

MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: A INFLUÊNCIA DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS

Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes¹

Resumo – As questões de qualidade da água em redes de distribuição podem se degradar por diferentes razões. Neste artigo enfatiza-se a necessidade de se considerar os efeitos de alterações de pressão e velocidade devido aos efeitos dinâmicos de inércia e compressibilidade, como causas potenciais de alteração de qualidade da água. Para lidar com as complexas inter-relações e desafios para se atender aos requisitos de qualidade, requer-se o desenvolvimento de um modelo de análise integrado para que se possa lidar com todas as peculiaridades de um sistema de distribuição de água.

Abstract – The quality of water delivered by a distribution network may degrade for many reasons. More specifically, pressure and velocity variations associated with hydraulic transients or water hammer conditions, particularly through leaks and rapid device adjustments, have the potential to cause water quality degradation. To deal with the complexity of the interrelated threats and challenges to water quality conditions, an integrated approach to the analysis of water distribution system is required. To this end, this paper discuss the necessity or requirement of a new water quality modelling approach to deal with all these aspects in a distribution network. The result is an analysis tool that permits the consideration of a wider range of hydraulic conditions than is currently permitted by the conventional steady-state (or near steady-state) approaches.

Palavra-chave: Qualidade da Água em Redes de Distribuição, Transientes hidráulicos.

¹ Universidade Federal do Paraná – Setor de Tecnologia – Departamento de Hidráulica e Saneamento – Curitiba - PR
CEP: 81.531-990 Fone: 0xx41-361-3142 Fax: 0xx41-361-3143 E-mail: cris.dhs@ufpr.br

INTRODUÇÃO

A degradação ambiental de bacias hidrográficas urbanas é um problema difícil e complexo. Em particular, o comprometimento de bacias hidrográficas, cuja água é utilizada para o consumo humano, em termos de quantidade e qualidade interferindo no tratamento e distribuição da água. O crescente esforço para operar sistemas de abastecimento de água a atender aos requisitos de qualidade da água, definidos pelas agências de abastecimento, demandará uma abordagem integrada para lidar com as novas ameaças e desafios, mais especificamente para problemas relacionados à qualidade da água em redes de distribuição de água.

Este documento apresenta os principais tópicos sobre problemas relacionados à qualidade da água em sistemas de distribuição de água e descreve as principais atividades necessárias para consolidar esta abordagem integrada. O objetivo é avaliar, baseado na compreensão dos modelos de representação hidráulica e de transporte de constituintes (desinfetantes), as suas consequências sobre o sistema bacia hidrográfica – tratamento – distribuição de água. Estão relacionados, a seguir: a interferência de ações externas para os sistemas de distribuição de água, as alterações nos componentes de qualidade da água e o papel da modelagem em si. É proposta uma abordagem integrada para consolidar a pesquisa.

EVIDÊNCIAS DE INTERESSE

O problema da qualidade da água em redes de distribuição de água é, muitas vezes, visto como separado ou diferenciado dos grandes problemas de degradação ambiental. De fato, em um primeiro nível, a estação de tratamento de água é projetada para assegurar esta separação. Entretanto, os processos de degradação resultantes do desenvolvimento humano excedem, muitas vezes, os limites naturais e podem provocar grandes modificações nos ciclos naturais. Por exemplo, o processo de urbanização, particularmente quando associado a inadequados tipos de solo e uso de terras, pode prejudicar seriamente a capacidade dos sistemas de abastecimento de ofertar água com boa qualidade. Entretanto, existem importantes diferenças e condições para países desenvolvidos ou em desenvolvimento. Em países desenvolvidos, o impacto da degradação ambiental tem sido, no mínimo, parcialmente controlado. A combinação de projetos integrados de gerenciamento de recursos hídricos, aliados às melhorias sócio-culturais, estabilização econômica, resolução de conflitos e envolvimento público são os fatores responsáveis por uma nova postura ou consciência ambiental. Por outro lado, em países ainda em desenvolvimento, este nível de consciência ainda não é evidente e os problemas ambientais são mais comuns e sérios. A degradação de bacias de abastecimento de água, o aumento do risco de enchentes nas bacias e a disposição final inadequada de resíduos líquidos e sólidos são preocupações ambientais comuns. Em muitos casos, não é observada somente a degradação da qualidade da água no ponto de captação, mas existe também um aumento dos riscos dos efeitos do escoamento transiente no sistema de distribuição como um todo. É comum se interromper o tratamento ou distribuição de água devido à deterioração da água bruta captada ou à falta de energia elétrica. Evidentemente, dentro de tal contexto, as regras usuais para a avaliação da confiabilidade ou flexibilidade dos sistemas de distribuição são quebradas.

Em termos de modelagem, muitos modelos de qualidade da água assumem como condições de contorno fornecidas e necessárias valores de ofertas e demandas, se não constantes, ao menos bem comportadas e previsíveis. Este fato produz uma evidência adicional, de que a influência de ações externas sobre os sistemas de distribuição de água tem sido ignorada. Assumindo, por exemplo, a degradação da qualidade da água no ponto de captação de água bruta e a flexibilidade do sistema de tratamento para garantir o critério de qualidade da água requerido, é possível que isto cause mudanças significativas nas concentrações do constituinte/desinfetante, mudanças que podem ter

maior importância, ou eventualmente interferir, nos muitos mecanismos de transporte. Uma vez que estas mudanças podem também ocasionar diferentes cenários hidráulicos, o efeito final pode ser ampliado.

A MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA

A modelagem da qualidade da água em sistemas de distribuição é uma ferramenta que tem sido usada para prever o transporte e a propagação de substâncias dissolvidas. Estes modelos estão ganhando importância por várias razões, que incluem: o aumento das exigências de controle por meio de legislação governamental; as mudanças nas expectativas dos consumidores, em especial no que concerne à qualidade da água; o registro crescente do número de incidentes envolvendo questões de qualidade da água; e a divulgação e popularização para o uso de técnicas de monitoramento e gerenciamento para fins de qualidade da água (Rossman e Boulos, 1996). Este item trata dos principais processos de modelagem e identifica, resumidamente, onde são necessárias modificações e tópicos para pesquisa.

Um modelo de qualidade da água é um produto de dois módulos computacionais básicos. O primeiro módulo, determina as condições hidráulicas baseado nas equações uni-dimensionais do momento e continuidade (Karney, 1996). Na maioria dos casos, é assumido um determinado cenário hidráulico (permanente, incompressível não permanente, ou compressível não permanente). O segundo módulo relacionado à qualidade da água é dependente do modelo hidráulico para avaliar os caminhos de fluxo no sistema de condutos, a mistura a partir de diferentes fontes pontos, a diluição de contaminantes e os tempos de percurso/detenção da água (Elton et al., 1995).

A base de qualquer modelo de qualidade da água é uma equação descrevendo o transporte de água e contaminante/desinfetante. A equação uni-dimensional de advecção-dispersão com reação (considerando decaimento do contaminante/desinfetante) representa o mecanismo básico do transporte físico. Ela considera advecção por transporte de volume (velocidade) e dispersão devido aos efeitos da parede do tubo sobre a difusão axial do constituinte dado por:

$$\frac{\partial C_i(x, t)}{\partial t} + u_i \frac{\partial C_i(x, t)}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C_i(x, t)}{\partial x^2} + K C_i(x, t) = 0 \quad (1)$$

onde: $C_i(x, t)$ = concentração do elemento; x = dimensão do espaço longitudinal; t = tempo; u_i = velocidade média do escoamento em um segmento de tubo “i”; K = coeficiente de decaimento da concentração e D = coeficiente de dispersão longitudinal.

Baseado neste conceito, modelos computacionais tem sido desenvolvidos para simular o comportamento da qualidade da água de determinados elementos/desinfetantes em sistemas de distribuição, baseado em condições de movimento permanente estável e/ou condições dinâmicas (Islam e Chaudhry, 1998). Mais frequentemente, a reação do cloro residual através de sistema de condutos (Rossman, 1993) é analisada, considerando seu grande emprego como desinfetante em sistemas de água potável. O cloro influencia a formação de DBP (Disinfection-by-products), o recrescimento de bactérias, a corrosão do material de condutos e a liberação de metais dissolvidos para dentro das características de escoamento de água. A razão principal se baseia nos efeitos de efeitos da advecção como os responsáveis pelos principais mecanismos de mistura através da rede de distribuição (Rossman, 1993). Muitos modelos, no entanto (EPANET, PICCOLO, NET e DWQM) negligenciam a contribuição por dispersão axial.

O objetivo de um modelo de qualidade da água é aproximar adequadamente a solução das equações governantes através do controle ou redução dos erros numéricos. Alguns estudos de caso têm sido apresentados, assumindo dados (isto é, usando dados fictícios) ou usando dados de campo limitados. Infelizmente, somente poucas medidas de campo são descritas na literatura. Embora um primeiro passo lógico, a questões conceituais estão relacionadas à identificação dos mecanismos primários de transporte nas características de escoamento pois isto influencia muito a análise da concentração do constituinte/desinfetante. A equação clássica uni-dimensional de advecção com

reação (1), na maioria dos casos, representa o principal mecanismo de transporte em sistemas de distribuição de água. Essa hipótese assume um perfil de velocidades uniforme (plug-flow) e não leva em conta, diretamente, o esforço cortante nos contornos do tubo. Em condições de escoamento real, o esforço cortante nas paredes de um tubo tem efeito sobre a distribuição de velocidades transversalmente à seção (Axworthy e Karney, 1996). Como exemplo, Axworthy e Karney (1996) mostraram que, sob períodos de escoamento lento, os efeitos dispersivos podem se tornar importantes, causando diferenças significativas, quando comparando os modelos advectivos e advectivos-dispersivos. No caso dos efeitos dos transientes hidráulicos, poucos resultados tem sido apresentados na literatura. O impacto do perfil de velocidade e condições de esforço cortante pode ser grande o bastante, que a consideração somente da advecção é insuficiente para garantir a precisão dos prognósticos de qualidade da água. Alguns estudos complementares são necessários para investigar os efeitos sobre as condições de transporte nas características do escoamento e os efeitos sobre o transporte de elementos/desinfetantes.

Qualidade da Água em Sistemas de Distribuição

Os problemas da qualidade da água em sistemas de distribuição água são fortemente influenciados por diversos fatores diferentes, que incluem: o decaimento de cloro residual; o crescimento de bactérias devido à temperatura; a presença de carbono orgânico assimilável (AOC) (LeChevallier et al., 1994); a formação de biofilme nas paredes do conduto induzindo a diminuição de cloro residual (Wable et al., 1994) que influenciam química e microbiologicamente a corrosão interna das paredes do tubo; longos tempos de detenção em tanques de armazenamento; e o crescimento e o decaimento de subprodutos de desinfecção (DBPS – disinfection-by-products) (Romain, 1996).

A qualidade da água pode também ser influenciada por efeitos transientes, não somente pelo aumento do risco de rompimento do tubo, devido a variações significativas da pressão, mas também por produzir biofilmes, corrosão e/ou incrustações (tuberculation) sobre a parede do tubo mais susceptível ao transporte por altas velocidades e esforços cortantes (Karney et al., 1994; Karney e Brunone, 1999). A função do perfil de velocidade e esforço cortante em problemas da qualidade da água, devido à natureza dos efeitos transientes, associados com o escoamento turbulento, também é um importante mecanismo. O escoamento considerando o efeito de transiente hidráulico influencia todos os mecanismos de transporte de massa no sistema (Brunone et al., 1999).

Como mencionado anteriormente, muitos modelos de qualidade da água incorporam modelos de decaimento de cloro com taxa de decaimento de primeira ordem (Rossman, 1993; Islam e Chaudhry, 1998). Na maioria dos casos, os modelos de qualidade da água tem sido aplicado com bastante sucesso em estudos de caso, onde se considera a comparação entre resultados teóricos e aqueles obtidos através de medições de campo. Entretanto, condições dinâmicas são representadas por condições de escoamentos lentos (low-flow conditions, quase-steady state) e poucos resultados são relacionados à influência do tipo de material do tubo e diâmetro.

Contudo, o problema da modelagem do crescimento de bactérias e os efeitos do biofilme não são, necessariamente, relacionados somente à interpretação dos mecanismos do decaimento de desinfetante-residual (Cloro). Outros fatores importantes que podem ser ignorados no processo de modelagem, incluindo efeitos de corrosão interna e formação de DBPs. O crescimento de bactérias em sistemas de distribuição é um fenômeno comum e, em geral, ocorre quando materiais orgânicos e sedimentos se acumulam em tubulações de distribuição, o cloro residual se dissipa e as temperaturas da água aumentam. A presença de nutrientes na água, corrosão, acúmulo de sedimentos e a hidráulica são outros fatores (LeChevallier, 1990).

A formação de biofilme sobre as paredes do tubo é uma fonte de aumento no número de bactérias coliformes nos sistemas de distribuição (LeChevallier, 1990). Este crescimento pode deplecionar os resíduos de cloro taxas maiores do seria esperado na sua ausência. O mecanismo de difusão do desinfetante no biofilme, não somente inativa a bactéria, como também induz o movimento pelo volume de água. A influência de desinfetantes alternativos ao cloro (por exemplo,

monochloramine) e o material do conduto tubo tem sido registrados como fatores críticos na determinação das concentrações de certas bactérias nos sistemas de distribuição (LeChevallier, 1990).

A corrosão interna da parede do tubo devido a reações químicas entre a parede do tubo e o volume de água ou a corrosão induzida microbiologicamente, influenciam, claramente, a qualidade da água. O pH e a alcalinidade da água tratada e a influência de altas temperaturas e grandes resíduos de cloro, combinados com aumento nas velocidades do escoamento, produzem aumento na alcalinidade e concentração de metais dissolvidos no volume de água.

O aumento das concentrações de DBP, observado em sistemas de distribuição de água devido a um maior tempo de contato entre precursores (ácidos húmico e fúlvico) e oxidantes é outra preocupação. Como resultado, o balanço entre a formação de DBP e a proteção microbiana, é um foco de intensa pesquisa. Os modelos numéricos existentes para a predição da formação/decaimento de DBP são similares aos desenvolvidos para predição em uma estação de tratamento (Singer, 1994). Os experimentos em escala (batch-scale) não levam em conta as condições hidráulicas, a formação de biofilme, as condições de mistura e as reações na parede do tubo, sendo que muitos destes efeitos são ignorados pela existência de modelos de qualidade da água.

A combinação de todas estas características de qualidade da água reflete a complexidade do problema de modelagem, mesmo considerando somente condições de contorno permanente. Em uma análise mais abrangente, Lu et al. (1995), apresentaram um modelo que avalia o transporte simultâneo de substratos, desinfetantes e microorganismos, considerando a interação/reacção dos componentes uns com os outros e as reações com a parede do tubo e biofilme. Apesar da consideração da difusão na direção radial, combinada com o transporte advectivo radial, a análise não considera diretamente a influência de diferentes velocidades do escoamento.

Além da interação/reacção dos componentes da qualidade da água, é necessário avaliar quais os efeitos sob condições sob diferentes condições de escoamento. Espera-se que as características do perfil de velocidades e esforços cortantes possam ter influência significativa sobre os mecanismos de formação de biofilme, crescimento de bactérias e corrosão interna; entretanto, poucos modelos de qualidade da água consideram tais fatores. Para ilustrar, a modelagem do consumo de desinfetante na parede do tubo é aceita como completa, sem o retorno do cloro para o volume de água. Rossman et al. (1994) assume que a difusão axial é responsável pelo transporte de cloro na parede do tubo, com nenhum efeito sobre o transporte na dispersão da pluma inicial de concentração. Deste modo, o modelo é incapaz de avaliar diretamente para níveis variáveis de biofilme através do sistema, aquele que influencia o consumo de cloro na parede do tubo.

Modelagem Hidráulica

A modelagem hidráulica para sistemas de distribuição de água é tradicionalmente feita usando modelos permanentes ou “quase-permanentes”. Mesmos se os efeitos transientes são considerados, eles raramente são considerados dominantes. Mas, ações externas nos sistemas de distribuição de água (por exemplo, diminuição da qualidade da água na tomada de água de um sistema de abastecimento), podem induzir um elevado número de eventos transientes; igualmente, ainda que por tempo limitado, estes efeitos podem gerar novas características hidráulicas (isto é, pressões e distribuição de velocidades diferentes na rede). Estas novas condições hidráulicas podem deteriorar a qualidade da água, não somente devido aos efeitos sobre o mecanismo de transporte, mas também aumento do risco de rompimento de tubulações e vazamentos distribuídos dentro do sistema. Os vazamentos são potencialmente sérios, uma vez que eles podem permitir que constituintes entrem na rede, particularmente sob condições de baixa-pressão. As condições hidráulicas necessitam de uma avaliação mais cuidadosa que a usualmente empregada.

A ênfase em usar a abordagem contínua para a modelagem hidráulica é baseada não somente na descrição matemática de diferentes características físicas do escoamento, mas também no método de aproximar as condições de escoamento para tempos distintos ao longo do contínuo

(Axworthy, 1997). Mais especificamente, uma classificação é possível, a qual inclui condições de escoamento compressível/incompressível não permanente, uniforme/não-uniforme, quase-permanente e permanente, como um caso especial da equação diferencial unidimensional hiperbólica e não linear. As equações do momento e da continuidade são dadas por:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fv|v|}{2d} = 0 \quad (2)$$

$$v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

nas quais: $v = v(x, t)$ velocidade instantânea média do fluido; d = diâmetro do tubo; $H = H(x, t)$ altura piezométrica; a = celeridade da onda de propagação do material da parede do tubo; g = aceleração devido à gravidade e “ f ” = coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach, assumido como constante e determinado sob condições de estado estável para cada tubo.

Para cada tipo de escoamento, o procedimento computacional para solucionar as várias equações de escoamento é diferente. O método das características é usado para o caso compressível instável (Wylie e Streeter, 1993); a solução modificada de Euler, para escoamento não permanente de fluido incompressível (Chaudhry et al., 1985) e o método de Euler inverso (backward method) e a abordagem denominada de lumped-system para o caso quase-permanente (Islam e Chaudhry, 1998). Como consequência, a possibilidade de procedimentos numéricos diferentes solucionando características de escoamento transiente específicas, tem conduzido a um critério numéricos para definir as possíveis regiões de transição de escoamento (Axworthy, 1997; Axworthy e Karney, 1996; Karney, 1990).

Ainda que exista a necessidade de identificar bons procedimentos numéricos, a interação de modelos hidráulicos com modelos de qualidade da água precisos não é fácil de se conseguir sob uma extensa gama de condições hidráulicas. Neste sentido, Axworthy (1997) resumiu este conceito enfatizando a necessidade de uma reorientação do esquema numérico, através de algumas questões chave, tais como a possibilidade de diferentes estados transientes ao mesmo tempo e em diferentes locais e como a transição entre diferentes estados é considerada.

Muitos modelos denominados dinâmicos são, de fato, modelos hidráulicos sequenciais ou modelos quase-permanente (Islam e Chaudhry, 1998; Boulos et al., 1994; Rossman et al., 1994). Esta aproximação simplifica a sequência de eventos dentro de um processo contínuo. Especificamente, a representação unidimensional de escoamentos em sistemas de condutos, com representação dos perfis de velocidade e do fator de atrito assumidos a partir da velocidade em regime permanente (Brunone et al., 1999). Os efeitos inerciais não são considerados (compressibilidade e deformabilidade são negligenciados), qualquer mudança na massa armazenada é desprezada e as condições do escoamento somente podem mudar lentamente; tais considerações são claramente pouco razoáveis para condições que mudam rapidamente. Neste contexto, estas simplificações justificam as diferenças apresentadas por Islam e Chaudhry (1998), quando compararam os resultados de seu modelo com os resultados do EPANET (Rossman, 1993).

Ainda, outra consideração é relacionada ao coeficiente de atrito “ f ”, que é, muitas vezes, calculado a partir de considerações de estado-permanente. De fato, é sabido que os esforços tangenciais na parede não estão em fase com a velocidade média. Como resultado, podem ser geradas imprecisões se a dissipação de energia não permanente significativamente exceder a dissipação de energia permanente. Desta maneira, a avaliação indevida do coeficiente de atrito “ f ” pode afetar as estimativas de qualidade da água, especialmente aquelas relacionadas à formação de biofilme e corrosão.

UMA ABORDAGEM INTEGRADA – OBJETIVOS

Diferentes abordagens têm sido consideradas para modelar os vários mecanismos de transporte de desinfetantes/elementos em sistemas de distribuição de água. Todas as aproximações predizem o transporte de massa de um determinado elemento, para uma condição hidráulica específica e usual, assumindo a concentração do constituinte (desinfetante) inicial como aquela especificada pelas condições de tratamento. Entretanto, as normas de para condições de qualidade de água tratada mais rígidas, impõe a necessidade não somente de um entendimento de condições apropriadas para os sistemas de tratamento/distribuição, mas também, mas também um desenvolvimento contínuo dos sistemas de gerenciamento integrado, para garantir a qualidade da água tanto na condição de tratamento quanto nos pontos de consumo (Thomann, 1998).

Uma abordagem integrada necessita de uma integração progressiva dos processos de tratamento/distribuição de água, considerando a influência dos mecanismos que induzem a degradação ambiental na bacia hidrográfica. Este é um processo complexo e eventualmente pode ser avaliado se ferramentas numéricas permitirem uma indicação apropriada dos principais parâmetros de qualidade da água. No mínimo, este processo requer:

- a) Análise das modificações da qualidade da água em sistemas de distribuição sob diferentes condições hidráulicas;
- b) Avaliação da interação entre perfis de velocidade e esforço cortante, sob condições laminar, turbulenta e transiente, provocadas por fatores externos;
- c) Análise dos efeitos da compressibilidade e sua influência sobre os parâmetros de qualidade da água em um sistema de distribuição;
- d) O desenvolvimento de procedimentos numéricos de qualidade da água, os quais simulam os efeitos dos parâmetros de qualidade da água integrados, como desinfetante-residual, formação de DBP, crescimento de microorganismos, corrosão, tempo de residência e formação de biofilme;
- e) Avaliação do impacto de ações externas sobre a flexibilidade dos projetos de tratamento de água para melhorar a água tratada e, conseqüentemente, sobre os contornos numéricos dos modelos de qualidade da água;
- f) Avaliação do impacto de vazamentos distribuídos sobre as condições de qualidade da água no sistema;
- g) Desenvolvimento de calibrações associadas e técnicas de coleta de dados.

A definição deste procedimento numérico alternativo permitirá uma avaliação da importância do procedimento de todo o sistema para distintas condições de contorno distintas, especialmente aquelas necessárias para a solução das equações governantes em modelos de qualidade da água.

ESTABELECENDO UM NOVA ABORDAGEM PARA A MODELAGEM NUMÉRICA

A fim de obter o desenvolvimento de um modelo de qualidade da água amplo sob condições transientes, os seguintes estágios devem ser considerados: a consolidação do módulo hidráulico, o desenvolvimento numérico do módulo de qualidade da água e a validação das atividades, incluindo medições de campo e estudos da escala usada em laboratório. Fernandes (2002) aplicou esta metodologia para um sistema de condutos em série, com resultados muito promissores. No entanto, uma abordagem experimental e de campo ainda se faz necessário e será a base da presente metodologia de pesquisa.

A Componente Hidráulica

A componente hidráulica é uma questão importante dentro da análise global. Para garantir um procedimento numérico amplo, uma estrutura geral flexível para a análise de quase-equilíbrio, compressível instável e incompressível instável deve ser considerada. A estrutura numérica seguirá soluções baseada no método das características (MOC), como descrito por Karney e McInnis (1992), Guidaoui et al. (2002), e Zhao e Guidaoui (2003). Esta configuração hidráulica numérica apoiará os experimentos que serão realizados durante a análise de transporte de massa.

Módulo da Qualidade da Água

O núcleo central desta pesquisa é a investigação do impacto do transiente hidráulico sobre o mecanismo de transporte de massa. De fato, o transporte ou movimento de substâncias dissolvidas em água é uma peça fundamental na determinação da qualidade e uso potencial da água. Com um entendimento adicional das transformações químicas e biológicas que ocorrem na água, um aspecto mais amplo dos principais processos que ocorrem nos sistemas de água pode ser construído. Estes processos são representados pela equação da advecção-difusão (eq. 1). A análise do cloro residual é o objetivo desta pesquisa.

A solução da ADE descreve a distribuição da concentração química através do espaço e tempo. A parcela da advecção é definida como o transporte do constituinte influenciado pelo movimento do volume do fluido. Isto é descrito pela equação diferencial parcial de primeira ordem hiperbólica, a qual propaga uma velocidade de onda finita igual a dx/dt . Informações a respeito da advecção durante um tempo “ t ” depende, sobretudo, da região do espaço definida pela velocidade média “ u ” x “ t ”, para variações no tempo.

A difusão é a mistura, devido ao movimento aleatório das partículas do constituinte (difusão molecular), ou do fluido (difusão turbulenta). O processo difusivo é descrito por uma equação diferencial parcial de segunda ordem parabólica. A análise das curvas características, apresentada por Hoffman (1991), indica que a informação difusiva se propaga a uma velocidade de onda infinita. Conseqüentemente, os sinais se propagam a uma velocidade infinita ao longo das linhas de tempo constante. Em outras palavras, a concentração de determinados pontos no espaço a um dado tempo depende, sobretudo, de uma região espacial inteira para o instante “ t ” e para os instantes anteriores de tempo.

De fato, a combinação de dois processos físicos com representação matemática peculiar é a razão da complexidade da solução da ADE. Como consequência, existem poucos problemas práticos de transporte que tem uma solução analítica pela ADE. Deste modo, o cálculo numérico destas soluções é, muitas vezes, limitado e, devido a termos não-lineares, pode não ser eficiente. A adição da componente do perfil de velocidade sob condições transientes e não permanente (Brunone et al., 1999) é um fator externo que traz uma complexidade adicional ao problema.

A atividade chave é encontrar o procedimento numérico que melhor represente estes componentes. Os métodos da diferença-finita e das características serão considerados neste trabalho, incluindo as seguintes análises: expansão de séries de Taylor, consistência e estabilidade, precisão física, monotonicidade, aproximações infinitas (implícitas) e finitas (explícitas), descontinuidades, condições de contorno, eficiência e necessidade de recursos.

Testes de Validação em Laboratório

A medição de perfis de velocidade sob condições transientes, como sugerido por Brunone et al. (1999), indica que, se a natureza das mudanças de escoamento, causada por condições transientes hidráulicas, podem afetar as características da qualidade da água em sistemas de distribuição de condutos. A combinação entre perfis de velocidade e esforço cortante pode promover um processo de mistura adicional, conseqüente dos intensos gradientes de velocidade, os

quais transportam o material, com eficiência, entre o volume de escoamento (bulk flow) e a parede. Sob as mesmas taxas elevadas de cortante, pode ocasionar resuspensão de biofilme e de partículas (Brunone et al., 1999).

Os testes de laboratório são recomendados para complementar e melhor entender o comportamento dos perfis de velocidade e esforço cortante, sob condições transientes, e o seu impacto sobre o mecanismo de transporte de massa. A sugestão para investigação é o uso dos procedimentos experimentais, semelhantes aos de Brunone et al. (1999), com base em traçadores conservativos (Flúor) para investigar a concentração do constituinte a partir do cenário hidráulico não-permanente.

O resultado esperado, neste caso, é a consideração de uma base de dados que permitirá a análise da distribuição de pressões e velocidades e sua relação com o transporte de massa de um dado elemento.

Medições de Campo para Validação

As medições de campo são também recomendadas para a validação dos modelos desenvolvidos. O objetivo é estabelecer medições de campo de um determinado elemento (cloro, flúor), conhecendo as condições hidráulicas em progresso. Em um determinado instante de tempo e considerando alguns locais de amostragem pré-identificados, avalia-se a pressão (Karney e Brunone, 1999) e a concentração de desinfetante. O cloro é um desinfetante, inicialmente analisado considerando seu amplo uso e o procedimento simples para sua medição no campo. Esta atividade é relevante, considerando que poucos dados tem sido relatados na literatura e, por isso, há o fato de existirem poucas análises para representar o sistema todo. Será utilizado procedimento similar ao adotado por Tang et al. (1999).

RESULTADOS ESPERADOS

A análise de diferentes condições hidráulicas e a influência sobre a componente de qualidade da água em sistemas de distribuição permitirá um entendimento melhor do desenvolvimento do perfil de velocidades e esforços cortantes, quando na análise do mecanismo de transporte de massa. Esta é uma diferença importante relacionada aos modelos de qualidade da água na literatura que, em geral apresentam a solução de transporte de elementos baseada na hipótese de estado permanente.

Portanto, em um primeiro estágio, espera-se um melhor entendimento dos principais aspectos físicos dos mecanismos de transporte sob condições transientes e sua representação numérica, considerando estabilidade numérica, convergência e consistência. Esta condição permitirá uma análise mais ampla da análise da qualidade da água em sistemas de distribuição, incluindo a possibilidade de investigar diferentes séries, como descrito por Fernandes e Karney (1999).

Além disso, são esperados elementos para uma comparação numérica entre modelos diferentes, incluindo elementos baseados em medições de campo. Com o aumento do conhecimento para identificar e calibrar os sistemas de distribuição de água para entender as condições transientes (Tang e Karney, 1999), uma combinação adequada de medições de um determinado elemento/desinfetante permitirá a avaliação da eficiência da solução numérica proposta e uma comparação com os resultados identificados na literatura.

COMENTÁRIOS FINAIS

Esta proposta enfatiza as atividades para consolidar as ferramentas alternativas para a análise da qualidade da água em sistemas de distribuição, considerando um tratamento mais amplo sobre condições hidráulicas transientes. A expectativa de que cenários hidráulicos diferentes possam influenciar a características de qualidade da água na rede, com possíveis efeitos sobre as propriedades biológicas e químicas, é um assunto de grande motivação para esta pesquisa. A idéia

de reproduzir este caminho e sua comparação com os modelos tradicionais encontrados na literatura é uma evolução natural do processo de estudo.

REFERÊNCIAS

- Axworthy, D. (1997). *Water distribution network modeling: from steady state to waterhammer*. Ph.D. thesis, Dept. de Engenharia Civil, Universidade de Toronto, Toronto.
- Axworthy, D.; Karney, B. (1996). *Modeling low velocity/high dispersion flow in water distribution systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 122, n. 3, p. 218-221.
- Boulos, P. F.; Altman, T.; Jarrige, P. A.; Collevati, F. (1994). *An event-driven method for modeling contaminant propagation in water networks*. Journal of Applied Mathematical Modeling, v. 18, p. 84-92.
- Brunone, B.; Karney, B.; Ferrante, M. (1999). *Velocity profiles, unsteady friction losses and transient modeling*. International Conference on Computing and Control for the Water Industry Journal of Water Resources Planning and Management.
- Chaudhry, M. (1987). *Applied hydraulic transients*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Elton, A.; Brammer, L. F.; Tansley, N. S. (1995). *Water quality modeling in distribution networks*. Journal of American Water Works Association, n. 87(7), p. 44-52.
- Ghidaoui, M, Mansour, G., Zhao, M. (2002) *Applicability of quasi steady and axisymmetric turbulence models in waterhammer*. Journal of Hydraulic Engineering, 128 (10), 917-924.
- Islam, M.; Chaudhry, M. (1998). *Modeling the constituent transport in unsteady flows in pipe networks*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 124, n. 11, p. 1115-1124.
- Karney, B. (1996). *Understanding transients in pipelines systems: computer power and engineering insight*. Uni-Bell PVC Pipe News, n. 17(1), p. 8-12.
- Karney, B. (1990). *Energy relations in transient closed-conduit flow*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, n. 116(10), p. 1180-1196.
- LeChevallier, M. W. (1990). *Coliform regrowth in drinking water: a review*. Journal of American Water Works Association, n. 82(11), p. 74-86.
- Lu, C.; Biswas, R; Clark, M. (1995). *Simultaneous transport of substrates, disinfectants and microorganisms in water pipes*. Water Research, n. 29 (3), p. 881-894.
- Pendlebury, M. (1998). *Sensors, pipeline and intelligent decision making – progress of the smartpipe project*. M.Sc. Thesis, Dept. de Engenharia Civil, Universidade de Toronto, Toronto.
- Romain, D. (1996). *Modeling impacts of ozone disinfection on distribution system water quality*. M.Sc. Thesis, Dept. de Engenharia Civil, Universidade de Toronto, Toronto.
- Rossman, L. A.; Boulos, P. F. (1996). *Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: a comparison*. Journal Water Resources Planning and Management, ASCE, n. 122(2), p. 137-146.
- Rossman, L. A.; Clark, R. M.; Grayman, W. M. (1994). *Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems*. Journal of Environmental Engineering, ASCE, n. 120(4), p. 804-820.
- Rossman, L. A. (1993). *EPANET users manual*. Risk Reduction Engineering Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Singer, P. C. (1994). *Control of disinfection by-products in drinking water*. Journal of Environmental Engineering, n. 120, p. 727-744.

Thomann, R. V. (1998). The future “golden age” of predictive models for surface water quality and ecosystem management. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, v. 124(2), p. 94-103.