatório das perdas físicas com as comerciais define as perdas totais ou de faturamento, que são calculadas como a diferença entre o volume distribuído no sistema e o volume total faturado aos usuários. A magnitude do problema pode-se reconhecer através do exame dos dados sobre as perdas que incidem atualmente sobre os sistemas de abastecimento.

Para o Brasil, segundo dados de diagnóstico do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNSA 2010), o valor médio nacional para estas perdas de faturamento foi de 37,4% em 2008, com maiores valores nas regiões Norte (53,4%) e Nordeste (44,8%), e menores no Sul (26,7%) e Centro-oeste (33,7%), sendo o maior valor, na escala de prestadores do serviço, uma perda de faturamento de 80,7%.

Segundo dados da SABESP, nas diferentes redes por eles manejadas as perdas foram de 26% em 2009; a meta de redução de perdas deste prestador de serviços de 8% para o período 2007-2010 (para passar de 32% a 24%) equivaleria à quantidade de água necessária ao abastecimento de 1,7 milhões de pessoas (SABESP 2010).

No nível internacional, Lai (1991) *apud* (Colombo et al. 2009) expõe uma grande variedade nas médias nacionais, de valores pequenos como 9% para a Alemanha, até maiores como 43% para Malásia, sendo que a faixa mais frequente é de 20 a 30%.

Os dados anteriores mostram quantidades de água coletada, transportada e, em muitos casos, tratada, destinada ao consumo, deixam de ser aproveitadas, implicando em importantes perdas econômicas que podem atrapalhar o investimento em ampliações ou melhoras do serviço. Resultam importantes também em perdas de energia relativas ao transporte até a rede de distribuição, de vazões posteriormente não utilizadas.

Adicionalmente, a pressão sobre as fontes de água esta sendo aumentada desnecessariamente ao extrair recursos que não serão usados, o que deve ser evitado com vistas à racionalidade e sustentabilidade do uso do recurso. Este aspecto revela-se especialmente sério em cenários de escassez em que os vazamentos reduzem o recurso disponível para o uso.

Os vazamentos estão associados a aberturas nos elementos da rede, que constituem também um risco potencial à saúde pública; durante fenômenos transientes podem se apresentar diminuições nas pressões que permitem o ingresso de água presente no meio que pode conter agentes patogênicos ou a ou outros componentes responsáveis à degradação da qualidade da água entregue à população.

No meio urbano, a saturação do solo devido a vazamentos também compromete as condições de estabilidade para as obras de engenharia, modificando as condições do terreno de apoio e influenciando sobre as estruturas de pavimentos, edifícios, pontes, etc.

Para as redes de distribuição de água reais é impossível ter um sistema absolutamente fechado, e, embora não seja completo o conhecimento sobre o tema, há algumas características que têm reconhecida influência sobre a quantidade e magnitude dos vazamentos no sistema. Entre os principais fatores estão os seguintes (Pilcherd 2007): as condições na infraestrutura, incluindo materiais, idade, manutenção das tubulações e demais elementos da rede; as pressões na rede, sendo provado (WLTF-IWA 2007) que as medidas de controle de pressões propiciam a diminuição na incidência de vazamentos; o comprimento dos segmentos de tubulações; e a quantidade, propriedade, localização e demais características dos ramais prediais.

As indesejadas conseqüências dos vazamentos aumentam segundo o volume que perdido até que sejam tomadas providências para a sua correção, isto é do tempo de atividade do mesmo, incluindo o tempo para detecção de um vazamento, a sua localização e a sua reparação. O tempo de reparação é dependente da capacidade logística, técnica e econômica do prestador do serviço, mas comumente sua redução encontra menores dificuldades técnicas do que a detecção e localização. Assim, estas duas tarefas iniciais são as mais influentes nos sistemas compreensivelmente organizados, e constituem alvos de todas as metodologias de modelação estudadas neste trabalho.

Considerando que os vazamentos reportados, que podem ser detectados pelos usuários ou pelas conseqüências facilmente perceptíveis no sistema, podem ser menos de 10% das perdas reais em sistemas bem manejados (Pilcherd 2007), as tarefas de detecção e localização são complexas e de grande importância.

Os vazamentos não visíveis, tanto os detectáveis com metodologias de inspeção quanto os de magnitudes menores à detectável com as ditas metodologias, estão caracterizados por vazões menores, ausência de indicadores visíveis na superfície, e influência menos evidente nas características hidráulicas do sistema; os tempos de atividade dos mesmos são bem maiores do que os visíveis, sendo que embora com vazões pequenas, promovem maior volume de água perdida (Pilcherd 2007). Este tipo de vazamentos é o de maiores conseqüências e à vezes o mais difícil de detectar e localizar, razão pela qual é de grande importância o avanço na pesquisa para aumentar o conhecimento sobre o fenômeno e para propor soluções úteis, sendo de maior interesse as que permitissem a detecção on-line usando o monitoramento de variáveis como pressões e vazões na rede.

3. MODELOS HIDRÁULICOS

Conforme dito anteriormente, tem se tentado incorporar os vazamentos como fenômenos aos modelos hidráulicos de sistemas sob pressão. O reconhecimento da relação dos vazamentos com as características do sistema, em particular com as pressões, tem referências bastante antigas; o trabalho de Babbit (1920) *apud* (Colombo et al. 2009) descreve dentre as formas de detecção de vazamentos, além das metodologias simples referidas na introdução do presente trabalho, a atenuação das ondas de pressão transientes, estudando o efeito que tem o vazamento no alívio da dita pressão.

Nas últimas décadas deu-se um incremento importante nas pesquisas de vazamentos através de modelos hidráulicos, sendo que várias continuam em andamento; a seguir ressaltam-se os mais importantes tipos de desenvolvimento do problema de detecção e localização de vazamentos com sua integração a modelos hidráulicos. Ditos modelos podem estudar o sistema no regime permanente, ou no regime não permanente, de maior desenvolvimento nos últimos anos.

A relação do vazamento com as variáveis do sistema é abordada usualmente na análise de redes como um problema “direto”, mas pode ser analisada também como um problema “inverso”, sendo essa abordagem de maior aplicação na atualidade. O problema direto se refere à análise do sistema em que as demandas e as características da rede (por exemplo, a rugosidade das tubulações) são assumidas conhecidas, e a partir deles é calculado o estado do sistema representado por vazões

e pressões internas à rede. No problema inverso, as variáveis de estado do sistema (pressões, vazões) são conhecidas, e alguns parâmetros como rugosidades, diâmetros, cotas, demandas e outros relacionados a (vazamentos) são desconhecidas (Colombo *et al.* 2009).

3.1. Modelos em regime permanente

A modelação hidráulica podem ser feitas supondo o regime permanente, isto é sem alterações das características hidráulicas ao longo do tempo, supondo então que as mudanças se produzem instantaneamente, passando de um estado permanente a outro. Sob esta abordagem, é possível o uso de equações analíticas para calibrar o fator de atrito e as demandas nos nós seguindo metodologias de tentativa e erro (Rahal *et al.* (1980); Walski (1983); Bhave (1988) *apud* (Soares 2007)); com o mesmo objetivo foram usadas outras metodologias analíticas, explícitas ou diretas, com a resolução de um conjunto de equações não lineares que descrevem a hidráulica da rede ((Ormsbee e Wood (1986); Boulos e Wood (1990); Boulos e Ormsbee (1991), *apud* (Soares 2007)).

Diferentemente dos anteriores, os métodos implícitos visam resolver o problema inverso, antes descrito, usando o equacionamento e os valores medidos ou conhecidos e procurando minimizar o erro (definido como a diferença entre valores calculados e observados das variáveis de estado) para determinar assim os valores ótimos dos parâmetros desconhecidos do modelo. Este tipo de problema tem sido abordado por diversos autores, dentre eles alguns com interesse pela inclusão de vazamentos e de demandas variáveis com a pressão nos modelos e sua calibração, no regime permanente (Soares 2003); (Colombo 2007); e Ormsbee (1989); Lansey e Basnet (1991); Reddy *et al.* (1996) *apud* (Soares 2003)). Na calibração dos modelos, o processo de otimização envolvido tem sido tratado geralmente fazendo uso da metodologia de algoritmos genéticos, visando a melhorar a precisão dos resultados da calibração dos modelos e ao estudo de redes de distribuição de água mais complexas.

Uma descrição dos trabalhos na área é apresentada por (Soares 2003), destacando que muitos têm sido desenvolvidos considerando relações pré-estabelecidas de vazamentos com pressão, do tipo da usada por Germanopoulos e Jowitt (1989) *apud* (Soares 2003), que define vazamentos unitários em função da pressão e de uma constante e/ou expoente que depende das características da rede. A relação de vazamento com pressão pode ser determinada também através de metodologias baseadas em dados de campo e análises estatísticas para a sua definição, obtendo resultados diferentes e que não podem ser aplicados de forma geral (Soares 2003).

A modelação hidráulica de redes de abastecimento de água com inclusão de vazamentos, para escoamento permanente, tem sido desenvolvida para diferentes aplicações, sendo de destaque a otimização da operação e/ou localização de válvulas redutoras de pressão (Reis *et al.* 1997).

3.2. *Modelos em regime não permanente*

No funcionamento de redes de distribuição de água para abastecimento constantemente verificam-se fenômenos como variações nos níveis de reservatórios e operação de válvulas e bombas, que não podem ser estudados assumindo escoamento permanente; sua incorporação aos modelos hidráulicos tem motivado o desenvolvimento de metodologias para definição e calibração de modelos hidráulicos em regime não permanente, ou de transitórios hidráulicos. Durante a ocorrência do transitório, análises hidráulicas adicionais podem ser estudadas e também a interferência de um vazamento sobre as mesmas, dado que para um ponto de análise conta-se com grande quantidade de informações variáveis no tempo; assim, a utilização de modelos de escoamento não permanente pode produzir informação do estado do sistema de forma mais rápida e efetiva do que os modelos de regime permanente (Ferrante *et al.* 2009).

Quando uma onda transiente é gerada numa tubulação ou sistema por algum evento como a abertura/fechamento de uma válvula, essa onda se movimenta com umas características de propagação dadas, até chegar a uma singularidade qualquer como um acessório, contração, expansão, mudança de rugosidade, mudança de material, ou um vazamento; como efeito da singularidade, a resposta do sistema vai ser modificada, e essa modificação aparecerá também em outros lugares da rede pela propagação. Conhecendo a sinal e a modificação apresentada, por exemplo em termos de vazão ou pressão, é possível estudar a singularidade que a gerou e sua localização.

Um vazamento num conduto ou rede pode produzir sobre uma onda de transiente dois tipos de efeito: gerar ondas refletidas e aumentar o amortecimento da onda inicial; a identificação e quantificação desses efeitos constituem base das metodologias para detecção e localização de vazamentos com transientes (Colombo *et al.* 2009). De forma simplificada através destas metodologias busca-se obter um modelo capaz de representar os fenômenos transientes, sobre os quais seja possível conhecer a resposta ao transiente na ausência e presença de vazamentos, de forma que a detecção e localização possam ser feitas por comparação entre o sistema calculado e os valores medidos na rede.

Uma útil revisão dos trabalhos relativos à detecção e localização de vazamentos com modelação hidráulica baseada em transientes é apresentada por (Colombo *et al.* 2009), que divide as

formas de abordagem do problema em três grupos: análise de transiente inverso (o grupo maior), análises no domínio da frequência e análise de transiente direto.

A análise de transiente inverso em tubulações foi proposta inicialmente num trabalho importante para a calibração e detecção de vazamentos em redes de distribuição de água, (Liggett and Chen 1994); no trabalho integra-se a análise de transiente para calcular pressão e vazão com a resolução do problema inverso para calibração e cálculo de vazamentos. A calibração do fator de atrito e dos vazamentos no sistema é conseguida ao minimizar o erro entre os valores de pressão ou de vazão medidos e os calculados pelo modelo, sendo este erro calculado como a soma das diferenças ao quadrado; os vazamentos são localizados em pontos discretos da rede (nós) e o seu valor (maior ou igual a zero) em cada nó da rede faz parte das variáveis de decisão no processo de otimização. Trabalhos posteriores basearam-se nesta técnica com sucesso, melhorando principalmente no aspecto dos algoritmos para otimização, mas também no modelo do transiente hidráulico e no equipamento e estratégias para o monitoramento.

Diferentes algoritmos para realizar a otimização na aplicação da análise de transiente inverso têm sido estudados, focando principalmente em métodos diferenciais de otimização não linear como o de Levenberg-Marquardt (Liggett and Chen 1994), algoritmos genéticos (Vitkovsky et al. 2000) e Tang *et al.* (1999) *apud* (Soares 2007)), ou metodologias híbridas (Kapelan *et al.* 2003).

O trabalho de (Liggett and Chen 1994) identifica as potencialidades do método de transiente inverso para a calibração e a detecção de vazamentos, e não limita seu desenvolvimento ao único método de cálculo por eles empregado; em aplicações posteriores (Vitkovsky *et al.* 2000) identificou-se que os métodos diferenciais de otimização, como o Levenberg-Marquardt, podem não convergir ou fazê-lo a mínimos locais e não ao mínimo global, incorporando então o uso de algoritmos genéticos como formulação mais robusta e detalhada, mesmo que menos rápida, pela característica de fazer a busca em todo o espaço factível. O método de transiente inverso com algoritmos genéticos também foi aplicado por Tang *et al.* (1999) *apud* (Soares 2007) para a calibração em sistemas de redes, utilizando dados de campo de cidades canadenses, concluindo que a análise do escoamento transiente para calibração produz bons resultados, embora não suficientemente pesquisados.

O trabalho de (Kapelan et al. 2003) apresenta um método híbrido entre algoritmos genéticos e o de Levenberg-Marquardt para a calibração dos fatores de atrito e dos vazamentos na rede; usando inicialmente AG para obter um possível ótimo global, utiliza depois LM com um espaço de busca limitado pelo resultado dos AG, para obter a solução final.

As análises de transiente inverso têm sido validadas em trabalhos experimentais e, em menor medida, com sistemas reais. As aplicações em montagens experimentais incluem o trabalho de Soares (2007), e os de Vitkovsky e Simpson (1997) e Tang *et al.* (2001) *apud* Colombo *et al.* (2009); especial destaque para as conclusões de Covas (2001) *apud* Colombo *et al.* (2009), sobre as condições para o sucesso na aplicação da análise de transiente inverso, que incluem a exatidão na simulação do transiente, a exatidão nos dados, a sincronização dos dados dos diferentes medidores, e a exatidão nos parâmetros do sistema estimados.

Ao notar a dificuldade para completar essas condições e obter resultados ótimos ainda em sistemas de laboratório, é possível concluir que a sua aplicação efetiva no análise de sistemas reais não é simples.

Dentro das aplicações de campo, usando análise transiente inverso em sistemas reais, Covas (2006) *apud* Colombo *et al.* (2009) analisa os dados coletados em uma adutora de 5,9 km na Escócia, identificando que questões práticas, teóricas e computacionais deverão ser melhoradas antes da efetiva aplicação prática do análise do transiente inverso. Outra aplicação foi feita por Saldarriaga *et al.* (2006) *apud* Colombo *et al.* (2009), quem usou uma rede de distribuição real de aproximadamente 5 km em Chia, Colômbia, para obter registros enquanto vazamentos artificiais eram gerados pela operação de válvulas; foram usados algoritmos genéticos para a resolução do problema inverso, obtendo a localização dos vazamentos em nós adjacentes.

Uma característica das análises de transiente inverso é o detalhamento na modelação, que está ligado a uma boa exatidão nos resultados, mas também à exigência de muita informação sobre o sistema, o que não é fácil de se ter para a maioria das redes de distribuição de água potável atuais. Com essa motivação, desenvolvem-se outras técnicas que não exigem a modelagem tão completa e detalhada do sistema. Aquelas baseadas exclusivamente no monitoramento de variáveis dependentes serão estudadas no seguinte capítulo, mas existem também outras dependentes em maior ou menor medida do modelo hidráulico do sistema.

A reflexão parcial das ondas transientes quando encontram uma singularidade, em particular um vazamento, é o princípio explorado por vários autores no desenvolvimento de técnicas de detecção de vazamentos. Como uns dos trabalhos mais citados em pesquisas relativas ao tema podem-se referir a Ferrante e Brunone (2003a) e Ferrante e Brunone (2003b); que apresentam os testes de transiente hidráulico para a detecção de vazamentos com análises harmônicos (com aplicação da transformada de Fourier) e de ondaletas, respectivamente.

Tais trabalhos contêm desenvolvimentos teóricos e resultados de experiências de laboratório com o estudo de uma tubulação que entrega a um tanque aberto, e que tem uma válvula que produz o fenômeno transiente, onde a medição das pressões é feita na seção a jusante da tubulação.

Para o estudo da onda de pressões no sistema durante o transiente é derivada uma equação analítica, sendo que nela podem ser identificados um termo dependente do fenômeno transiente e outro termo dependente das características do sistema; para essa separação de efeitos requerem-se conhecer as vazões na seção a jusante, ou bem que o transiente seja produzido pelo fechamento rápido da válvula.

No primeiro trabalho (Ferrante e Brunone 2003a), ao sinal de pressões no sistema é aplicada a transformada de Fourier conseguindo as informações necessárias para realizar no domínio da frequência uma comparação dos valores para tubulações na presença ou ausência de vazamentos, durante fenômenos transientes, com a análise de harmônicos; os resultados em ausência de vazamentos podem corresponder àqueles produzidos por modelos teóricos ou medições anteriores do sistema. No segundo trabalho (Ferrante e Brunone 2003b) a análise do sinal de pressões é feita com o auxílio das ondaletas para obter informação no domínio do tempo e encontrar as discontinuidades no sinal sem perder informação sobre sua periodicidade na frequência. A análise das discontinuidades é útil dado que o passo de uma onda refletida, como ondas transientes refletidas por um vazamento, gera grandes irregularidades no sinal de pressões, sendo este o princípio para o uso da técnica na detecção e localização de vazamentos. A técnica é muito útil para a detecção de discontinuidades no sinal (conseqüência dos vazamentos) e é afetada pela forma do sinal transiente e a qualidade dos dados de pressão medidos.

Também merece atenção o trabalho de Beck *et al.* (2005) que apresenta uma técnica de correlação cruzada e uma rotina para a sua implementação baseada em MatLab, assim como a sua aplicação a um modelo de laboratório usando o ar como fluido.

A correlação cruzada é empregada para reconhecer padrões específicos em um sinal ao compará-lo com outro de referência, sendo dito sinal resultado da medição de pressões no sistema durante a operação de uma válvula solenóide; assim, os fundamentos da técnica são similares aos das técnicas no domínio da frequência mencionadas no capítulo anterior, mas trabalhando no domínio do tempo. Nas aplicações potenciais da técnica o autor indica a detecção de mudanças em sistemas de redes, respeito a condições anteriores também avaliadas com a técnica; dentro das limitações para a implementação, Beck *et al.* (2005) destacam que as muitas variações e singularidades nos sistemas de redes reais originam uma grande quantidade de picos no sinal que

tornam extremamente difícil a análise do sinal de um monitor, mas propõe também que com o uso de vários monitores no sistema poderia ser aplicado a redes de alguma complexidade.

O avanço desde os desenvolvimentos teóricos feitos e as experiências de laboratório em um sistema simples até aplicações mais complexas, requer que muitas dificuldades sejam superadas, entre elas a consideração da mudança nos fatores de atrito no escoamento transiente, e a necessidade da geração de um transiente bem controlado para a execução dos testes; ainda mais limitações existem para o traslado da técnica a sistemas reais de distribuição de água.

No estudo do transiente hidráulico considera-se o comportamento de uma onda estacionária que descreve a vazão e a pressão em cada seção de um conduto forçado variando com o tempo e repetindo em um intervalo de tempo. Como antes dito, a resposta do sistema a um fenômeno transiente vai traduzir em alterações na onda, as quais serão diferentes na presença ou ausência de singularidades, razão pela qual podem ser usadas para a detecção e localização de vazamentos.

A análise da onda pode ser feita no domínio do tempo ou da frequência; no domínio do tempo é exigida maior quantidade de simulações e de aí maior tempo e capacidade computacional, enquanto a resposta na frequência pode ser determinada diretamente, o que motiva o desenvolvimento de metodologias com análise de transiente no domínio da frequência. Para Colombo *et al.* (2009), o trabalho de Johnsson e Larson (1992) *apud* Colombo *et al.* (2009), foi um dos primeiros a propor que as características dos vazamentos possam ser estudadas a partir das medições de pressão, e o de Mpesha *et al.* (2001) *apud* Colombo *et al.* (2009) o primeiro a identificar claramente o potencial da análise na frequência para a detecção de vazamentos.

De forma simplificada, a análise proposta por vários autores (Covas *et al.* (2005); Mpesha *et al.* (2001) *apud* Colombo *et al.* (2009)), está baseada em produzir transientes controlados no sistema como uma condição de contorno conhecida, por exemplo, mediante a operação oscilante de uma válvula ao final de um tramo de tubulação, para produzir escoamento oscilatório e estudar a resposta do sistema, registrada com leituras contínuas de pressão e/ou vazão na seção da válvula. O procedimento é feito para uma faixa de frequências obtendo o diagrama de frequências de resposta do sistema; o diagrama obtido pode ser comparado posteriormente com a resposta de um sistema sem vazamentos, que por sua vez pode ser conseguida com provas de campo ou com estimações teóricas a partir das características do sistema.

Diferentes metodologias de análises na frequência têm sido desenvolvidas; Covas *et al.* (2005) apresenta o método de onda estacionária (SWDM por sua sigla em inglês *Standing wave difference method*), inspirado em uma metodologia para a detecção de interrupções em linhas de

transmissão de eletricidade, que parte das características do sistema e estuda o sistema induzindo escoamento permanente-oscilatório para cada uma de varias frequências escolhidas e mede em cada caso as máximas amplitudes da pressão, para posteriormente realizar o análise espectral das máximas amplitudes; Lee *et. al* (2005) *apud* Colombo *et al.* (2009) propôs uma metodologia similar à análise de transiente inverso mas aplicada no domínio da frequência, com a vantagem do modelo não ser discreto espacialmente, e propôs também uma expressão analítica para as funções de resposta na frequência.

Poucas validações práticas das metodologias baseadas em frequência são apresentadas na literatura, destacando como a primeira a de Lee *et al* (2006) *apud* Colombo *et al.* (2009), que no mesmo trabalho apresentam uma técnica para não depender do estabelecimento de escoamento permanente-oscilatório, permitindo a análise da resposta na frequência gerada com qualquer transiente gerado pela operação da válvula, o que simplifica a sua aplicação prática. A aplicação comprovou a técnica para a detecção de um vazamento individual numa tubulação de uma montagem experimental controlada, mas mostrou também que ainda tem muitas limitações para serem superadas antes da sua aplicabilidade a uma rede real.

4. MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS DEPENDENTES

Na procura por conseguir uma melhor atuação no controle de vazamentos em sistemas reais, são desenvolvidas técnicas baseadas no monitoramento permanente do sistema e a sua análise; que, ao não terem como foco a modelagem hidráulica da rede, superam parte das limitações e problemas que apresentam as técnicas expostas anteriormente no presente trabalho, normalmente dependentes de modelos hidráulicos e de transientes que são complexos e nem sempre precisos. Outras limitações e aspetos por serem desenvolvidos estão ligados a essas metodologias.

4.1. *Monitoramento de redes de distribuição de água para abastecimento*

Dentro dos esforços dos prestadores do serviço de abastecimento de água por melhorar a eficiência dos sistemas, incorporam-se os planos de monitoramento das redes, através dos quais dados de pressão e vazão são obtidos em intervalos discretos de tempo, permanentemente.

Dados os elevados custos e complexidade do monitoramento da rede de forma total, para o projeto e análise dos sistemas de monitoramento define-se o distrito monitorado (DMA, pela sua sigla em inglês, *District Metered Area*); o DMA é uma área discreta de um sistema de distribuição, potencialmente isolável pelo fechamento de válvulas, no qual são medidas as quantidades de água entrando e saindo da área (WLTF-IWA 2007); o termo é igualmente aplicável quando são medidas

as pressões na área, normalmente nos extremos da mesma e em pontos críticos (pressões mais elevadas e baixas) no seu interior.

Com o objetivo principal da detecção de vazamentos, muitos sistemas têm implementado os DMAs e programas de monitoramento, mas as metodologias para a análise dos dados na atualidade são limitadas e insuficientes para cumprir com as características desejáveis de detecção e localização de vazamentos; ditas características incluem segundo resumido por Misiunas (2003), operação contínua, curto tempo de resposta, baixos custos, baixa taxa de falsos alarmes, detecção de vazamentos de diferentes dimensões, e análise da informação on-line.

Os custos dos sistemas de montagem e manutenção do monitoramento são importantes, e na sua operação são frequentes os problemas de perda ou alteração da informação por deficiências do equipamento de medição, transmissão da informação ou outras interferências, o que é um problema dado que a quantidade e qualidade das informações obtidas são de vital importância para as metodologias de detecção baseadas na modelação hidráulica, o que limita sua implementação prática. As metodologias de análise direta do resultado do monitoramento são menos exigentes, mas também menos ambiciosas na qualidade das conclusões, em particular na localização dos vazamentos, ao ser analisados na escala do DMA.

4.2. *Detecção de vazamentos por análise de sinais*

A análise dos sinais provenientes do monitoramento em redes de distribuição de água, na forma de séries de pressões e vazões, para encontrar irregularidades associadas a vazamentos e estimar a sua localização e magnitude é o objetivo central deste tipo de metodologias; em elas, os princípios físicos de interferência do vazamento na propagação das ondas continuam a ser válidos, mas não analisados detalhadamente como nos modelos hidráulicos e de transientes.

Dentre as metodologias desenvolvidas destaca-se aquela apresentada por Buchberger e Nadimpalli (2004), que propõe um algoritmo para a detecção de vazamentos baseado em análises estatísticas sequenciais das medições contínuas de vazão de alta resolução (intervalos de um segundo aproximadamente), tomadas na entrada de uma zona da rede de distribuição bem definida, como um DMA.

As séries de dados de vazões na entrada, preferencialmente obtidas durante períodos de baixo consumo, são analisadas estatisticamente como uma distribuição normal, e posteriormente truncadas até um nível fixado; para o grupo de dados residuais é repetida a análise e o truncamento, até reduzir a série a zero pelos truncamentos sucessivos. Posteriormente é construída uma curva que relaciona as estatísticas da mostra e as suas derivadas com o nível de truncamento, usando

padronização; a dita relação tem um comportamento definido teoricamente, e quando os valores obtidos divergem abruptamente do predito é identificado um vazamento. As informações provenientes de vários medidores de uma mesma DMA podem ser analisadas seguindo a mesma metodologia com uma simples superposição, sempre que continuem a representar o escoamento de entrada à área e nenhuma saída.

Os resultados dessa metodologia produzem uma estimação da existência e magnitude relativa de vazamentos em cada DMA, embora não a localização específica dentro do DMA, sendo proposta principalmente como ferramenta para a priorização das ações de controle de vazamentos (Buchberger e Nadimpalli 2004).

Outros trabalhos de interesse são os de Mounce *et al.* (2006, 2007, 2008) *apud* Romano *et al.* (2009), que descrevem um sistema para detecção de vazamentos e estimação da sua dimensão, no nível de DMA, através do processamento dos dados de vazões com um sistema de redes neurais artificiais e lógica difusa.

Uma das propostas mais completas e inovadoras para a detecção de vazamentos é a de Romano *et al.* (2009) e Romano *et al.* (2010); os autores apresentam um método para identificação e análise on-line de anomalias nas leituras de pressão e vazão, no nível de DMA, para gerar alarmes de vazamentos na rede em tempos curtos, assim como os resultados da aplicação da metodologia com dados de uma rede real. A informação básica para o análise são os dados de pressão e vazão nos extremos da DMA, e de pressão em pontos internos, coletados periodicamente com intervalos da ordem de 15 minutos; estes dados são transmitidos e checados para descartar os errôneos (medidores fora de serviços, etc). Posteriormente, os dados são processados usando a técnica de ondaletas para remoção do ruído, integrados a um modelo de previsão de curto prazo, para identificação de discrepâncias nos sinais, são submetidos à análise estatística; finalmente integra-se um sistema de interferência Bayesiana para determinar a probabilidade de a discrepância representar uma anomalia no sistema, e gerar as alarmes de vazamentos (Romano *et al.* 2010). Complementarmente propõe estudar os dados noturnos para alimentar também o sistema de interferência Bayesiana.

O análise dos sinais de pressão ou de vazão com ondaletas tinha sido trabalhado anteriormente por outros autores (Ferrante e Brunone 2003; e Stoianov *et al.* 2002 e Donoho e Jhonstone 1995 *apud* Romano *et al.* 2009), que apontaram potencialidades importantes na sua aplicação. A análise permite o estudo no domínio do tempo, usando também informação do domínio da frequência, e no trabalho de Romano *et al.* (2009) é usada para eliminar os ruídos no

signal; aplicando a transformação discreta com ondaletas ao sinal de pressão ou de vazão para depois realizar a filtragem do sinal segundo limites estabelecidos.

O uso de ondaletas na análise de sinais de vazão e pressão apresenta vantagens ao evitar as perdas de informação que implicam análises somente na frequência, como a transformada de Fourier que, ao ignorar a dependência no tempo, mostra-se insuficiente, desde o ponto de vista físico, para ser empregada com sinais relativos a situações não permanentes. Dado que nos sistemas de distribuição de água mudanças na frequência ocorrem constantemente devidas a fenômenos transientes, o uso das ondaletas pode manter mais informações de interesse para a análise após a eliminação do ruído.

A identificação das irregularidades proposta por Romano *et al.* (2009) está baseada na comparação entre os valores reais e os previstos por um modelo, sendo este construído a partir dos dados coletados em períodos anteriores e não correspondendo a um modelo hidráulico nem dependente das características da rede. O modelo preditivo de curto prazo usa como variáveis de entrada as pressões/vazões de um conjunto grande de intervalos anteriores, por exemplo, das últimas 24 horas, e gera uma rede de funções polinomiais para representar a sua relação com as variáveis de saída, que podem ser pressões/vazões para o intervalo seguinte.

A técnica utilizada por Romano *et al.* (2009) é Group Method of Data Handling (GMDH), mas outras técnicas para a previsão de curto prazo poderiam ser usadas, incluindo as análises de regressão e as redes neurais artificiais. As vantagens mencionadas pelo autor para o uso GMDH são que não é preciso especificar a forma do modelo e que este utiliza todas as informações disponíveis, o que é importante considerando as imperfeições nos dados adquiridos no monitoramento das redes.

A discrepância entre os valores obtidos e a predição, para cada intervalo, é analisada seguindo o método do controle estatístico de processos (SPC, siglas em inglês para *Statistical Process Control*); a metodologia é desenvolvida sob a ideia de que variações nos processos, neste caso nas leituras de pressão/vazão, podem ser naturais ou externas ao processo, sendo possível diferenciar umas das outras; assim, o método é usado para avaliar se as discrepâncias podem obedecer a situações anormais na rede, especialmente a vazamentos.

Como complementação ou alternativa à avaliação dos dados em curto prazo, é possível usar um modelo de mediano prazo que utilize os valores de pressão/vazão medidos durante o período de mínimo consumo da rede (nas horas da madrugada); baseado nos dados de um grupo de dias anteriores pode-se gerar o modelo e comparar os valores do dia de análise medidos com os preditos, aplicando depois a análise estatística.

Os resultados das análises estatísticas para os dados de pressão/vazão de curto prazo e/ou de longo prazo (noturnos) são incorporados a um sistema Bayesiano de interferência. A análise da interferência estatística procura atualizar a probabilidade de uma consequência dada, baseada na informação disponível sobre o estado atual e as relações estabelecidas no modelo; se considerado no modelo, é possível utilizar os diferentes tipos de informação antes ditos e provenientes de diferentes sensores, num enfoque de sinergia, para avaliar a probabilidade de um vazamento ou outro evento anormal. São definidos limites de probabilidade, acima dos quais o resultado vai ser interpretado como um alarme de vazamento na zona estudada.

Como resultado da metodologia, podem-se obter alarmes de vazamento com as suas probabilidades associadas, sendo uma ferramenta para a identificação das necessidades de intervenção nas redes e sua priorização.

5. CONCLUSÕES

A importância e diversidade dos impactos causados pelos vazamentos nas redes de distribuição, junto à grande incidência dos mesmos nos sistemas municipais ao redor do mundo, fazem que o controle de vazamentos, e em particular sua detecção e localização, seja um tema de grande interesse dentro do panorama dos recursos hídricos.

Nas últimas décadas diversos trabalhos têm sido desenvolvidos, muitos incluindo os vazamentos nos modelos hidráulicos das redes, os quais podem descrever o sistema no regime permanente ou não permanente. Nos modelos em regime permanente, os vazamentos representam demandas de magnitudes desconhecidas que são avaliadas ou analiticamente ou como problema inverso, isso é procurando os valores de vazamento (maiores ou iguais a zero) que geram no modelo valores de pressão/vazão similares aos obtidos por leituras obtidas em diferentes pontos da rede. Essa metodologia está vinculada à calibração dos modelos, e para obter os valores são usadas metodologias de otimização com preferência pelos algoritmos genéticos.

Quanto aos modelos em regime não permanente, estes utilizam as informações variáveis no tempo para cada secção de interesse na rede, e a detecção dos vazamentos está baseada na interferência que causam nas ondas transientes que se propagam pelo sistema. O estudo da onda pode ser abordado no domínio do tempo ou da frequência, e a análise do transiente inverso é o tipo de metodologias mais comum na bibliografia.

As vantagens principais das técnicas baseadas na modelação hidráulica são a possibilidade de obter informação detalhada sobre o fenômeno e suas consequências em toda a extensão da rede,

assim como permitir a análise igualmente detalhada sob cenários criados, o que significa uma ferramenta muito útil para o planejamento e a tomada de decisões.

Quanto à detecção e localização de vazamentos existentes, na bibliografia existem poucos registros de testes práticos em redes de distribuição reais e nenhum sobre a implementação completa de alguma das metodologias baseadas na modelação hidráulica. Além de aspetos da análise dos fenômenos que ainda estão sendo pesquisados, as dificuldades principais para a implementação incluem o alto grau de detalhamento sobre as características do sistema que é requerido para a modelação e a quantidade e qualidade da informação sobre pressões e vazões que é necessária para a aplicação das técnicas em combinação com os modelos. Adicionalmente, para os métodos mais destacados na atualidade, que são baseados no regime não permanente, existe uma importante dificuldade adicional: é necessária informação do sistema sob um fenômeno transiente, mas provocar artificialmente este tipo de fenômenos implica um risco para os elementos da rede.

No esforço dos prestadores do serviço e dos municípios no controle de perdas, implementam-se sistemas de monitoramento de pressões/vazões nas redes, cujos resultados não são sempre suficientes para a implementação dos modelos hidráulicos; a informação obtida é a base para outro grupo de metodologias de detecção de vazamentos, baseadas no monitoramento. As leituras contínuas de pressão/vazão são tratadas com metodologias de análise de sinais para identificar e caracterizar as irregularidades que na mesma podem ser causadas por um vazamento na rede. Técnicas híbridas que incluem vários tratamentos a sinais de pressão e vazão mostram-se aplicáveis a sistemas reais entregando em curto tempo alarmes de detecção de vazamento úteis para as ações de controle. Testes práticos com sistemas reais são reportados na literatura com resultados positivos, embora não se tem informações sobre a implementação definitiva da metodologia em um sistema.

As técnicas baseadas no monitoramento de variáveis dependentes têm como grande vantagem não precisar da modelação hidráulica, conseguido que as tarefas de detecção de vazamentos não sejam dependentes do detalhamento no conhecimento do sistema e seu funcionamento. Como desvantagem, no referente à localização específica do vazamento dentro de uma área da rede estas técnicas oferecem menos exatidão em comparação com a exatidão potencial dos modelos hidráulicos, mas é de notar que dita exatidão potencial é difícil de obter em redes reais.

A pertinência e atualidade do controle de vazamentos fazem que a pesquisa no desenvolvimento de melhores técnicas para a detecção de vazamentos em redes de distribuição de água para abastecimento seja de grande importância, de maneira a prever-se maior interesse e novos

desenvolvimentos nos próximos anos; o foco para essa pesquisa seguirá a ser a procura de metodologias implementáveis em sistemas reais, no mediano prazo.

BIBLIOGRAFIA

Beck, S. B. M., Curren, M. D., Sims, N. D., and Stanway, R. (2005). "*Pipeline network features and leak detection by cross-correlation analysis of reflected waves.*" *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 131(8), 715-723.

Buchberger, S. G., and Nadimpalli, G. (2004). "*Leak Estimation in Water Distribution Systems by Statistical Analysis of Flow Readings.*" *Journal of Water Resources Planning & Management*, 130(4), 321-329.

Colombo, A. F., Lee, P., and Karney, B. W. (2009). "*A selective literature review of transient-based leak detection methods.*" *Journal of Hydro-environment Research*, 2(4), 212-227.

Colombo, F. (2007). "*Calibração de modelos hidráulicos de redes de abastecimento de água de sistemas reais admitindo vazamentos*" Universidade de São Paulo. Brasil

Covas, D., Ramos, H., and de Almeida, A. B. (2005). "*Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems.*" *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 131(12), 1106-1116.

Ferrante, M., and Brunone, B. (2003a). "*Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 1. Harmonic analysis.*" *Advances in Water Resources*, 26(1), 95-105.

Ferrante, M., and Brunone, B. (2003b). "*Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 2. Wavelet analysis.*" *Advances in Water Resources*, 26(1), 107-116.

Ferrante, M., Brunone, B., and Meniconi, S. (2009). "*Leak detection in branched pipe systems coupling wavelet analysis and a Lagrangian model.*" *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 58(2), 95-106.

Kapelan, Z. S., Savic, D. A., and Walters, G. A. (2003). "*A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks.*" *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 481-492.

Liggett, J. A., and Chen, L. C. (1994). "*Inverse transient analysis in Pipe Networks.*" *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 120(8), 934-955.

Misiunas, D. (2003). "*Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems*" Lund University. Suecia

Pilcherd, R. (2007). "*Leak Location and Repair Guidance Notes and..... The Never Ending War against Leakage.*" *Water Loss 2007*, Bucarest, Romênia, 412-422.

Reis, L. F. R., Porto, R. M., and Chaudrhy, F. H. (1997). "*Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm.*" *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(6), 10.

Romano, M., Kapelan, Z., and Savic, D. (2010). *"Anomaly detection based in bayesian interference."* International application published under the patent cooperation treaty (PCT). WO2010/131001 A1

Romano, M., Kapelan, Z., and Savic, D. A. (2009). *"Bayesian-based online burst detection in water distribution systems."* University of Exeter, Inglaterra

SABESP. Companhia de Saneamento básico do estado de São Paulo (2010). *"Controle de Perdas."* Site oficial da SABESP <http://site.sabesp.com.br/>

SNSA, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (2010). *"Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2008."* Ministério das Cidades, Brasil

Soares, A. K. (2003). *"Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão"* Universidade de São Paulo, Brasil

Soares, A. K. (2007). *"Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório"* Universidade de São Paulo, Brasil

Vitkovsky, J. P., Simpson, A. R., and Lambert, M. F. (2000). *"Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms."* Journal of Water Resources Planning and Management-Asce, 126(4), 262-265.

WLTF-IWA, Water loss task force (2007). *"District Metered Areas Guidance Notes."* International Water Association.

Wu, Z. Y., Sage, P., and Turtle, D. (2010). *"Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System."* Journal of Water Resources Planning and Management-Asce, 136(1), 116-128.