

Modelo Hidráulico Baseado no Método das Características: Análise de Convergência e Comparações com o EPANET

Felipe Fernandes Viana de Araújo

Pós-Graduação em Recursos Hídricos - UFC

felipearaujo@secrel.com.br

Marco Aurélio Holanda de Castro

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - UFC

marco@ufc.br

Antônio Marozzi Righetto

Departamento de Engenharia Civil - UFRN

righetto@ct.ufrn.br

Recebido: 21/05/08 – revisado: 02/10/09 – aceito: 12/07/10

RESUMO

Neste estudo é apresentada uma análise de um modelo que utiliza o Método das Características (MOC) para simulação hidráulica de redes de abastecimento de água em regime permanente e quase-permanente. Este foi desenvolvido na linguagem de programação DELPHI, introduzindo novas capacidades ao modelo CALHIDREDMT de Righetto (1994). Foram realizadas simulações em redes equipadas com reservatórios de nível fixo e variável, estações elevatórias e boosters, considerando situações estáticas e de período estendido (24 horas). Os resultados foram comparados a simulações realizadas no EPANET. Para os elementos reservatórios de nível fixo, estações elevatórias e boosters verificaram-se erros relativos inferiores a 1% para as pressões e vazões. Na modelagem de reservatório de nível variável, os valores de vazão apresentaram erro relativo da mesma ordem de grandeza dos demais elementos, enquanto os valores de pressão apresentaram erro relativo máximo de 6,6%, fato associado às limitações e diferenças da metodologia de ambos os modelos para solucionar esse tipo de equipamento. Foram analisados aspectos da convergência do MOC, para diferentes valores da celeridade (parâmetro numérico), quando da introdução dos consumos nodais de forma gradual no cálculo hidráulico e para redes com tubos de comprimentos variáveis.

Palavras-chave: modelagem hidráulica, abastecimento de água, método das características.

INTRODUÇÃO

A operação de sistemas urbanos de distribuição de água é uma tarefa complexa, sendo necessário garantir confiabilidade de atendimento das demandas de consumo com pressões desejadas e economia de energia elétrica no uso dos equipamentos de manobra.

Durante a operação desses sistemas, o seu comportamento hidráulico é influenciado pela mudança dos padrões temporais de consumo, variação dos níveis de tanques, acionamento e desligamento de bombas, abertura e fechamento de válvulas, etc, que resultam na oscilação das pressões e velocidades nos escoamentos.

A modelação computacional, associada a uma adequada percepção física dos sistemas e fenômenos que possam ser gerados, pode contribuir para um adequado funcionamento dos mesmos e assim melhorar a execução e exploração das obras, nas vertentes econômicas, de segurança e de qualidade de serviço às comunidades (Amado & Marques, 2004).

Nesse sentido, diversos autores têm desenvolvido estudos visando aprimorar as técnicas de modelagem em condições permanentes (Shamir & Howard (1968); Wood & Charles (1972); Isaacs e Mills (1980)) e em regime transitório (Wylie & Streeter (1978, 1983, 1993), Chaudhry (1979; 1987) e Almeida & Koelle (1992)).

Na análise hidráulica do período estendido, em regime permanente de escoamento, considera-se que modificações nas pressões e vazões ao longo do sistema ocorram instantaneamente, ou seja, após uma perturbação, o escoamento no sistema passa de uma condição estática para outra, negligenciando-se o tempo transcorrido para a estabilização do escoamento e os efeitos dinâmicos da transição. No entanto, as condições hidráulicas em sistemas de distribuição de água estão quase sempre em contínuo estado de alteração. Dada essa característica dinâmica, as considerações de escoamento permanente nas análises hidráulicas certamente limitam o emprego dos modelos computacionais (Soares et al., 2008).

Para os escoamentos variáveis, o modelo mais utilizado e que apresenta excelentes resultados em termos de exatidão da solução (vazões e pressões) é o Método das Características (MOC). No entanto, este método no caso de sistemas complexos e com características físicas muito heterogêneas, mormente em termos de "rigidez", exige grande esforço computacional em termos de tempo de execução e memória necessária ao cálculo (Amado & Marques, 2004).

Segundo Soares et al. (2008), para a análise de transitórios hidráulicos em condutos sob pressão dois modelos podem ser considerados: o modelo da coluna rígida, quando são admitidos líquido incompressível e conduto rígido, empregado para analisar os fenômenos de oscilação de massa (transitórios lentos com baixas frequências), e o modelo da coluna elástica, que considera os efeitos de elasticidade do líquido e do conduto, utilizado para a análise do golpe de aríete (transitórios rápidos com altas frequências).

Abreu et al. (1999) apresentam parâmetros adimensionais para definir os limites da aplicabilidade dos modelos inercial elástico, inercial rígido e não-inercial quase-estático, que formam o grupo dos modelos dinâmicos, além do modelo estático, usado para análise do regime permanente.

Classicamente o MOC foi utilizado na resolução de problemas de engenharia envolvendo escoamentos variáveis Wylie & Streeter (1978), partindo de condições predeterminadas de regime permanente e de condições de fronteira particulares. Posteriormente, foram efetuados esforços no sentido de aplicar o modelo à determinação de equilíbrios hidráulicos em regime permanente em pressão (Fox & Keech, 1975; Vardy & Chan, 1983; Shimada, 1988). No Brasil destacam-se os trabalhos de Koelle (1983), Luvizotto Jr. (1995), Righetto (1994, 2002), Luvizotto Jr & Anjo (2004), Anjo et al. (2008), Soares (2007), Soares et al. (2008).

Shimada (1988) apresentou um método denominado Time-Marching Approach (TMA), que consiste da avaliação ao longo do tempo de um pseudo-transitório que converge para o regime permanente. A análise hidráulica é baseada no modelo da coluna elástica, com uma generalização das equações da quantidade de movimento e da conservação de massa, além de procedimentos para a aceleração da convergência numérica.

Righetto (1994) desenvolveu um algoritmo baseado no MOC que foi aplicado no estudo de casos de redes sujeitas a pressões negativas, a variações de demanda, ao processo de ajuste dos coeficientes de atrito de tubulações e da operação de sistemas contendo estações elevatórias, reservatórios de ponta, válvulas e booster. Righetto (2002) acooplou um modelo de otimização, baseado em algoritmos genéticos, ao MOC, visando alcançar a operação ótima de sistemas de distribuição de água, envolvendo parâmetros relacionados com o consumo de energia, confiabilidade operacional, satisfação quanto ao atendimento da demanda e controle das pressões nodais.

Luvizotto Jr. (1995), utilizando o MOC, propôs uma sistematização para o escoamento permanente segundo a qual as tubulações são tratadas como um trecho único, resultando em apenas duas seções de cálculo para cada tubulação, coincidindo com os nós de montante e de jusante do escoamento. Foram analisados dois tipos de malhas, regular e cruzada, com a adoção de uma celeridade fictícia, além da avaliação de duas formas de acelerar a convergência para o regime estacionário, produzindo um "transitório apenas numérico" (pseudo-transitório).

Koelle (1983) apresentou o conceito de celeridade fictícia. Luvizotto Jr & Anjo (2004) e Anjo et al. (2008) modificaram o Método Gradiente para o cálculo hidráulico em escoamentos permanente e transitório lento. Soares et al. (2008) apresentaram um modelo hidráulico para análise de sistemas de distribuição de água sujeitos a eventos transitórios, o qual combina o Método das Características com o simulador EPANET 2, utilizado para inicialização das variáveis de estado, batizado de MOC-EPANET. Soares (2007) apresenta um estudo dos transitórios hidráulicos visando calibração e detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água.

Dentro deste escopo, surgiu a pretensão de aprimorar o modelo desenvolvido por Righetto (1994). O original, denominado CALHIDREDMT, foi desenvolvido em FORTRAN, em uma versão que possibilitava simular algumas configurações básicas de redes de abastecimento de água, utilizando um

ou outro tipo de elemento na modelagem, mas não configurações genéricas, a não ser, obviamente, que o código fosse personalizado para se adaptar às novas situações desejadas.

No presente trabalho, o modelo foi reformulado para aceitar simulações de redes que apresentassem múltiplos elementos e em configurações genéricas, incluindo a opção de controle de estações elevatórias (liga/desliga) condicionado a níveis máximos e mínimos de tanques ou a horários pré-determinados de parada. Os recursos da linguagem de programação DELPHI proporcionaram maior interatividade gráfica ao modelo, permitindo a apresentação dos dados do problema e dos resultados das simulações de forma mais amigável do que o original.

Assim, os objetivos deste estudo podem ser sintetizados em:

- Reformular a interface gráfica e inserir novas funções ao modelo original de Righetto (1994) para simular o comportamento hidráulico de redes de abastecimento de água equipadas com estações elevatórias (EE), booster, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV ou tanque);
- Simular redes de abastecimento de água em diferentes configurações de equipamentos com o modelo que emprega o MOC. Em seguida, testar sua precisão através da comparação dos seus resultados com simulações realizadas no modelo EPANET 2;
- Avaliar aspectos de convergência, esforço computacional e comportamento hidráulico das condições de fronteira do modelo, para chegar a conclusões sobre a viabilidade do seu emprego em problemas genéricos de simulação de redes de abastecimento.

Ressalta-se que o EPANET 2 (Rossman, 2000) é um simulador hidráulico consagrado para simulação de redes de abastecimento em regime permanente e quase permanente. A metodologia que o simulador utiliza é o Método Gradiente (Todini & Pilati, 1988).

Destaca-se que os modelos baseados na resolução de sistemas de equações lineares podem resultar em valores incorretos para as variáveis da cota piezométrica e vazão, em vista do elevado grau de esparsidade e da falta de condicionamento da matriz do sistema de equações. Embora haja a disponibilidade cada vez maior de recursos computacionais, o

desconhecimento matemático de técnicas, como pré-condicionamento de matrizes e outras, pode comprometer a solução final obtida pelos métodos baseados na resolução de sistemas de equações lineares. Soares et al. (2008) apresentam um estudo em que avaliam as vantagens da utilização de uma combinação do Método Gradiente e do MOC para melhorar o processo de convergência de cálculo hidráulico em redes de abastecimento.

Já Righetto (1994) evidencia vantagens do MOC frente a outras técnicas, como a facilidade de caracterização do sistema e o equacionamento explícito das cotas piezométricas nodais e das vazões nos trechos da rede, quando da aplicação do MOC. Segundo o autor, esta é a grande qualidade desse equacionamento que, apesar de exigir um número relativamente grande de passos no tempo para se alcançar a condição de escoamento permanente, não necessita de um número elevado de operações algébricas, necessárias quando se trata da resolução de sistemas de equações.

METODOLOGIA

O fenômeno dos transitórios hidráulicos em condutos forçados é descrito pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento. Estas formam um sistema de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico, cuja solução analítica exata não pode ser obtida, podendo-se chegar ao valor aproximado através de integração numérica (Chaudhry, 1979; Almeida & Koelle, 1992; Wylie & Streeter, 1993). Para a grande maioria dos problemas envolvendo escoamentos variáveis em pressão, os termos convectivos são muito pequenos quando comparados com os outros termos que entram nas equações; esta aproximação é equivalente a aceitar que velocidade do escoamento no tubo é muito menor que a celeridade, o que resulta nas seguintes equações:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f|V|V}{2D} = 0 \quad (1)$$

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

Em que "x" é a distância, "t" o tempo, "H" a cota piezométrica (cota piezométrica), "V" a velocidade do fluido, "D" o diâmetro interno da tubulação, "a" corresponde a velocidade de propagação da

onda de pressão (celeridade), "g" a aceleração da gravidade e "f" o fator de atrito de Darcy-Weisbach.

Conforme Amado & Marques (2004), as Eq. (1) e (2) representam o fenômeno da propagação dos transitórios hidráulicos em condutos elásticos e permitem determinar as cotas piezométricas e velocidades em qualquer seção da tubulação e em qualquer instante ao longo desses transitórios. Uma vez que estas equações não podem ser resolvidas por via analítica, vários têm sido os estudos efetuados com o objetivo de obter uma solução considerando um modelo analítico simplificado, ou, por outra via, desenvolvendo modelos numéricos, dentre os quais um dos mais utilizados na comunidade técnico-científica é o MOC.

Considerando algumas modificações no sistema das Eq. (1) e (2) e transformando a velocidade em vazão por aplicação da equação da continuidade, o MOC proporciona a substituição do referido sistema de equações, por outro de derivadas totais, ao longo de duas linhas características (C⁺ e C⁻).

$$C^+ : \frac{dx}{dt} = a; \quad dH + \frac{a}{gA} dQ + \frac{fa}{2gDA^2} Q|Q|dt = 0 \quad (3)$$

$$C^- : \frac{dx}{dt} = -a; \quad -dH + \frac{a}{gA} dQ + \frac{fa}{2gDA^2} Q|Q|dt = 0 \quad (4)$$

Em que "Q" é a vazão do escoamento e "A" a área da seção transversal do tubo.

Integrando ao longo das linhas características C⁺ e C⁻, utilizando uma aproximação de segunda ordem para a integração do termo de atrito, e reescrevendo o sistema de Eq. (3) e (4), sob um esquema de diferenças finitas, vêm duas equações de compatibilidade ao longo das linhas características:

$$C^+ : (Q_i^{t+\Delta t} - Q_{i-1}^t) + \frac{g.A}{a} (H_i^{t+\Delta t} - H_{i-1}^t) + \frac{f.\Delta t}{2.D.A} Q_{i-1}^t |Q_{i-1}^t| = 0 \quad (5)$$

$$C^- : (Q_i^{t+\Delta t} - Q_{i+1}^t) - \frac{g.A}{a} (H_i^{t+\Delta t} - H_{i+1}^t) + \frac{f.\Delta t}{2.D.A} Q_{i+1}^t |Q_{i+1}^t| = 0 \quad (6)$$

Em que "Q_i^{t+Δt}" é a vazão em um determinado nó "i" num instante de tempo "t+Δt"; "H_i^{t+Δt}" a cota piezométrica em um determinado nó "i" num instante de tempo "t+Δt"; "Q_{i-1}^t" a vazão em um determinado nó "i-1" num instante de tempo "t"; "Q_{i+1}^t" a vazão em um determinado nó "i+1" num instante de tempo "t"; "H_{i-1}^t" a cota piezométrica em um determinado nó "i-1" num instante de tempo "t"; "H_{i+1}^t" a cota piezométrica em um determinado nó "i+1" num instante de tempo "t"; e "Δt" o passo de

tempo do cálculo numérico. A Figura 1 apresenta a malha característica para melhor entendimento e visualização do equacionamento.

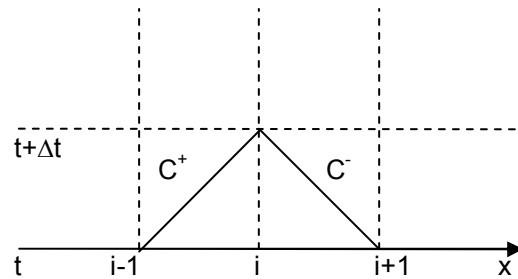


Figura 1 - Malha de cálculo para resolução do problema em uma tubulação comum (x, t)

Manipulando os termos é possível expressar Q_i^{t+Δt} em função de H_i^{t+Δt}:

$$Q_i^{t+\Delta t} = C_P - C_A \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (7)$$

$$Q_i^{t+\Delta t} = C_N + C_A \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (8)$$

$$C_P = Q_{i-1}^t + C_A \cdot H_{i-1}^t - F \cdot Q_{i-1}^t |Q_{i-1}^t| \quad (9)$$

$$C_N = Q_{i+1}^t - C_A \cdot H_{i+1}^t - F \cdot Q_{i+1}^t |Q_{i+1}^t| \quad (10)$$

$$C_A = \frac{g.A}{a} \quad (11)$$

$$F = \frac{f.\Delta t}{2.D.A} \quad (12)$$

A idéia básica para utilização do MOC como técnica de solução para redes em regime permanente consiste em partir de uma condição inicial simples, em que todos os nós apresentam uma mesma cota piezométrica (condição hidrostática) e os trechos apresentam vazões nulas. Em seguida são impostas perturbações ao sistema, impondo vazões de consumo aos nós, que representam as demandas do sistema, e o MOC efetua o cálculo numérico entre um estágio de regime permanente inicial até um estágio de regime permanente final. Entretanto, como a precisão do cálculo hidráulico durante a transição entre os estágios inicial e final não é de interesse particular, pode-se tratar a celeridade apenas como um parâmetro numérico, procurando um

valor que proporcione tornar mais rápida a convergência do processo.

Segundo Righetto (2002), o uso do MOC para simular o comportamento hidráulico em redes consiste em tomar elementos de dois tipos: "Nós" ou "Trechos". Nos elementos do primeiro tipo determinam-se valores de cota piezométrica, enquanto nos elementos do segundo determinam-se valores de vazões.

Assim, elementos tipo "Nós" podem representar:

- Ponto de demanda/consumo;
- Reservatório de Nível Constante;
- Reservatório de Nível Variável;
- Estação Elevatória;

Já elementos tipo "Trecho" podem representar:

- Tubulações;
- Booster;
- Válvulas;

A modelagem de cada um desses elementos, proposta em diversos trabalhos (Almeida & Koelle, 1992; Chaudhry, 1979; Wylie & Streeter, 1993; Righetto, 1994), é apresenta a seguir:

Ponto de demanda/consumo:

Para um nó "i" em que ocorre a partida e a chegada de vários trechos:

$$H_i^{t+\Delta t} = (q_i^{t+\Delta t} - B_i) / A_i \tag{13}$$

$$A_i = -[\sum_{r=1}^R C_A(m_r) + \sum_{s=1}^S C_A(j_s)] \tag{14}$$

$$B_i = [\sum_{r=1}^R C_P(m_r) - \sum_{s=1}^S C_N(j_s)] \tag{15}$$

Em que "q_i^{t+Δt}" é a demanda nodal "i" no passo de tempo "t+Δt"; (m_r) = conjunto dos trechos de montante; (j_s) = conjunto dos trechos de jusante.

Reservatório de Nível Fixo (RNF):

$$H_i^{t+\Delta t} = H_R \tag{16}$$

$$Q_i^{t+\Delta t} = C_N + C_A \cdot H_i^{t+\Delta t} \tag{17}$$

Em que "H_R" é o nível d'água do RNF (constante).

Reservatório de Nível Variável (RNV):

$$Q_i^{t+\Delta t} = \left(C_N + C_A \cdot H_i^t - \frac{0,5 \cdot \Delta t \cdot C_A \cdot Q_i^t}{A_{RNV}} \right) / \left(1 + \frac{0,5 \cdot C_A \cdot \Delta t}{A_{RNV}} \right) \tag{18}$$

$$H_i^{t+\Delta t} = H_i^t - 0,5 \cdot [Q_i^{t+\Delta t} + Q_i^t] \cdot \Delta t / A_{RNV} \tag{19}$$

Em que "A_{RNV}" é área da seção transversal do RNV.

Estação Elevatória (EE):

$$aux1 = C_{EE} \tag{20}$$

$$aux2 = B_{EE} - 1 / C_A \tag{21}$$

$$aux3 = A_{EE} + Z + C_N / C_A \tag{22}$$

$$Q_i^{t+\Delta t} = \frac{-(aux2) - \sqrt{(aux2)^2 - 4 \cdot (aux1) \cdot (aux3)}}{2 \cdot (aux1)} \tag{23}$$

$$H_i^{t+\Delta t} = Z + A_{EE} + B_{EE} \cdot (Q_i^{t+\Delta t}) + C_{EE} \cdot (Q_i^{t+\Delta t})^2 \tag{24}$$

Em que "A_{EE}", "B_{EE}", "C_{EE}" são parâmetros da curva característica da EE (função parabólica entre a cota piezométrica e a vazão na EE); "Z" a cota do eixo da EE em relação a um referencial adotado.

Tubulações:

$$QTB_k^{t+\Delta t} = \frac{C_N + C_P + C_A \cdot (H_{j-1}^{t+\Delta t} - H_{j+1}^{t+\Delta t})}{2} \tag{25}$$

Em que "QTB_k^{t+Δt}" é a vazão para a tubulação do trecho "k", no passo de tempo "t+Δt"; "H_{j-1}^{t+Δt}" a cota piezométrica do nó "j-1", nó de montante do trecho "k", no passo de tempo "t+Δt"; "H_{j+1}^{t+Δt}" a cota piezométrica do nó "j+1", nó de jusante do trecho "k", no passo de tempo "t+Δt".

Booster:

$$aux4 = C_A \cdot C_{BO} \tag{26}$$

$$aux5 = C_A \cdot B_{BO} - 2 \tag{27}$$

$$aux6 = C_A \cdot A_{BO} + C_N + C_P \quad (28)$$

$$QBO_k^{t+\Delta t} = \frac{-(aux5) - \sqrt{(aux5)^2 - 4 \cdot (aux4) \cdot (aux6)}}{2 \cdot (aux4)} \quad (29)$$

$$HBO_{BO}^{t+\Delta t} = A_{BO} + B_{BO} \cdot (QBO_k^{t+\Delta t}) + C_{BO} \cdot (QBO_k^{t+\Delta t})^2 \quad (30)$$

Em que " A_{BO} , B_{BO} , C_{BO} " são parâmetros da curva característica do booster (função parabólica entre a cota piezométrica e a vazão); " $QBO_k^{t+\Delta t}$ " a vazão para o booster do trecho "k", no passo de tempo " $t+\Delta t$ "; " $HBO_k^{t+\Delta t}$ " a altura manométrica para o booster do trecho "k", no passo de tempo " $t+\Delta t$ ".

Passo de tempo e celeridade:

Ressalta-se que o passo de tempo do cálculo hidráulico deve ser uniforme para toda a rede. Este é determinado no modelo a partir de um valor médio, conforme a expressão a seguir:

$$\Delta t = \left(\sum_{i=1}^N \frac{L_i}{a_i^*} \right) / N \quad (31)$$

Em que " L_i " é comprimento do tubo "i"; " N " o número total de tubulações; " a_i^* " a celeridade da onda do trecho "i", denominada aqui celeridade padrão, que é fornecida pelo usuário arbitrariamente, mas que necessitará ser recalculada para a simulação hidráulica. Esta celeridade "corrigida" será aqui denominada de celeridade de cálculo (a), e determinada conforme a expressão a seguir:

$$a_i = L_i / \Delta t \quad (32)$$

Para a equação de resistência de Darcy-Weisbach, o fator de resistência "f" é calculado de forma similar ao EPANET 2 (Rossman, 2000), ou seja, por diferentes equações, dependendo do número de Reynolds do escoamento (Re). Assim é aplicado:

- Fórmula de Hagen – Poiseuille para $Re < 2000$ (Bhave, 1991);
- Fórmula explícita aproximada de Swamee e Jain para resolver a equação de Colebrook - White, nos casos em que $Re > 4000$; depende da rugosidade absoluta " ϵ " (Bhave, 1991)
- Interpolação cúbica do ábaco de Moody para $2000 < Re < 4000$ (Dunlop, 1991).

Um fluxograma simplificado do algoritmo do modelo é apresentado na Figura 2. Ressalta-se que na rotina de cálculo da EE, existe uma sub-rotina para verificar se a bomba estará ligada ou desligada. Este controle da EE poderá ser realizado em função do nível da água de algum RNV ou pré-determinando o estado da EE em função da hora da simulação. Padrões de demanda podem também ser fornecidos para alterar os valores dos consumos nodais ao longo do tempo.

RESULTADOS

Com o intuito de verificar o desempenho do modelo baseado no MOC, foram realizadas simulações hidráulicas em redes de abastecimento de água com diferentes configurações e, em seguida, os resultados obtidos foram confrontados com simulações realizadas no EPANET.

Modelagem de RNF

Foi estabelecida uma rede simples, composta de 4 pontos de consumo/demanda, 5 tubulações e 1 RNF. A simulação foi estática. A Figura 3 apresenta a configuração da rede.

A mesma rede foi simulada no EPANET. Comparações entre os resultados obtidos das simulações no MOC e no EPANET foram realizadas. Verificou-se compatibilidade satisfatória entre os resultados obtidos, erro relativo máximo para as pressões inferiores a 0,1%, e para vazões não houve diferença (Tabela 1).

Destaca-se que na rede simulada o Δt foi de 0,5 s, as celeridades de cálculo (a) dos trechos foram de 1.000 m/s, valores iguais à celeridade padrão (a^*), pois todos os trechos têm iguais comprimentos.

Em relação ao cálculo hidráulico, a rede é iniciada com a condição de contorno hidrostática, ou seja, todos os pontos da rede apresentam a mesma cota piezométrica do reservatório de nível constante e as vazões da rede são nulas. Iniciada a simulação, são introduzidas as demandas nodais. Assim, é gerado um fluxo regido pelas equações do MOC, que faz a transição do estado inicial para um estado final, provocando oscilações dos valores de vazão e pressão para, finalmente, convergir ao valor associado ao regime permanente.

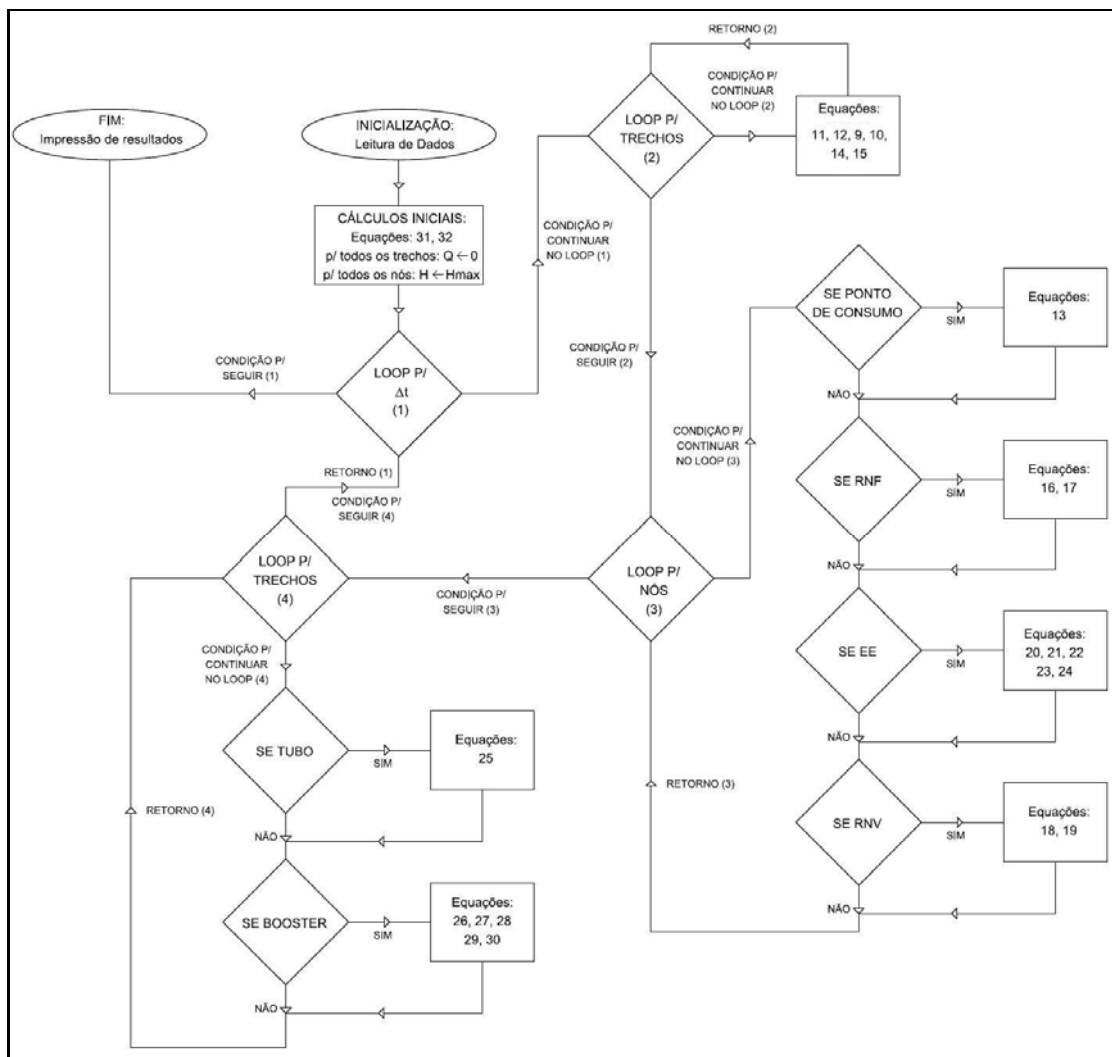


Figura 2 - Fluxograma do processo de cálculo

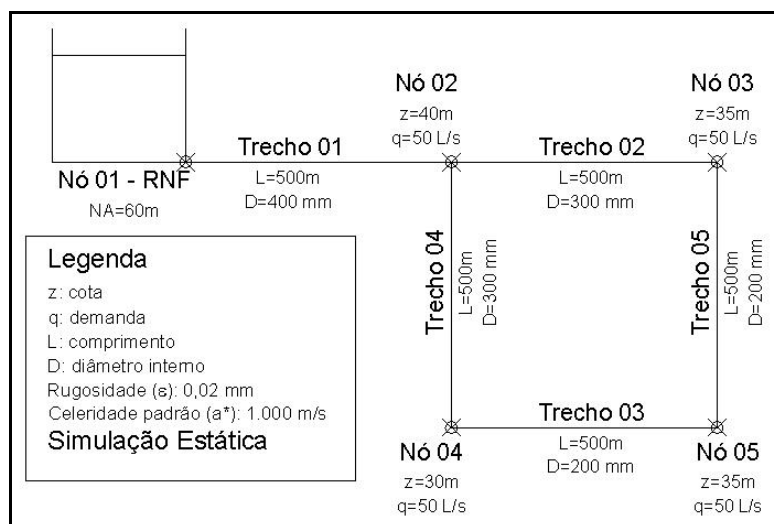


Figura 3 - Configuração para modelagem de RNF

Para verificar aspectos sobre a convergência do MOC, foi simulada a mesma rede considerando algumas alterações, a saber: (1) considerou-se celeridade padrão de 500 m/s, (2) considerou-se celeridade padrão de 1.500 m/s. Os resultados são apresentados na Figura 4.

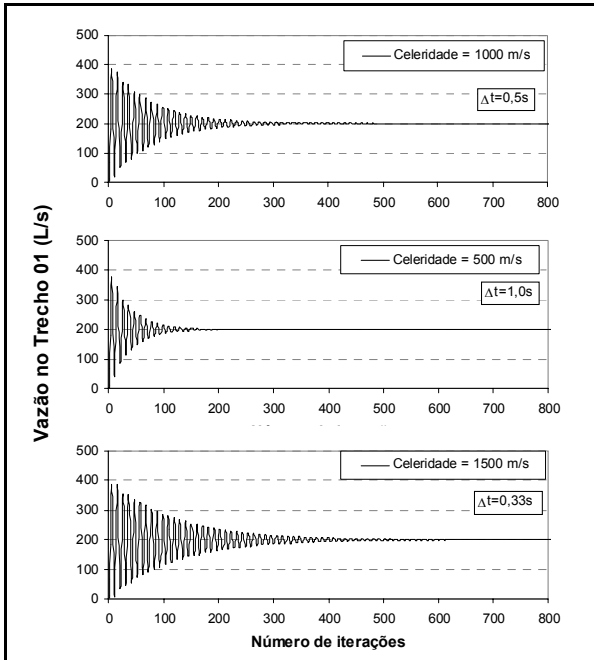


Figura 4 - Resultados das simulações considerando diferentes celeridades

Observou-se que nas simulações com diferentes celeridades, os valores finais de pressão e vazão foram todos iguais, ou seja, os mesmos apresentados na Tabela 1. Além disso, verificou-se que o MOC convergiu com menor esforço computacional (menor número de iterações), à medida que a celeridade padrão foi reduzida. Obviamente que chegará um momento em que a redução da celeridade padrão tornará o número de iterações tão pequeno que o modelo não poderá convergir, e esse valor dependerá de aspectos da rede modelada.

Proseguiu-se assim tomando valores de celeridade sucessivamente menores. Para uma celeridade padrão de 25 m/s, os resultados finais de pressão e vazão foram iguais, para 20 m/s, houve diferenças apenas na quarta casa decimal nos valores de pressão; e para 15 m/s, o erro relativo cresceu subitamente, sendo de 5% a 10% para as pressões e 7,5% a 15% para as vazões.

Em seguida, procurou-se verificar qual o impacto na convergência do modelo, em duas situa-

ções: (A) já no primeiro passo de cálculo hidráulico, o modelo considera o consumo nodal igual ao da demanda (situação padrão já apresentada), (B) o modelo considera que o consumo, nos passos de tempo iniciais, varia gradualmente de um valor nulo até atingir o das demandas nodais, por meio de interpolação (foi considerado que esta interpolação deveria se dar nas 100 primeiras iterações). Nos dois casos manteve-se a celeridade padrão em 1.000 m/s.

Tabela 1 - Comparação MOC e EPANET para RNF

NÓ	PRESSÃO (mca)		
	EPANET	MOC	ERRO
1	0,00	0,00	0,00%
2	17,83	17,837	0,04%
3	21,40	21,403	0,01%
4	26,40	26,403	0,01%
5	20,02	20,029	0,05%
TRECHOS	VAZÃO (L/s)		
	EPANET	MOC	ERRO
1	200,00	200,00	0,00%
2	75,00	75,00	0,00%
3	75,00	75,00	0,00%
4	25,00	25,00	0,00%
5	25,00	25,00	0,00%

Destaca-se que a situação (B) é uma idéia proposta por Righetto (1994), como uma forma de melhorar o desempenho do MOC. Os resultados são apresentados na Figura 5. Esta demonstra que, ao se considerar os valores do consumo dos nós variando gradualmente, é possível tornar mais rápida a convergência do modelo.

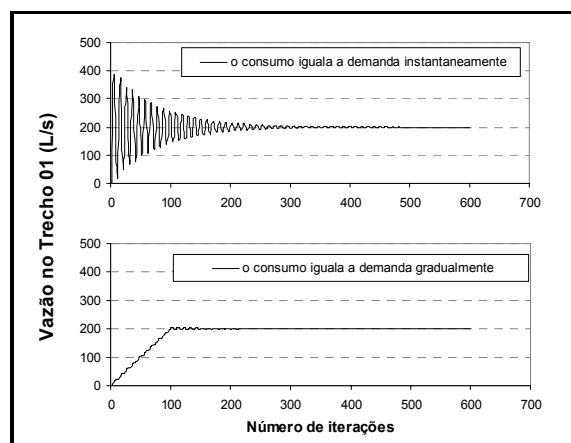


Figura 5 - Resultados das simulações considerando variação gradual do consumo nodais

Outro aspecto analisado foi a constatação de Luvizotto Jr (1995). Este autor mostrou que para trechos com comprimentos considerados pequenos em relação aos outros da rede, pode haver problemas de convergência. Assim, considerou-se uma alteração para o Trecho 1 da rede, cujo comprimento passou a ser de 50 m. Os resultados são mostrados na Figura 6. Neste caso, o passo de tempo foi de 0,41 s, a celeridade de cálculo (a) foi de 122 m/s para o Trecho 01 e 1220 m/s para os demais trechos da rede.

Foi verificado que ao final das simulações, os resultados do Epanet e do MOC foram similares. Mas em relação ao processo de convergência (Figura 6), observa-se que, no caso da rede de tubos com comprimento variável, o modelo chega a calcular valores negativos de vazão no transitório numérico, o gráfico tem menor simetria e percebe-se que a convergência é atingida somente a partir de um maior número de iterações.

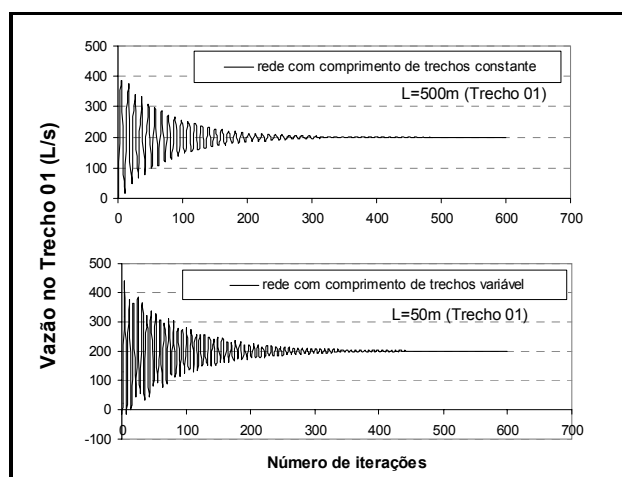


Figura 6 - Resultados de simulações considerando forte variação dos comprimentos dos trechos

Assim, constata-se que a heterogeneidade dos comprimentos das tubulações impacta o processo de convergência numérica do MOC. Deste modo, alerta-se para a necessidade de maiores investigações, a fim de verificar se esse fato, quando da consideração de redes reais de topologia complexa e composta por trechos de comprimentos diferenciados, pode afetar o processo de convergência ao ponto de comprometer a solução final.

Em relação ao tempo de processamento gasto para as simulações dos exemplos da modelagem

de RNF, foi constatado que tanto o MOC como o Epanet consumiram menos de 1 s. O computador usado era equipado com processador Intel Core 2 Duo, 2,40 GHz, 3,11 GB de RAM.

Modelagem de EE

Trata-se de uma rede composta de 8 pontos de consumo, 12 tubulações, 1 RNF e 1 EE. A simulação abrange uma duração de 24 horas (período estendido). Os valores de demanda nodais são variáveis ao longo da simulação, ou seja, a cada hora o consumo-base é multiplicado por um fator (o passo de tempo entre sucessivos valores é horário e os fatores multiplicadores estão apresentados na Figura 7). Além disso, foi imposta à EE uma regra operacional para que estivesse ligada nas primeiras 12 horas de simulação, desligada entre as 13 horas e 18 horas, e re-acionada nas horas restantes (entre 19 horas e 24 horas), com intuito de testar a capacidade do modelo na utilização de regras operacionais. Destaca-se que os efeitos reais de transitórios resultantes de paradas bruscas das EE não são aqui modelados (ondas de sobrepressão e subpressão), uma vez que o método de cálculo empregado considera valores fictícios para a celeridade da onda. Outros dados da rede e a sua configuração encontram-se na Figura 7.

A mesma rede foi simulada no EPANET. Verificou-se compatibilidade satisfatória para os resultados obtidos entre os dois modelos, sendo que os erros relativos máximos foram de +0,22% e -0,25% para as vazões e de +0,09% e -0,02% para as pressões, considerando todos os nós, trechos e horários da simulação.

Ilustra-se na Figura 8, para a primeira hora da simulação, os valores de vazão inicial (0,0 L/s) e final (17,82 L/s) no Trecho 01, e os valores de pressão inicial (35 mca) e final (34,92 mca) no Nó 02 (EE), assim como os estágios intermediários do processo de convergência, que se estabiliza em cerca de 150 iterações.

A Figura 9 apresenta dados similares, entretanto, para a segunda hora da simulação (vazão final de 17,73 L/s e pressão final de 34,97 mca). Nesse caso, o modelo não é iniciado a partir de uma condição hidrostática, mas da condição de regime permanente relativa à primeira hora de simulação. Estabelece-se então o processo de transição de estágios. A convergência é atingida após aproximadamente 50 iterações.

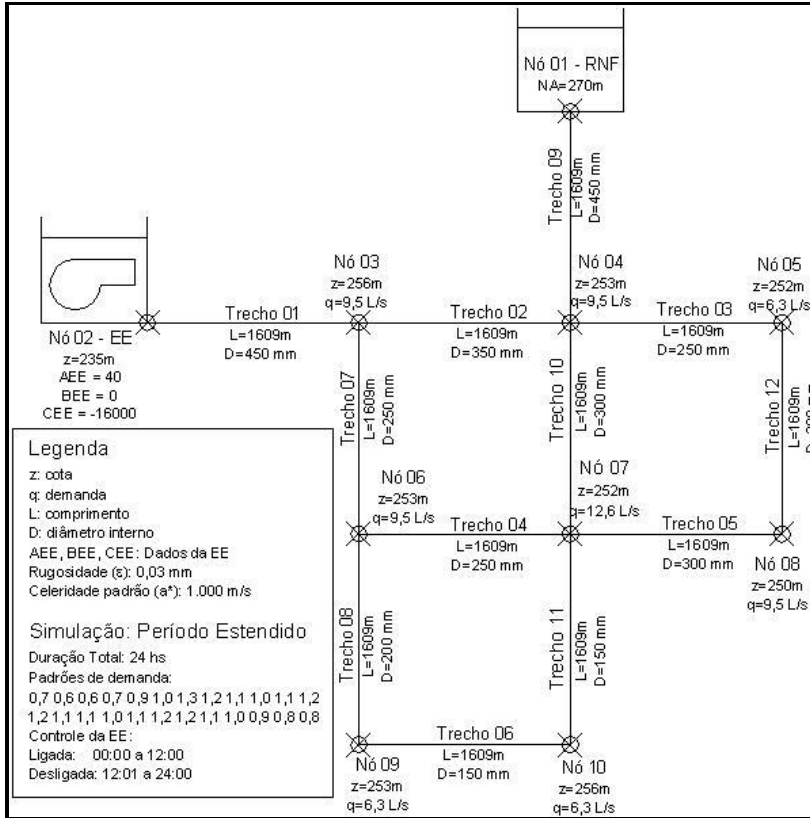


Figura 7 - Configuração para modelagem de EE

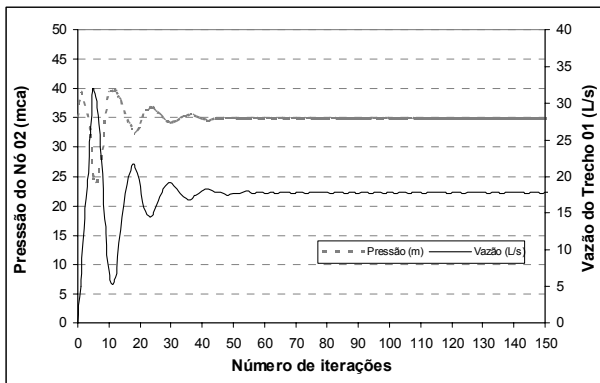


Figura 8 - Processo de convergência do MOC, primeira hora de simulação (EE)

O passo de tempo da simulação foi de 1,609 s e a celeridade de cálculo (a) de 1.000 m/s, igual à celeridade padrão (a^*), uma vez que os trechos têm comprimentos iguais. Os gráficos enfatizam as 150 primeiras iterações, embora cada hora da simulação envolva 2237 iterações (3600 s).

No que tange ao tempo de processamento gasto para as simulações do exemplo de modelagem

no período estendido de EE, foi constatado que o MOC consumiu 3 s, enquanto o Epanet consumiu menos de 1 s.

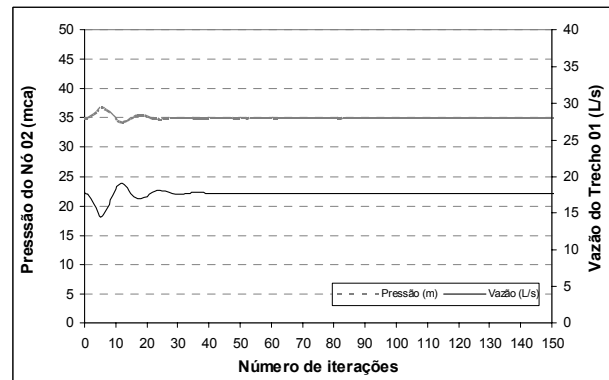


Figura 9 - Processo de convergência do MOC, segunda hora de simulação (EE)

Modelagem de Booster

Trata-se de uma rede composta de 05 pontos de consumo/demanda, 05 tubulações, 01 RNF, e

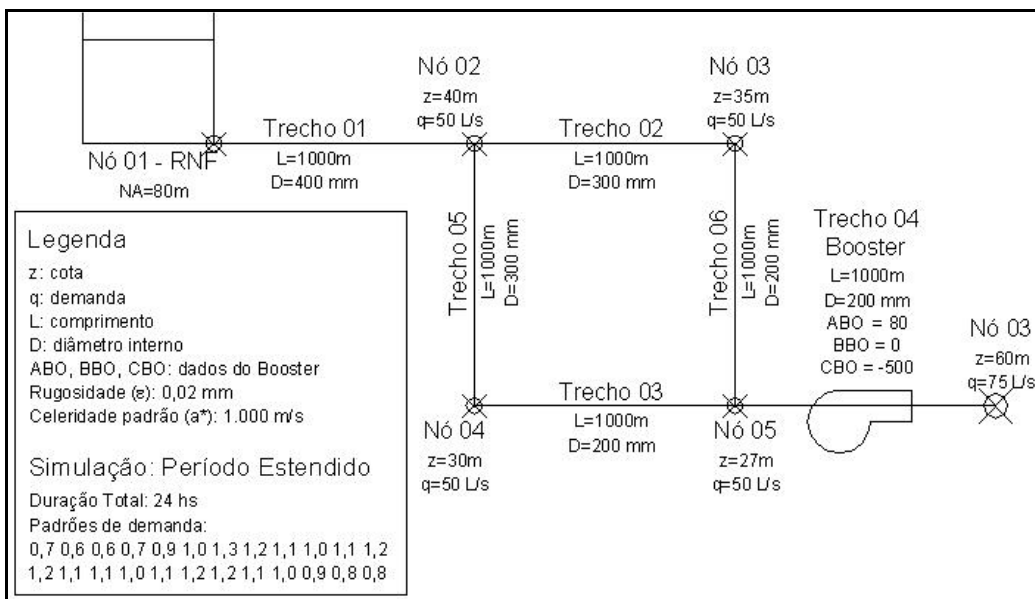


Figura 10 - Configuração da modelagem de Booster

01 booster, necessário para “vencer” o desnível geométrico do último trecho da rede, conforme ilustra a Figura 10. A simulação considerou um período de 24 horas.

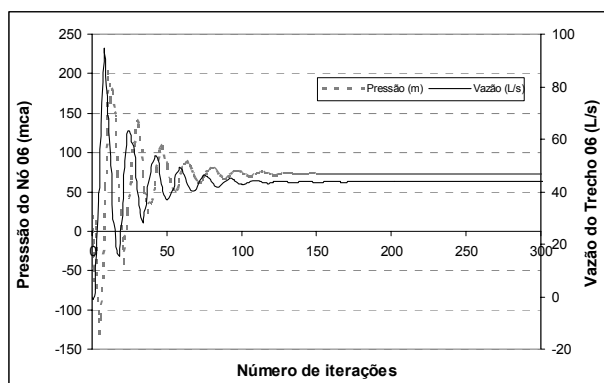


Figura 11 - Processo de convergência do MOC, primeira hora de simulação (booster)

A mesma rede foi simulada no EPANET. Observou-se compatibilidade satisfatória entre os resultados obtidos. O erro relativo máximo dos dados de pressão foi de 1,0%, enquanto que para os dados de vazões o erro foi nulo. O processo de convergência para o booster é apresentado na Figura 11 (Trecho 6). Verificou-se que o processo de cálculo convergiu após 200 iterações (vazão 43,75 L/s e

pressão 72,90 mca). O passo de tempo da simulação foi de 1,0 s, a celeridade de cálculo (a) de 1.000 m/s. O gráfico enfatiza as 300 primeiras iterações (300 s), embora a primeira hora de simulação envolva 3600 iterações (3600 s).

Em relação ao tempo de processamento gasto para as simulações do exemplo de modelagem no período estendido do booster, foi constatado que o MOC consumiu 3 s, enquanto o Epanet consumiu menos de 1 s.

Modelagem de RNV

Trata-se de uma rede composta de 08 pontos de consumo/demanda, 11 tubulações e 01 RNV, conforme ilustra a Figura 12. A simulação considerou um período de 24 horas.

A mesma rede foi simulada no EPANET. Uma comparação entre os resultados obtidos indicou que os valores de vazões apresentaram compatibilidade, erros relativos máximos de +0,31% e -0,41%, considerando todos os trechos e horários de simulação.

Todavia os valores de pressão apresentaram uma diferença mais acentuada, sendo os extremos do erro relativo de +6,61% e -3,85%, considerando todos os nós e horários de simulação. Se for considerado o módulo do erro relativo das pressões, o valor médio foi de 1,04%, enquanto que se o sinal for considerado, o erro médio foi de -0,11%.

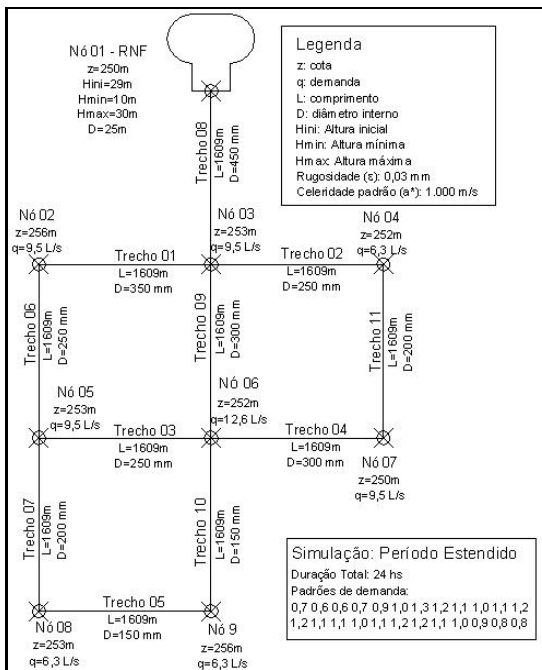


Figura 12 - Configuração para modelagem de RNV

Este desvio pode ser explicado por uma diferença de metodologia. Enquanto na aplicação do MOC foi considerado que durante cada intervalo de simulação (1 hora) o consumo dos nós permaneceria constante até que no intervalo seguinte haveria uma mudança instantânea para o novo valor de consumo nodal, com base nos padrões de demanda estabelecidos (Fig. 12), o modelo EPANET trata essa questão de forma diferente, ou seja, considera uma interpolação do valor do consumo nodal entre dois intervalos consecutivos de simulação. Assim, para os horários em que há valores de demanda crescente, a simulação do MOC considera um esvaziamento mais lento do RNV, e quando os valores de demanda são decrescentes, o MOC considera um esvaziamento mais rápido. Esse efeito tende a se compensar ao longo do tempo, portanto, o erro não é cumulativo. De fato, ao realizar-se um teste considerando os padrões de demanda constante e igual à unidade ao longo das 24 horas da simulação, os valores de pressão e vazão foram iguais nos dois modelos, MOC e EPANET.

A Figura 13 apresenta a série temporal de pressões do Nó 09, onde foram observados os maiores erros relativos entre o MOC e o EPANET. Ambos os modelos alternam-se na posição de valor máximo da pressão para diferentes horários da simulação. Além disso, a diferença de pressão observada na

hora 06 (máxima), decresce no passo de tempo seguinte, ou seja, não é cumulativa.

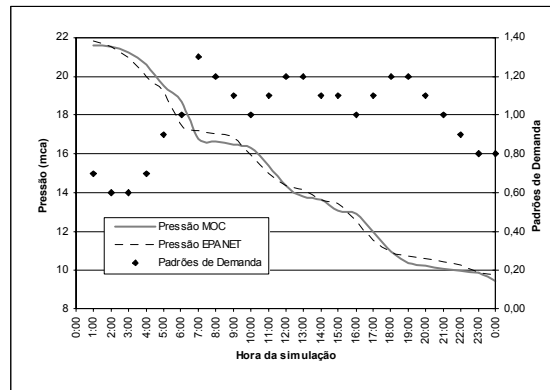


Figura 13 - Série temporal de pressões do Nó 09, simulação do RNV

Ressalta-se que o próprio processo de esvaziamento e enchimento do tanque não se enquadra na classificação de um estado de regime permanente. Assim, o algoritmo de resolução do EPANET adapta o passo de tempo e outras variáveis do cálculo hidráulico para criar sucessivas soluções em regime permanente que emulam o processo dinâmico existente no sistema, enquanto a solução hidráulica do MOC é baseada em um transitório fictício, devido ao parâmetro de celeridade ter função apenas numérica. Assim, em ambos as metodologias, há que se considerar que estão embutidas imprecisões nos resultados. Destaca-se que Fillion & Karney (2002) apresentaram um estudo considerando dois métodos, preditor-corretor e preditor de Adams, para a modelagem de RNV. Vale frisar também que uma maior precisão nos resultados da modelagem de RNV sempre pode ser obtida quando se utiliza de um modelo inercial.

Em relação ao processo de convergência, para a primeira hora de simulação, ver Figura 14. O passo de tempo da simulação foi de 1,609 s e a celeridade de cálculo (a) de 1.000 m/s. A primeira hora de simulação se encerra após 2237 iterações (3600s). A pressão do RNV é decrescente, pois está esvaziando. A vazão oscila mais fortemente ao longo das 500 primeiras iterações. Os valores do final da primeira hora são de 28,64 mca e 48,65 L/s, respectivamente, para pressão e vazão.

No que concerne ao tempo de processamento gasto para as simulações do exemplo de modelagem no período estendido de RNV, foi consta-

tado que o MOC consumiu 3 s, enquanto o Epanet consumiu menos de 1 s.

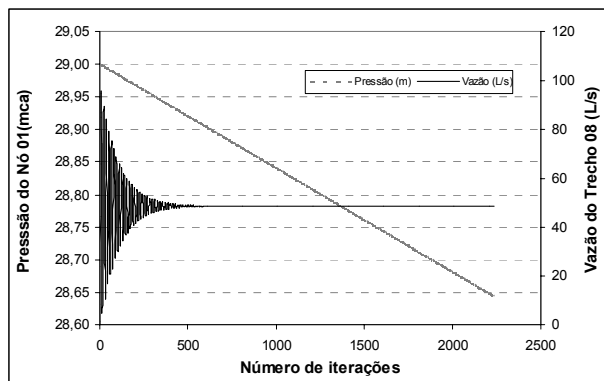


Figura 14 - Processo de convergência do MOC, primeira hora de simulação (RNV)

Interface do Modelo Computacional

No presente trabalho, o modelo elaborado por Righetto (1994) foi reformulado para aceitar simulações de redes que apresentem múltiplos elementos e em configurações genéricas, tendo sido o código reescrito na linguagem de programação DELPHI.

Os recursos da linguagem de programação DELPHI proporcionaram maior interatividade gráfica, permitindo a apresentação dos dados do problema e dos resultados das simulações de forma mais amigável do que o original na linguagem Fortran. A entrada e saída de dados são realizadas a partir de arquivos em formato ASCII. A entrada de dados é parecida ao arquivo de extensão <inp> do EPANET. Além disso, desde que sejam fornecidas as coordenadas dos nós, é possível visualizar o mapa da rede. Exemplo ilustrativo da máscara gráfica desenvolvida é apresentado a seguir na Figura 15.

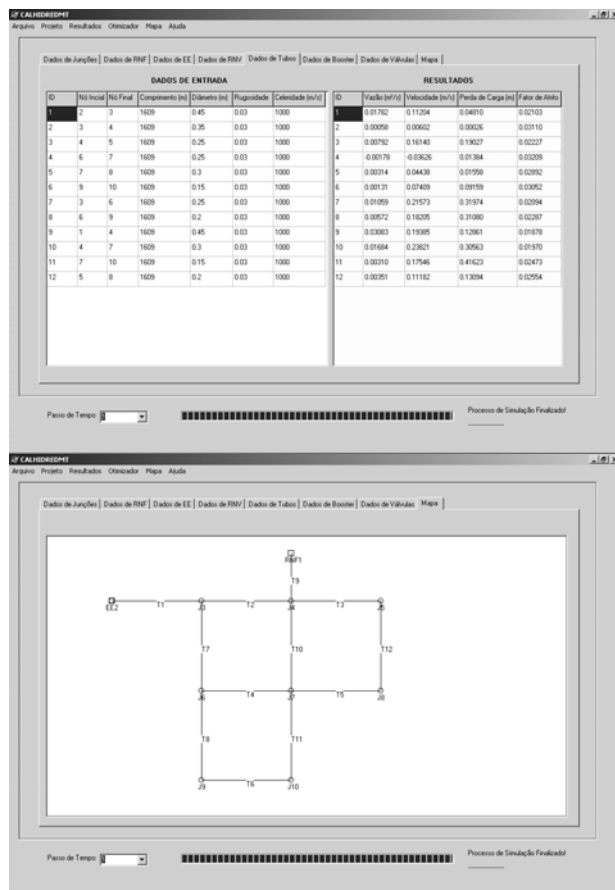


Figura 15 - Interface desenvolvida para apresentação de resultados no modelo REDMT

CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um programa que utiliza o MOC para simulação hidráulica de redes de abastecimento de água em regime permanente e período estendido, introduzindo novas capacidades ao modelo de Righetto (1994). Este foi testado, a partir de comparação dos seus resultados com simulações realizadas no EPANET 2, para verificar se havia compatibilidade satisfatória. Verificou-se que a modelagem de RNF, EE e booster apresentaram erros relativos inferiores a 1% nas determinações de vazão e pressão. Já a modelagem de RNV apresentou, para as vazões, erros relativos da mesma ordem de grandeza dos demais elementos da rede, entretanto, para os valores de pressão, obteve-se um erro relativo máximo de 6,61%. Destaca-se que a diferença na determinação das pressões não foi acumulativa ao longo da simulação. Além disso, ambos os modelos apresentam metodologias de cálculo que embutem limitações e diferenças para simulação de RNV, elemento que é modelado mais precisamente por modelos inerciais.

Foram avaliados aspectos de convergência do MOC. Verificou-se que, quando o consumo dos nós varia gradualmente de um valor nulo para a demanda nodal, obtém-se convergência mais rápida do que quando se utiliza o valor da demanda nodal já nos primeiros passos de tempo, o que já havia sido apontado por Righetto (1994). Foi observado ainda

que diferenças grandes no comprimento das tubulações, que geram celeridades de cálculo variadas, afetam o processo de convergência, o que já havia sido constatado por Luvizotto Jr. (1995), mas já o resultado final do exemplo estudado, quando se atingiu o regime permanente, não foi alterado. Finalmente, foi verificado que, reduzindo-se o valor da celeridade, pode-se atingir o resultado final com menor número de iterações, diminuindo o esforço computacional. O valor da celeridade é uma variável com função apenas numérica, que pode ser arbitrado pelo usuário. Valores de 1.000 m/s mostraram-se adequados para os exemplos analisados neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J.; CABRERA, E.; IZQUIERDO, J.; GARCÍA-SERRA, J. (1999). Flow Modeling in Pressurized Systems Revisited. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 11, p. 1154-1169, Nov.
- ALMEIDA, A.B.; KOELLE, E. (1992). *Fluid Transients in Pipe Networks*. Computational Mechanics Publications, Glasgow.
- AMADO, J.M.P. & MARQUES, J.A.S (2004). Modelação Hidráulica de Escoamentos Permanentes e Variáveis em Pressão, Método das Características "Adaptado". Anais do 7º Congresso da Água. Lisboa, Portugal.
- ANJO, L.F.R.S.; LUVIZOTTO Jr, E.; RIBEIRO, L.C.J. (2008). Utilizando um Modelo Dinâmico Inercial Rígido para Analisar a Dispersão de um Componente em Sistemas Hidráulicos. In: Ramos, H.M., Covas, D.I.C., Gonçalves, F.V., e Soares, A.K.: *Alterações Climáticas e Gestão da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem*, Portugal: Dossier, p.361-373.
- BHAVE, P.R. (1991). *Analysis of Flow in Water Distribution Networks*. Technomic Publishing. Lancaster, PA.
- CHAUDHRY, M.H. (1979). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- CHAUDHRY, M.H. (1987). *Applied Hydraulic Transients*. 2nd edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- DUNLOP, E.J. (1991). *WADI Users Manual*. Local Government Computer Services Board, Dublin, Ireland.
- FILION, Y. R.; KARNEY, B. W. (2002). Extended-Period Analysis with a Transient Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, n. 6, p. 616-624, June.
- FOX, J.A.; KEECH, A.E (1975). Pipe Network Analysis – a Novel Steady State Technique, *Journal Inst. Water Engrs & Sci.*, 29, pp. 183-194.
- ISAACS, L.T.; MILLS, K.G (1980). Linear Theory Methods for Pipe Networks. *Journal of the Hydraulics Division*, 106, 7, pp. 1191-1201.
- KOELLE, E. (1983). *Transientes Hidráulicos em Instalações de Conduitos Forçados*. São Paulo. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- LUVIZOTTO Jr, E. (1995). *Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador*. São Paulo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- LUVIZOTTO Jr, E.; ANJO, L.F.R.S. (2004). Utilizando a Estrutura do Método Gradiente na Elaboração de um Modelo para Analisar Transitórios Lentos. Anais do XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, SP, Brasil.
- RIGHETTO, A.M. (1994). *Cálculo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água a partir de Condições Transitórias: Adequação e Estudo de Casos*. São Carlos. 118p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RIGHETTO, A.M. (2002). *Operação Ótima de Sistema Urbano de Distribuição de Água*. Anais do Seminário - Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas. João Pessoa. CD. 16pgs.
- ROSSMAN, L. A. (2000) "EPANET 2 User's Manual". U.S. Environmental Protection Agency." EPA/600/R-00/057. Cincinnati, OH. USA.
- SHAMIR U.; HOWARD, C.D.D. (1968). Water Distribution Systems Analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, 94, 1, pp. 219-234.
- SHIMADA, M. (1988). Time-Marching Approach for Pipe Steady Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 114, n. 11, p. 1301-1320, Nov.
- SOARES, A.K.; REIS, L.F.R.; COVAS, D.I.C. (2008). Análise Hidráulica de Sistemas de Distribuição de Água Utilizando o MOC-EPANET. In: Ramos, H.M., Covas, D.I.C., Gonçalves, F.V., e Soares, A.K.: *Alterações Climáticas e Gestão da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem*, Lisboa, Portugal: Dossier, p.401-417.
- SOARES, A.K (2007). *Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório*. São Carlos. 332p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- TODINI, E.; PILATI, S. (1988). A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. In: Coulbeck, K.B., e Orr, C.H.: *Computer Applications in Water Supply: System Analysis and Simulation*, vol. 1, John Willey & Sons, p.1-20.
- VARDY, A.E.; CHAN, L. (1983). Rapidly Attenuated Water Hammer and Steel Hammer. In: 4 th Int. Conf. on

- Pressure Surges, paper A1, British Hydromechanics Research Association, Univ. of Bath, England.
- WOOD, D.J.; CHARLES, C.O.A (1972). Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory. Journal of the Hydraulics Division, 98, 7, pp. 1157-1170.
- WYLIE, E. B.; STREETER, V.L (1978, 1983). Fluid Transients. Mc Graw-Hill New York (U.S.A.), and FEB Press, Ann Arbor, Michigan (U.S.A.).
- WYLIE, E.B.; STREETER, V.L. (1993). Fluid Transients in Systems. Prentice-Hall, New Jersey.

Hydraulic Model Based on the Characteristics Method: Analysis of Convergence and Comparisons with EPANET

ABSTRACT

This paper presents an evaluation of a MOC based model to perform water network analysis in steady-state and quasi-steady-state flow. The model was developed in DELPHI programming language, introducing new features to the CALHIDREDMT model, first presented by Righetto (1994). Simulations were performed in networks equipped with reservoirs, tanks, pumping stations and boosters, considering both steady-state situations, as well as extended-periods (24 hours). The results were compared with simulations performed in the EPANET model. For pressures and flows, considering elements such as reservoirs, pumping stations and boosters, relative errors inferior to 1% were observed. When modeling tanks, flow values presented relative errors similar to the other elements, although pressure values presented a greater deviation, with a maximum relative error of 6.6%. This fact is associated with limitations in the methodology of both models to deal with tank problems, which are best handled with inertial models. Convergence issues of the MOC were analyzed, considering networks with strongly variable pipe lengths, different values of the celerity wave (a numerical parameter of the model) and the fact that gradual demand inputs are used until the complete nodal values area reached, during a pre-determined number of time-steps at the beginning of the simulation.

Key-words: hydraulic modeling, water supply, method of characteristics