

CALIBRAÇÃO DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM DADOS TRANSIENTES

John Kenedy de Araújo¹ & Fazal Hussain Chaudhry²

Resumo – Este trabalho estuda a conveniência da estimação das rugosidades absolutas em uma rede de distribuição de água existente a partir de dados observados de carga hidráulica durante condições transientes. O Método Transiente Inverso (MTI) com um Algoritmo Genético emprega o Método das Características (MOC) na solução das equações do movimento para escoamento transiente em redes de tubos. Uma rede-exemplo simples é usada para estudar vários problemas de calibração relacionados à estimação das rugosidades absolutas e fatores de atrito. A rede-exemplo é composta de onze tubos, sete nós, e um reservatório. Dez segundos de registro de cargas hidráulicas transientes resultantes da variação da demanda em um dos nós da rede é usado no processo de calibração. Quatro casos baseados no grau de conhecimento sobre a rede são estudados: três referentes à estimação das rugosidades absolutas e um em relação à calibração direta dos fatores de atrito. Foi encontrado que a qualidade da estimação das rugosidades absolutas é melhorada conforme o aumento do grau de conhecimento dos tipos de tubos. A calibração das rugosidades absolutas indica ser mais adequada em relação à estimação direta dos fatores de atrito sobretudo devido a variação dos fatores de atrito durante o evento transiente.

Abstract – This paper studies the adequacy of estimation of absolute roughness of pipes in an existing water distribution network on the basis of hydraulic heads observed during transient condition. The Inverse Transient Method of estimation using genetic algorithms employs the Method of Characteristics in the solution of equations of motion for water flow in the pipes. An example network is used to study various calibration problems related to the determination of absolute roughness and friction factor. The network is composed of 11 pipes, 7 nodes and 1 reservoir. A ten seconds record of transient hydraulic heads resulting from the operation a valve in one of the nodes is used to effect the calibration. Four cases based on the degree of knowledge about the network are studied: three are related to the estimation of absolute roughness and the other

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - CT – UFC, Campus do Pici, Bloco 713 – 1º Andar; Caixa Postal 6018, CEP: 60451-970, Fortaleza – CE. Fone:0xx85-2889624. E-mail: kenedy@ufc.br

² Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Caixa Postal 359, CEP: 13560-970, São Carlos – SP. Fone:0xx16-2739552. E-mail: fazal@sc.usp.br

calibrating flow-independent friction factors directly. It is found that the quality of estimation of the absolute roughness is improved as the knowledge about the kind of pipes is augmented. The calibration of absolute roughness shows itself to be more appropriate than the direct estimation of friction factor as the former considers the variation of friction factors during the transient event.

Palavras-chave - transientes em redes; método inverso; calibração.

INTRODUÇÃO

Modelos hidráulicos são amplamente usados, na atualidade, por técnicos e estudiosos de obras hidráulicas. A aplicação de modelos engloba atividades de projeto, operação e manutenção de sistemas de distribuição de água, particularmente no que diz respeito a estimativa de seus parâmetros, de um sistema existente, chamada de calibração. A calibração de uma rede hidráulica de tubos consiste na determinação de características físicas e operacionais de um sistema. Isto pode ser interpretado como a determinação de parâmetros de forma que se obtenha um melhor ajuste entre cargas hidráulicas medidas e calculadas.

Numerosas técnicas de calibração têm sido desenvolvidas em redes desde a década de 70. Esses modelos de calibração podem ser classificados em três categorias: (1) procedimentos de tentativa e erro com uso de equações analíticas (Walski, 1983; Bhave, 1988); (2) modelos explícitos ou simulação hidráulica (Ormsbee e Wood, 1986a e 1986b; Boulos e Wood, 1990); e (3) modelos implícitos ou otimização.

A calibração das rugosidades em redes hidráulicas em uso pode ser feita usando métodos inversos baseados tanto em dados observados em regime permanente como transientes. Os transientes em redes hidráulicas ocorrem quando há variação da pressão e vazão provocada por um certo distúrbio, tal como, variação da demanda em um dos nós. Os dados observados em condições transientes oferecem melhor oportunidade para realizar a calibração de redes por requererem menor número de locais de observação que no caso de escoamento permanente produzindo, assim, grande quantidade de informações no tempo. Este Método Transiente Inverso (MTI) determina os parâmetros pela minimização dos desvios entre as cargas hidráulicas medidas e calculadas. Liggett e Chen (1994) aplicaram o MTI em conjunto com o método de Levenberg-Marquardt para o ajuste entre as cargas medidas e calculadas. Outros métodos de ajuste de parâmetros incluem algoritmos estocásticos, tal como o Algoritmo Genético (AG). Goldberg, 1989 e Michalewicz, 1994 usaram o AG em seus trabalhos.

Recentemente Walter e Savic (1996) listaram as principais aplicações da otimização por AG em sistemas hidráulicos: projeto de redes de distribuição de água; regulação de pressão; calibração e sistemas de bombeamento. Reis et al. (1997) usaram o AG para regulação de pressão com redução de vazamentos através da posição ótima de válvulas de controle. Duas importantes vantagens do uso do AG são: a possibilidade de escolha entre um conjunto de soluções do espaço viável, aumentando significativamente as chances de encontrar o ótimo global; e a não necessidade do uso de derivadas.

Quanto à calibração relacionada a determinação do estado das tubulações em termos de rugosidades das mesmas, é comum, por simplicidade, recorrer-se aos ajustes de fatores de atrito em vez de proceder à estimação da rugosidade absoluta. Tal procedimento poderia justificar-se no caso da calibração a partir de observações em condições permanente. No MTI é fisicamente mais apropriado efetuar a calibração com base em rugosidades absolutas dado que a variação temporal da vazão, durante um evento transiente, provoca uma variação nos fatores de atrito.

A metodologia proposta neste trabalho usa o Método Transiente Inverso (MTI) no processo de calibração das rugosidades absolutas, ϵ , dos tubos de uma rede-exemplo e compara com a calibração em termos de fatores de atrito. Um modelo conjugado hidráulico-otimização, baseado no Método das Características (MOC) e no Algoritmo Genético (AG), é aplicado.

O MÉTODO TRANSIENTE INVERSO

O transitório hidráulico pode ser expresso matematicamente por duas equações: a equação da continuidade e a equação do movimento. Essas duas equações diferenciais permitem calcular os valores da vazão Q e da carga hidráulica H ao longo da tubulação x e do tempo t . As equações podem ser resolvidas usando o Método das Características (MOC). Diversos autores tais como Chaudhry (1987) e Wylie e Streeter (1978) fornecem as deduções destas equações e ilustram o uso delas em simulações com fluxo em redes hidráulicas. As equações abaixo são equações diferenciais resultantes do processo de transformação pelo MOC e são válidas somente ao longo das linhas características:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{fa}{2gDA^2} |Q|Q = 0, \quad \text{para } \frac{dx}{dt} = a \quad (1)$$

$$-\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{fa}{2gDA^2} |Q|Q = 0, \quad \text{para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (2)$$

onde H = carga hidráulica, Q = vazão, a = velocidade da onda ou celeridade, g = aceleração da gravidade, D = diâmetro do tubo, A = área da seção transversal do tubo, f = coeficiente de atrito de

Darcy-Weisbach, t = tempo, e x = distância ao longo do tubo. Usando condições de contorno e as condições iniciais, todos os pontos da malha característica podem ser calculados usando uma forma integrada das equações acima.

Chaudhry (1987) apresenta uma expressão geral para o cálculo da velocidade da onda:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (K/E)\psi]}} \quad (3)$$

onde: ψ é um parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto; E = módulo de elasticidade de Young da parede do conduto; K e ρ são o módulo de elasticidade e a massa específica do fluido, respectivamente. Existem várias expressões que calculam o parâmetro ψ para diferentes condições dos condutos. Neste trabalho, os condutos serão considerados como elásticos de paredes finas. A expressão é a seguinte:

$$\psi = \frac{D}{e'}(1 - 0,5\nu') \quad (4)$$

onde D = diâmetro do conduto, e' = espessura da parede e ν' = razão de Poisson.

No MTI desenvolvido por Liggett e Chen (1994), a informação transiente pode ser coletada em poucos locais da rede. Um determinado distúrbio no fluxo é transmitido na rede. As ondas resultantes podem se deslocar com velocidades superiores a 1000 m/s. Essas ondas refletem-se nas junções, válvulas e contornos do sistema. A coleta de informações pela propagação da onda transiente é a razão de que o MTI oferece maior potencial em comparação às técnicas de calibração em estado permanente.

Liggett e Chen (1994) desenvolveram a primeira aplicação do MTI usando técnicas com derivadas. Simpson et al. (2000) resolveram o mesmo problema usando um modelo combinado hidráulico-otimização (MOC e AG) na calibração dos fatores de atrito. Nash e Karney (1999) investigaram o MTI para tubos em série. Araújo (2003) investigou a calibração de rugosidades absolutas e outros parâmetros de uma rede hidráulica usando a técnica MTI-AG.

Incorporação da rugosidade no MTI

No cálculo das cargas nos nós e vazões nos tubos pelo Método das Características, o fator de atrito de Darcy-Weisbach é geralmente considerado como um parâmetro constante. Entretanto, no regime não-permanente, onde as vazões sofrem variações com o tempo, o fator de atrito tende a sofrer alterações. Sabe-se que o fator de atrito depende tanto da vazão (através do número de

Reynolds, Re) como da rugosidade relativa, (ε / D) . Matematicamente, o fator de atrito pode ser calculado pela equação de Swamee-Jain (1993):

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (5)$$

onde: ε = rugosidade absoluta; D = diâmetro do tubo; Re = número de Reynolds [$4Q/(\pi D \nu)$]; e ν = viscosidade cinemática do fluido.

A cada valor da vazão corresponde um número de Reynolds que conseqüentemente produz um fator de atrito. No modelo aqui considerado, as rugosidades absolutas são tratadas como parâmetros a serem calibrados.

ALGORITMO GENÉTICO

Generalidades

Algoritmos Genéticos, AGs, são métodos de otimização e busca inspirados nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos. Foram introduzidos por John Holland (Holland, 1975) e popularizados por um dos seus alunos, David Goldberg (Goldberg, 1989). Estes algoritmos seguem o princípio de seleção natural e sobrevivência do mais apto, conforme Charles Darwin: “Quanto melhor um indivíduo se adaptar no seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”.

O modelo de otimização por AG usado neste trabalho é descrito a seguir. O primeiro passo é gerar aleatoriamente uma população inicial que represente as possíveis soluções. Após a geração da população inicial, o AG aplica os operadores de cruzamento e mutação às melhores soluções (escolhidas em um processo de seleção) da população inicial para gerar novas soluções.

- Seleção

A seleção é um processo através do qual às soluções são escolhidas de acordo com os valores da função objetivo. A função objetivo representa uma medida de benefício, utilidade ou vantagem que se deseja maximizar. As soluções com um alto valor desses benefícios têm maior probabilidade de contribuir com um ou mais descendentes na próxima geração. Este operador, logicamente, é uma versão artificial da seleção natural de Darwin. Em populações naturais, a aptidão é determinada pela habilidade do ser vivo sobreviver aos predadores, às doenças e a outros obstáculos para a idade adulta e a subsequente reprodução. Nos esquemas artificiais, a função objetivo é o árbitro final que decide se a solução deve viver ou morrer.

Há diversas maneiras de proceder-se na escolha das melhores soluções. Para o presente trabalho será adotado um procedimento de seleção proporcional à aptidão baseado na idéia do *Elitismo*. O *Elitismo* foi proposto por DeJong (1975) e é uma estratégia que permite transferir as melhores soluções de uma geração para outra sem alterações. Isto ocorre devido ao corte do cruzamento ou à ocorrência de mutação.

O procedimento de seleção com elitismo adotado aqui é o seguinte:

1. Seja a população de NC soluções (a_1, a_2, \dots, a_{NC});
2. A aptidão, $F_{obj}(a_i)$, de cada solução é calculada conforme o valor da função objetivo;
3. Faz-se o ordenamento decrescente da aptidão (para problema de maximização);
4. Selecionam-se as melhores soluções deste ordenamento de maneira a formar uma população de $p_e \times NC$ soluções, onde p_e está sendo definido como taxa de elitismo;
5. Forma-se o restante da população com uma escolha aleatória de soluções (dentre as melhores) que irão compor a população de pais.

- Cruzamento

O operador cruzamento permite a criação de uma nova geração. Ele é considerado o principal mecanismo de busca dos AG's para explorar regiões desconhecidas do espaço de busca.

Os operadores aritméticos realizam algum tipo de combinação linear entre as soluções pais. Dentre os vários tipos de cruzamento existentes na literatura de AG's, este trabalho adota o cruzamento aritmético. O cruzamento aritmético foi proposto por Michalewicz (1994) e é uma combinação linear entre dois vetores.

Sejam p_1 e p_2 as soluções pais representadas por:

$$p_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1l}) \quad (6)$$

$$p_2 = (p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2l}) \quad (7)$$

onde: $p_{ij} \in \mathfrak{R}$.

As soluções filhos c_1 e c_2 são produzidas da seguinte forma:

$$c_1 = \beta p_1 + (1 - \beta)p_2 \quad (8)$$

$$c_2 = (1 - \beta)p_1 + \beta p_2 \quad (9)$$

onde $c_i \in \mathfrak{R}$ e β é um número aleatoriamente gerado no intervalo $[0,1]$.

- **Mutação**

Após a operação de cruzamento, o operador de mutação é aplicado, com uma probabilidade p_m , em cada solução filha gerada. A mutação consiste em fazer alterações, geralmente pequenas, nos valores de um ou mais membros numa dada solução. A mutação melhora a diversidade das soluções na população, por outro lado, destrói informação contida na solução, logo, deve ser utilizada uma probabilidade de mutação pequena, mas suficiente para assegurar a diversidade.

No processo de mutação será considerado a mutação uniforme, a simples substituição de um membro da solução por um número aleatório. A mutação é aplicada para cada membro individual com uma probabilidade p_m . Dado uma solução p com o j -ésimo membro selecionado para mutação, é produzido uma solução c da seguinte forma:

$$c_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{se } i = j \\ p_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (10)$$

onde a_i e b_i representam os limites do intervalo permitido para o membro c_i ; e $U(a_i, b_i)$ representa uma distribuição uniforme no intervalo $[a_i, b_i]$.

O AG trabalha com uma estrutura de dados consistindo de uma população de soluções. Na literatura, há tradicionalmente duas maneiras de representar esta população: a representação binária e representação real. Na representação binária a solução é composta por uma cadeia de *bits*. A representação real é identificada geralmente por um vetor. Neste trabalho optou-se pela representação real.

O AG não é um método fechado. Pelo contrário, suas características permitem a adaptação e uso de diversos operadores. A versatilidade é uma de suas marcas e cada usuário produz os seus próprios operadores como resultado de extensos experimentos.

Definição da Função Objetivo

Há na literatura inúmeras formas de proceder-se ao ajuste entre os parâmetros medidos e calculados. Há funções objetivos que levam em consideração várias medidas tais como: cargas hidráulicas, vazões nos tubos, demandas e custos. Estas medidas são aglomeradas na função objetivo através da definição de pesos que servem como indicadores dos respectivos graus de influência da medida no processo de otimização.

Para o processo de calibração proposto neste estudo, utilizando-se o Método Transiente Inverso em conjunto com um Algoritmo Genético, serão necessárias medidas de cargas hidráulicas em um ou mais nós da rede hidráulica durante um certo intervalo de tempo. A idéia de trabalhar

somente com cargas hidráulicas tem o objetivo de justificar a eficiência dos processos inversos ao mesmo tempo em que simplifica a construção da função objetivo.

A identificação dos parâmetros é baseada na minimização da soma dos desvios absolutos e pode ser expressa pelo erro quadrático F :

$$F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} (H_{i,j}^m - H_{i,j}^c)^2 \quad (11)$$

onde: TS = duração do transitório, NL = número de locais de medida na rede, $H_{i,j}^m$ = carga hidráulica medida, $H_{i,j}^c$ = carga hidráulica calculada, $i = 1, 2, \dots, NL$ e $j = 1, 2, \dots, TS$. Dessa maneira, pode-se definir a função objetivo como o negativo do erro quadrático:

$$F_{obj} = -F \quad (12)$$

Portanto, durante a calibração dos diversos parâmetros da rede hidráulica, a otimização compreende maximizar a função objetivo.

Condições Iniciais

O funcionamento dos modelos transientes baseia-se no conhecimento prévio das condições iniciais ou de estado permanente, em torno das vazões nos tubos e cargas nos nós. Num problema de calibração via observações transientes, não se conhecem as condições reais de regime permanente em todos os nós e tubos, com exceção das informações de carga hidráulica no(s) nó(s) de medida. Em virtude disso, torna-se necessário estabelecer uma estimativa inicial para as vazões nos tubos e cargas nos nós em estado permanente. Pode ser estabelecido qualquer critério de inicialização como fatores de atrito médios, rugosidades médias, fatores de atrito ou rugosidades arbitrados aleatoriamente, ou velocidade máxima nas tubulações. Neste trabalho propõe-se prover a primeira tentativa da condição permanente por meio do seguinte algoritmo (para o caso em que observam-se apenas as cargas em alguns nós):

1. Escolhe-se aleatoriamente um conjunto de parâmetros objetos de calibração (ex.: fatores de atrito ou rugosidades absolutas) para os tubos da rede.
2. Utiliza-se um modelo hidráulico permanente para calcular as vazões e as cargas.
3. De posse da informação da cargas hidráulicas no(s) nó(s) de medida, comparam-se com a carga calculada. Se a diferença entre as cargas for menor ou igual a 0,1 m, assumem-se os atuais valores das cargas e vazões, senão retornar ao passo 1 e repetir o processo até a convergência.

O modelo hidráulico permanente referido foi estabelecido por meio do modelo transiente até a obtenção do estado permanente.

As condições iniciais obtidas a partir deste algoritmo serão dados de entrada para o modelo hidráulico transiente. Como não se tem conhecimento da condição inicial real, o procedimento de calibração contempla uma auto-correção nestas condições na medida em que são feitas as várias avaliações da função objetivo. A Figura 2 apresenta o esquema do procedimento de calibração estabelecido acima.

APLICAÇÃO DO MODELO

A rede hidráulica proposta por Liggett e Chen (1994) é selecionada para a aplicação do procedimento apresentado neste trabalho. A Figura 1 mostra a rede exemplo adotada. A rede contém 11 tubos, 1 reservatório de carga constante (nó 1), 1 nó de demanda constante (nó 7), 4 nós comuns e um nó de demanda variável (nó 4).

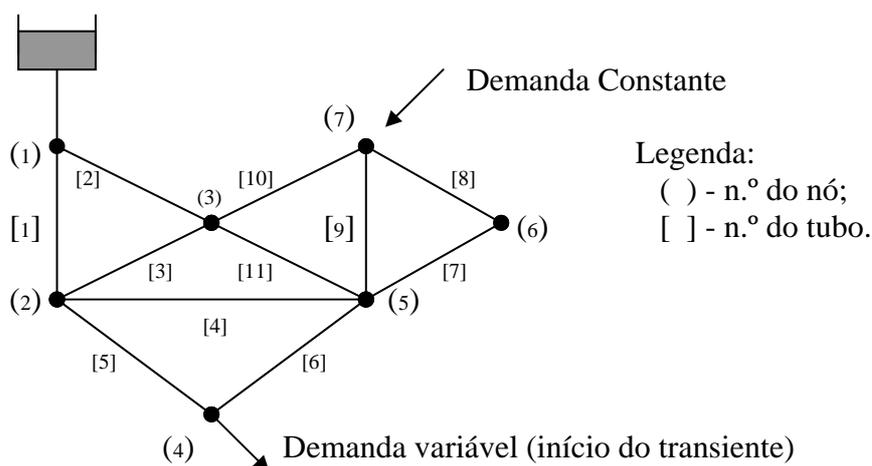


Figura 1 – Rede hidráulica usada no exemplo.

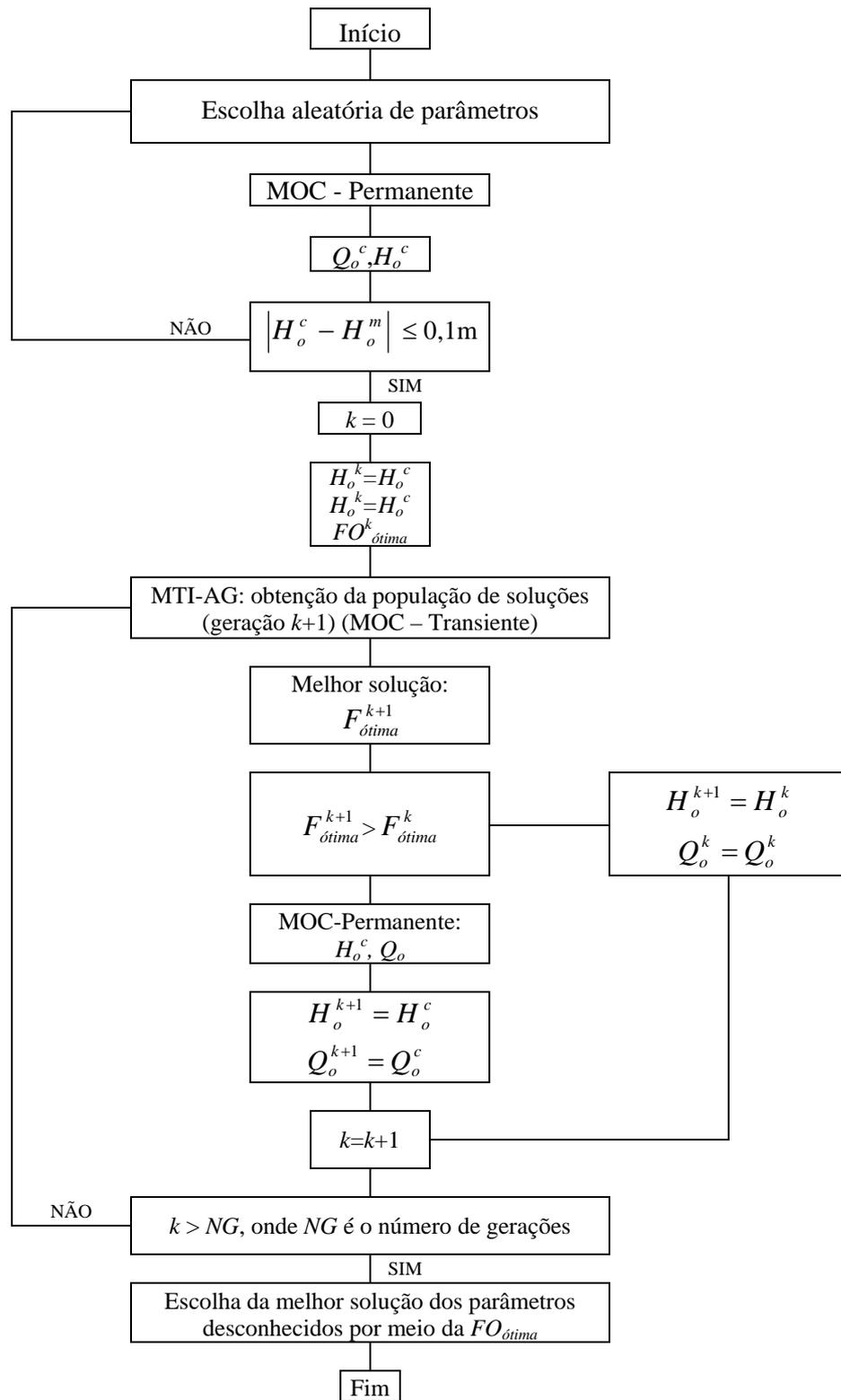


Figura 2 – Fluxograma do procedimento de calibração com auto-correção.

A Tabela 1 apresenta as características físicas da rede hidráulica.

Tabela 1 – Características físicas dos tubos.

| Tubo | Nó montante | Nó jusante | <i>L</i> (m) | <i>D</i> (m) | <i>a</i> (m/s) | <i>a_j</i> (m/s) |
|------|-------------|------------|--------------|--------------|----------------|----------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) |
| 1 | 1 | 2 | 305 | 0,250 | 1251.7 | 1525.0 |
| 2 | 1 | 3 | 215 | 0,250 | 1251.7 | 1075.0 |
| 3 | 3 | 2 | 215 | 0,200 | 1289.0 | 1075.0 |
| 4 | 2 | 5 | 305 | 0,200 | 1289.0 | 1525.0 |
| 5 | 2 | 4 | 215 | 0,250 | 1251.7 | 1075.0 |
| 6 | 5 | 4 | 215 | 0,250 | 1251.7 | 1075.0 |
| 7 | 6 | 5 | 215 | 0,200 | 1289.0 | 1075.0 |
| 8 | 7 | 6 | 215 | 0,150 | 1329.9 | 1075.0 |
| 9 | 7 | 5 | 305 | 0,250 | 1251.7 | 1525.0 |
| 10 | 3 | 7 | 215 | 0,150 | 1329.9 | 1075.0 |
| 11 | 3 | 5 | 215 | 0,250 | 1251.7 | 1075.0 |

A coluna (6) da Tabela 1 apresenta os valores iniciais da celeridade nos tubos. Esses valores correspondem às seguintes características: espessura da parede do tubo, $e' = 10\text{mm}$; razão de Poisson, $\nu' = 0,25$; módulo de elasticidade do material do tubo, $E = 120\text{ GPa}$; módulo de elasticidade da água, $K = 2,19\text{ GPa}$; massa específica da água, $\rho = 999\text{ kg/m}^3$. Para um sistema de dois ou mais condutos, é necessário que o mesmo intervalo de tempo seja usado para todos os condutos tal que as condições de contorno nas junções possam ser usadas. Este intervalo de tempo deverá ser selecionado de forma a obedecer a condição de estabilidade de Courant ($\Delta x > a\Delta t$). Entretanto, para evitar interpolação, Δt deve ser escolhido de maneira a satisfazer a seguinte equação (Chaudhry, 1987).

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i n_i} \quad (1 \text{ até } N) \quad (13)$$

onde n_i é um número inteiro e igual ao número de trechos no qual o i -ésimo conduto é dividido; L_i é o comprimento do i -ésimo conduto; a_i é a celeridade do i -ésimo conduto e N é o número de tubos no sistema. Como a celeridade não é precisamente conhecida, ajustes menores nos seus valores são aceitáveis. A coluna (7) apresenta os valores da celeridade ajustados.

O evento transiente do sistema causado pela variação da demanda no nó 4 foi simulado durante 10s. O intervalo de tempo, Δt , para a simulação computacional foi de 0,2s. Com este

intervalo de tempo selecionado, os tubos foram discretizados em 11 trechos (1 trecho para cada tubo) na rede. A Figura 3 apresenta a variação da demanda no nó 4.

A calibração via MTI será realizada utilizando informações de carga hidráulica observadas em um único nó da rede hidráulica. Como o $\Delta t = 0,2$ s e o comprimento de registro é de 10s, o número total de valores de carga foi de 50.

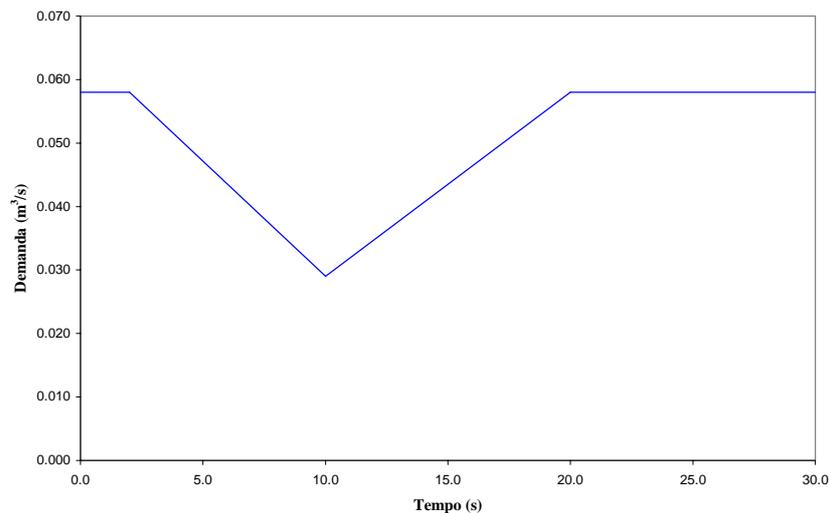


Figura 3 – Variação da demanda no nó 4.

Estudo de casos

Este trabalho estuda o procedimento de calibração via MTI considerando 4 possibilidades de grau de conhecimento das características das tubulações da rede.

- Caso 1: O material dos tubos é desconhecido bem como se possuem a mesma rugosidade. Para a codificação das rugosidades absolutas é utilizado um esquema discreto. As rugosidades dos tubos usam números inteiros no vetor. A escolha das rugosidades está sujeita a um intervalo de valores discretos correspondente a alguns tipos de tubos segundo Porto (1998). A Tabela 2 apresenta esta codificação.
- Caso 2: O material dos tubos pertence a categoria de ferro fundido. Os tubos não são do mesmo material e não possuem a mesma rugosidade absoluta. A escolha das rugosidades está sujeita a um intervalo de valores discretos conforme a Tabela 3.

Tabela 2 – Valores médios da rugosidade absoluta para o Caso 1.

| Material | ε (mm) * | Código |
|--|----------------------|--------|
| Cobre; latão; aço revestido de epoxi; PVC; plásticos em geral; tubos extrudados | 0,00575 | 1 |
| Cimento amianto novo | 0,025 | 2 |
| Concreto protendido Freyssinet | 0,04 | 3 |
| Aço comercial novo | 0,045 | 4 |
| Aço laminado revestido de asfalto; ferro forjado; ferro fundido centrifugado | 0,05 | 5 |
| Aço laminado novo | 0,07 | 6 |
| Aço soldado novo | 0,075 | 7 |
| Aço soldado revestido de cimento centrifugado; ferro fundido em uso com cimento centrifugado | 0.1 | 8 |
| Aço galvanizado, sem costura | 0.105 | 9 |
| Ferro fundido com revestimento asfáltico; concreto centrifugado novo | 0.16 | 10 |
| Aço soldado limpo, usado; aço galvanizado, com costura | 0.175 | 11 |
| Concreto armado liso, vários anos de uso | 0.25 | 12 |
| Ferro fundido com leve oxidação | 0.3 | 13 |
| Ferro fundido novo | 0.375 | 14 |
| Aço soldado moderadamente oxidado | 0.4 | 15 |
| Ferro fundido oxidado | 1.25 | 16 |
| Aço rebitado novo; concreto com acabamento normal | 2 | 17 |
| Ferro fundido velho | 4 | 18 |
| Aço rebitado em uso | 6 | 19 |

Fonte: Porto (1998)

Tabela 3 – Valores da rugosidade absoluta para o Caso 2

| Material | Nº Inteiro | ε (mm) |
|---|------------|--------------------|
| Ferro forjado; ferro fundido centrifugado | 1 | 0,05 |
| Ferro fundido em uso com cimento centrifugado | 2 | 0,10 |
| Ferro fundido com revestimento asfáltico | 3 | 0,16 |
| Ferro fundido com leve oxidação | 4 | 0,30 |
| Ferro fundido novo | 5 | 0,375 |
| Ferro fundido oxidado | 6 | 1,25 |
| Ferro fundido velho | 7 | 4,00 |

- Caso 3: O material dos tubos é conhecido e possuem a mesma rugosidade. A codificação é feita pela Tabela 2.
- Caso 4: Calibração dos fatores de atrito. Para a codificação dos fatores de atrito é utilizado o esquema discreto estabelecido por Simpson et al. (2000). A escolha dos fatores de atrito está sujeita a um intervalo de valores discretos entre 0,010 e 0,050 com um incremento de 0,001; totalizando 41 valores possíveis. Essa codificação pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4 – Escolha do fator de atrito conforme o esquema discreto

| Nº Inteiro | f |
|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| 1 | 0,010 | 9 | 0,018 | 17 | 0,026 | 25 | 0,034 | 33 | 0,042 | 41 | 0,050 |
| 2 | 0,011 | 10 | 0,019 | 18 | 0,027 | 26 | 0,035 | 34 | 0,043 | | |
| 3 | 0,012 | 11 | 0,020 | 19 | 0,028 | 27 | 0,036 | 35 | 0,044 | | |
| 4 | 0,013 | 12 | 0,021 | 20 | 0,029 | 28 | 0,037 | 36 | 0,045 | | |
| 5 | 0,014 | 13 | 0,022 | 21 | 0,030 | 29 | 0,038 | 37 | 0,046 | | |
| 6 | 0,015 | 14 | 0,023 | 22 | 0,031 | 30 | 0,039 | 38 | 0,047 | | |
| 7 | 0,016 | 15 | 0,024 | 23 | 0,032 | 31 | 0,040 | 39 | 0,048 | | |
| 8 | 0,017 | 16 | 0,025 | 24 | 0,033 | 32 | 0,041 | 40 | 0,049 | | |

RESULTADOS

Os parâmetros do AG aplicado para identificação dos parâmetros foram: tamanho da população, $NC = 100$; taxa de elitismo, $p_e = 50\%$; probabilidade de cruzamento, $p_c = 100\%$; probabilidade de mutação, $p_m = 0,5\%$; taxa de sucessão, $p_s = 50\%$; número de gerações, $NG = 100$. As estimativas dos parâmetros consistiram de uma média de 10 processamentos do AG usando diferentes conjuntos de números gerados a partir de sementes diversas.

A calibração foi conduzida levando em consideração um local de observação (nó 4). A análise do ajuste dos parâmetros foi feita pelo Erro Médio Relativo (EMR) e que pode ser escrito assim:

$$EMR(\%) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{|w_i^{correto} - w_i^{estimado}|}{w_i^{correto}} \times 100 \right] \quad (14)$$

onde: w = representa os parâmetros f e ε a serem calibrados; i = número do tubo e n = número total de tubos na rede.

A colocação do problema inverso pode ser enfocado da seguinte forma:

- A carga no nó 1 é constante, conhecida e igual a 30,00 m. A demanda no nó 7 é constante e conhecida (= 12 l/s);
- O nó 4 é o local de medida da carga hidráulica transiente;
- A carga hidráulica no nó 4 é conhecida. As cargas nos demais nós e as vazões nos diversos tubos em regime permanente são desconhecidas;
- As rugosidades absolutas são desconhecidas.

Aplicando o procedimento para estabelecer as condições de estado permanente, discutido na metodologia, as tabelas 5 e 6 mostram as vazões e as cargas iniciais obtidas com o auxílio do MOC-Permanente.

Tabela 5 – Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação da rugosidade (casos 1, 2 e 3) e fatores de atrito (caso 4).

| Tubo | Q (m ³ /s) | | | |
|------|-----------------------|----------|----------|----------|
| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 |
| 1 | 0.027269 | 0.022624 | 0.022787 | 0.028397 |
| 2 | 0.018731 | 0.023376 | 0.023213 | 0.017603 |
| 3 | 0.005910 | 0.008082 | 0.007595 | 0.005512 |
| 4 | 0.001585 | 0.001562 | 0.001283 | 0.002843 |
| 5 | 0.031594 | 0.029144 | 0.029100 | 0.036753 |
| 6 | 0.026406 | 0.028856 | 0.028900 | 0.021247 |
| 7 | 0.002759 | 0.002947 | 0.002887 | 0.002918 |
| 8 | 0.002759 | 0.002947 | 0.002887 | 0.002918 |
| 9 | 0.009340 | 0.011102 | 0.010561 | 0.007585 |
| 10 | 0.000099 | 0.002048 | 0.001448 | 0.001497 |
| 11 | 0.012721 | 0.013246 | 0.014170 | 0.013587 |

Tabela 6 – Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação da rugosidade (casos 1, 2 e 3) e fatores de atrito (caso 4)..

| Nó | H (m) | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|
| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 |
| 1 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 |
| 2 | 29.66 | 29.70 | 29.70 | 29.67 |
| 3 | 29.71 | 29.80 | 29.78 | 29.73 |
| 4 | 29.35 | 29.35 | 29.35 | 29.35 |
| 5 | 29.65 | 29.69 | 29.69 | 29.69 |
| 6 | 29.66 | 29.71 | 29.70 | 29.71 |
| 7 | 29.71 | 29.76 | 29.76 | 29.75 |

Os resultados sobre a identificação das rugosidades das tubulações que compõem a rede-exemplo serão apresentados de formas variadas para constatar as diferenças entre os métodos de calibração, enfocando a rugosidade absoluta e fator de atrito.

A Tabela 7 apresenta as estimativas da rugosidade absoluta obtidas a partir do registro transiente de 10s de carga hidráulica observada no nó 4 para os três primeiros casos de estudo descritos na metodologia. Também são apresentadas as rugosidades absolutas reais e o Erro Médio Relativo (EMR) de estimação, definido na equação (14), para os três casos. Verifica-se que o grau de erro reduz na medida em que se incluem conhecimentos prévios a respeito da composição da rede (material e homogeneidade das rugosidades). Quando se conhece o material e seu emprego único, que é o caso 3, a estimação da rugosidade é perfeita e alcançada em apenas uma geração pelo algoritmo genético. No caso 2 em que a rugosidade fica na faixa de ferro fundido, a determinação das rugosidades absolutas ainda é obtida com razoável eficiência, apresentando um EMR de 54,1%. Neste caso, a rugosidade absoluta variou entre 0,28 mm 0,64 mm sendo o valor real igual a 0,30

mm. O caso 1 que corresponde ao total desconhecimento a respeito das tubulações da rede, a estimativa das rugosidades é menos precisa com EMR de 62,6 % que, a primeira vista, parece ser um erro demasiado grande.

Para se ter uma maior sensibilidade a respeito do verdadeiro significado do erro de estimação da rugosidade absoluta, apresentam-se na Tabela 8 os fatores de atrito reais e equivalentes às rugosidades apresentadas na Tabela 7 para os três casos, calculados com base nas vazões e cargas em estado permanente (tabelas 5 e 6). Observa-se que o EMR no fator de atrito para o caso 1 cai para 10,0 %, dado que o EMR na rugosidade absoluta era de 62.6 %. Vê-se ainda que os valores reais e equivalentes dos fatores de atrito na tubulação 4 são 0,0350 e 0,0360 e na tubulação 10 são respectivamente de 0,0328 e 0,0343. Estas diferenças correspondem a 2,8 % e 4,6 %. Os valores dos fatores de atrito equivalentes à estimativa da rugosidade absoluta do caso 2 apresenta EMR de 7,3 %.

Tabela 7 – Estimativas das rugosidades obtidas do registro de carga hidráulica de 10 s no nó 4.

| Tubo (1) | ε (mm) (2) | $\varepsilon_{estimado}$ | | |
|-------------|---------------------------|--------------------------|---------------|---------------|
| | | Caso 1 (3) | Caso 2 (4) | Caso 3 (5) |
| 1 | 0,30 | 0,09 | 0,51 | 0,30 |
| 2 | 0,30 | 0,13 | 0,42 | 0,30 |
| 3 | 0,30 | 0,21 | 0,38 | 0,30 |
| 4 | 0,30 | 0,27 | 0,50 | 0,30 |
| 5 | 0,30 | 0,82 | 0,58 | 0,30 |
| 6 | 0,30 | 1,01 | 0,57 | 0,30 |
| 7 | 0,30 | 0,34 | 0,31 | 0,30 |
| 8 | 0,30 | 0,17 | 0,43 | 0,30 |
| 9 | 0,30 | 0,30 | 0,64 | 0,30 |
| 10 | 0,30 | 0,33 | 0,28 | 0,30 |
| 11 | 0,30 | 0,15 | 0,41 | 0,30 |
| EMR (%) | - | 62.6 | 54.1 | 0.0 |

Por via de comparação dos dois métodos de estimação dos fatores quais sejam, fatores de atrito equivalente às estimativas de rugosidades (real e caso 1) e os fatores de atrito estimados diretamente (caso 4), a Tabela 9 apresenta tais estimativas. Observa-se que o EMR nos fatores de atrito de 10,0 % referente ao caso 1 é menor que o erro de 19,0 % no caso de calibração em termos de fatores de atrito. Apesar destes 2 casos corresponderem ao mesmo nível de desconhecimento a respeito do material dos tubos, a estimação via rugosidade absoluta é superior pelo fato da mesma admitir a influência da variabilidade temporal das vazões nos tubos durante o evento transiente. Ressalta-se, ainda, a importância da calibração com base na rugosidade absoluta no caso 2 que, conforme apresentado acima, estimou os fatores de atrito com EMR de 7,3 %.

Tabela 8 – Fatores de atrito equivalentes às estimativas de rugosidades da Tabela 7 calculados para condição permanente.

| Tubo (1) | <i>f_{equivalente}</i> | | | |
|--------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Real (2) | Caso 1 (3) | Caso 2 (4) | Caso 3 (5) |
| 1 | 0.0227 | 0.0194 | 0.0252 | 0.0227 |
| 2 | 0.0227 | 0.0201 | 0.0242 | 0.0227 |
| 3 | 0.0256 | 0.0245 | 0.0266 | 0.0256 |
| 4 | 0.0350 | 0.0360 | 0.0367 | 0.0350 |
| 5 | 0.0223 | 0.0278 | 0.0256 | 0.0223 |
| 6 | 0.0223 | 0.0294 | 0.0256 | 0.0223 |
| 7 | 0.0296 | 0.0299 | 0.0295 | 0.0296 |
| 8 | 0.0292 | 0.0273 | 0.0307 | 0.0292 |
| 9 | 0.0245 | 0.0246 | 0.0279 | 0.0245 |
| 10 | 0.0328 | 0.0343 | 0.0328 | 0.0328 |
| 11 | 0.0237 | 0.0217 | 0.0249 | 0.0237 |
| EMR (%) | - | 10.0 | 7.3 | 0.0 |

Tabela 9 – Fatores de atrito equivalentes e estimados

| Tubo (1) | <i>f_{equivalente}</i> | | <i>f_{estimado}</i> |
|--------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| | Real (2) | Caso 1 (3) | Caso 4 (4) |
| 1 | 0.0227 | 0.0194 | 0.0234 |
| 2 | 0.0227 | 0.0201 | 0.0341 |
| 3 | 0.0256 | 0.0245 | 0.0268 |
| 4 | 0.0350 | 0.0360 | 0.0295 |
| 5 | 0.0223 | 0.0278 | 0.0281 |
| 6 | 0.0223 | 0.0294 | 0.0266 |
| 7 | 0.0296 | 0.0299 | 0.0314 |
| 8 | 0.0292 | 0.0273 | 0.0323 |
| 9 | 0.0245 | 0.0246 | 0.0370 |
| 10 | 0.0328 | 0.0343 | 0.0331 |
| 11 | 0.0237 | 0.0217 | 0.0288 |
| EMR (%) | - | 10.0 | 19.0 |

Com o intuito de realçar a importância da consideração da variação das vazões sobre os fatores de atrito durante o evento transiente, calcularam-se fatores de atrito equivalentes à rugosidade absoluta (casos 1, 2 e 3) em função do tempo, os quais são apresentados graficamente nas figuras 4 e 5 para os tubos 4 e 5, respectivamente. Estão apresentados nestas figuras também os valores dos fatores de atrito determinados diretamente (caso 4). Observa-se uma variabilidade muito grande nos valores dos fatores de atrito no tubo 4 para os casos 1, 2 e 3 devido ao fato desse tubo transportar baixas vazões que por sua vez passam por ciclos altos e baixos. Por outro lado a oscilação do fator de atrito durante o evento transiente no tubo 5 é bem suave. A variabilidade do fator de atrito é a mesma nos casos 1, 2 e 3. Note-se que a vazão neste tubo em regime permanente corresponde a um dos valores máximos.

CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a estudar a conveniência da calibração das rugosidades absolutas dos tubos de uma rede de distribuição de água usando dados transientes via Método Transiente Inverso. Estudou-se também a estimação dos fatores de atrito.

Quanto maior o grau de conhecimento a respeito do material dos tubos, mais eficiente é a calibração das rugosidades absolutas dos tubos.

Um erro elevado na estimação das rugosidades absolutas não corresponde necessariamente a um alto erro nos valores dos fatores de atrito equivalentes às estimativas destas rugosidades.

As estimativas das rugosidades provocam uma maior variabilidade nos fatores de atrito de tubos que conduzem baixas vazões em regime permanente. Isso permite adotar medidas de suporte à calibração em redes hidráulicas que contenham tubos desta natureza.

Finalmente, o processo de calibração das rugosidades absolutas via Método Transiente Inverso (MTI) utilizando-se algoritmos genéticos aponta como um procedimento mais adequado em relação à estimativa direta dos fatores de atrito. Este fato pode ser atribuído à consideração da variabilidade temporal da vazão durante o evento transiente.

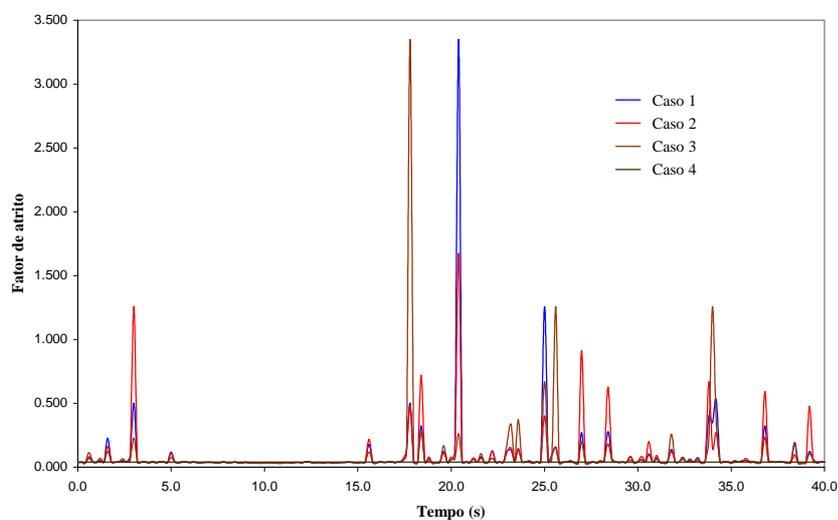


Figura 4 – Variação temporal do fator de atrito para os 4 casos de estudo referente ao tubo 4.

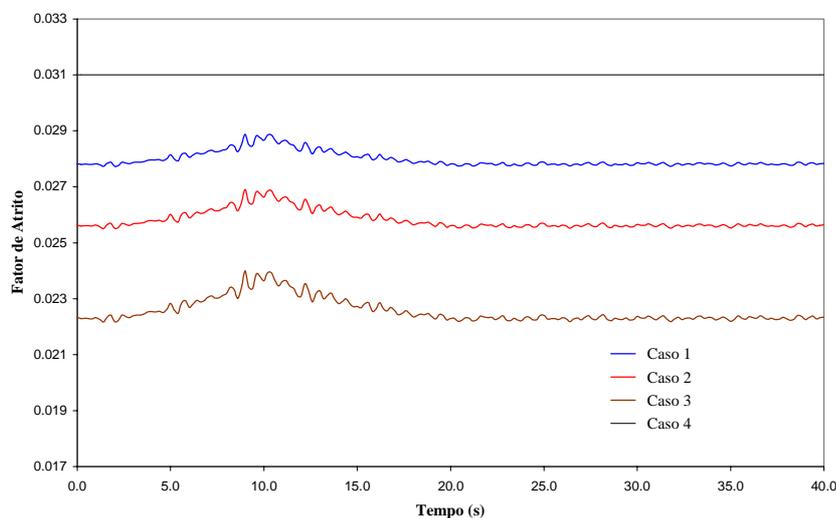


Figura 5 – Variação temporal do fator de atrito para os 4 casos de estudo referente ao tubo 5.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, J. K.** – Calibração de Redes de Distribuição de Água pelo Método Inverso Aplicado a Escoamento Transiente. **Tese de Doutorado**. EESC-São Carlos. Universidade de São Paulo, 2003.
- BHAVE, P. R.** - Calibrating Water Distribution Network Models. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 114, n. 1, p. 120-136, 1988.
- BOULOS, P. F., WOOD, D. J.** - Explicit Calculation of Pipe-Network Parameters. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, 1990.
- CHAUDHRY, M. H.** - **Applied Hydraulic Transients**. New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1987. 521p.
- DEJONG, K.** – The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems. University of Michigan, 1975 (**PhD thesis**).
- GOLDBERG, D. E.** – Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, 412 pp., Addison-Wesley, Reading, Mass., 1989.
- HOLLAND, J. H.** – Adaptation in Natural and Artificial Systems. **MIT Press**, 1975.
- LIGGETT, J. A., CHEN, L-C.** – Inverse Transient Analysis in Pipe Networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 120, n. 8, p. 934-955, 1994.
- MICHALEWICZ, Z.** – Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, **Second Edition**, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1994.
- NASH, G. A., KARNEY, B. W.** – Efficient Inverse Transient Analysis in Series Pipe Systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 125, n. 7, p. 761-764, 1999.
- ORMSBEE, L. E., WOOD, D. J.** - Explicit Pipe Network Calibration. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 112, n. 2, p. 166-182, 1986a.

- ORMSBEE, L. E., WOOD, D. J.** - Implicit Pipe Network Calibration. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 112, n. 12, p. 1195-1207, 1986b.
- PORTO, R. M.** – Hidráulica Básica. **EESC-São Carlos-SP**. 1998. 540p.
- REIS, L. F. R., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F. H.** – Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithms. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 123, n. 6, p. 317-326, 1997.
- SIMPSON, A., VÍTKOVSKY, J., LAMBERT, M.** – Transients for Calibration of Pipe Roughnesses Using Genetic Algorithms. **8th International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems**. BHR Groups. Publications n. 39, p. 587-597, 2000.
- SWAMEE, P. K.** – Design of a submarine pipeline. **J. Transp Eng.**, ASCE, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.
- WALSKI, T. M.** - Technique for Calibrating Network Models. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.
- WALTERS, G. A., SAVIC, D. A.** – Recent Applications of Genetic Algorithms to Water System Design, **Hydraulic Engineering Software**, W. R. Blain (Ed.), Comp. Mech. Publ., Southampton, v. VI, 1996.
- WYLIE, E. B., STREETER, V. L.** - **Fluid Transients**. New York, McGraw-Hill, 1978, 384p.