

UM ESTUDO DA CONVENIÊNCIA DA CALIBRAÇÃO DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS E FATORES DE ATRITO DE TUBOS DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM DADOS TRANSIENTES

John Kenedy de Araújo¹; Fazal Hussain Chaudhry¹

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. Vinte segundos de registro de cargas hidráulicas transientes resultantes da manobra de uma válvula 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 twenty 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 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-Chaves: transientes em redes; método inverso.

¹Departamento 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: kenedy@sc.usp.br; fazal@sc.usp.br

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, abertura e fechamento de uma válvula. 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. A celeridade pode ser calculada de:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho [1 + (K/E)\psi]}} \quad \text{para } \psi = \frac{D}{e'}(1 - 0,5\nu) \quad (3)$$

onde: e' = espessura das paredes do tubo; ν = coeficiente de Poisson; K = módulo de elasticidade da água; E = módulo de elasticidade do material do tubo; e ρ = massa específica da água.

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.

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 (1976):

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{(Re)^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

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.

Relação de variação entre f e ε/D

Conforme se verifica na equação (4), a relação entre f e ε/D não é linear. Uma variação no valor de f não corresponde à mesma variação em ε/D . Chamando $e = \varepsilon/D$ e derivando a equação (4) com respeito a e , vem:

$$\frac{\partial f}{\partial e} = -0,54054 \left\{ \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{e}{3,7} + \frac{5,74}{(\text{Re})^{0,9}} \right) \right]^2} \right\} \left\{ \frac{\left(\frac{e}{3,7} + \frac{5,74}{(\text{Re})^{0,9}} \right)^{-1}}{\ln \left(\frac{e}{3,7} + \frac{5,74}{(\text{Re})^{0,9}} \right)} \right\} \quad (5)$$

Da equação (4), vem a relação:

$$\frac{e}{3,7} + \frac{5,74}{(\text{Re})^{0,9}} = \exp \left(- \sqrt{\frac{1,325}{f}} \right) \quad (6)$$

Substituindo as equações (6) e (4) na equação (5), produz:

$$\frac{\partial f}{\partial e} = \frac{-0,54054 f}{\left(\sqrt{\frac{1,325}{f}} \right) \left[\exp \left(- \sqrt{\frac{1,325}{f}} \right) \right]} \quad (7)$$

Portanto, uma taxa de variação de f em relação à taxa de variação de e pode ser escrita como:

$$\left(\frac{\partial f / f}{\partial e / e} \right) = \frac{-0,54054 e}{\left(\sqrt{\frac{1,325}{f}} \right) \left[\exp \left(- \sqrt{\frac{1,325}{f}} \right) \right]} \quad (8)$$

onde: $e = \varepsilon/D$.

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. A função objetivo P do problema de otimização depende de n parâmetros reais, cada um definido em um intervalo:

$$P = P(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ onde } x_i \in [x_{iMIN}, x_{iMAX}] \text{ e } i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

onde x_{iMIN} e x_{iMAX} representam os valores mínimo e máximo de x_i , respectivamente.

O AG trabalha com uma estrutura de dados consistindo de uma população de indivíduos ou “cromossomos”. Na literatura, há tradicionalmente duas maneiras de representar esta população: a representação binária e representação real. Na representação binária o cromossomo é composto por uma cadeia de *bits*. A representação real é identificada geralmente por um vetor. Neste trabalho optou-se pela representação real.

Dada uma população, a nova geração é produzida pelos seguintes operadores: seleção com elitismo; cruzamento; mutação; e sucessão.

O procedimento de seleção com elitismo é o seguinte:

- Seja a população de NC indivíduos (a_1, a_2, \dots, a_{NC});
- A aptidão, $f(a_i)$, de cada indivíduo, é calculada conforme o valor da função objetivo;
- Faz-se o ordenamento decrescente da aptidão (para problema de maximização);
- Selecionam-se os melhores indivíduos deste ordenamento (Ex.: os 50% primeiros) de maneira a formar uma população de $0,5 \times NC$ indivíduos. Estabelece-se, assim, uma probabilidade de elitismo: $p_e = 0,5$;
- Forma-se o restante da população com uma escolha aleatória de indivíduos (dentre os melhores) que comporão a população de pais.

Para a nova população selecionada os operadores genéticos de cruzamento, mutação e sucessão são aplicados.

O procedimento de cruzamento considerado aqui, conhecido como cruzamento aritmético (Michalewicz, 1994) é aplicado a cada par de indivíduos (pais) com uma probabilidade p_c . Seja o cromossomo p_1 o primeiro pai e p_2 o segundo pai. Os cromossomos filhos c_1 e c_2 são produzidos da seguinte forma:

$$c_1 = \beta p_1 + (1 - \beta) p_2 \quad (10)$$

$$c_2 = (1 - \beta) p_1 + \beta p_2 \quad (11)$$

onde β é um número aleatoriamente gerado no intervalo $[0,1]$.

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

$$c_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{se } i = j \\ p_i, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (12)$$

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

E, finalmente, como o último operador vem a sucessão. A população de indivíduos para a próxima geração é formada de 50% dos cromossomos dos pais e 50% dos cromossomos dos filhos, dentre aqueles de melhor aptidão. Estabelece-se, então, uma probabilidade de sucessão: $p_s = 0,5$.

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.

A Função Objetivo

O AG necessita de uma função objetivo para o cálculo da aptidão de cada indivíduo. Cada indivíduo ou cromossomo consiste de um vetor, formado de números reais, que definem as

características de uma solução particular. Neste trabalho, serão considerados tanto a calibração dos fatores de atrito como das rugosidades absolutas em cada tubo da rede. Ambos os parâmetros são representados no vetor, separadamente. A aptidão de cada indivíduo representa o ajuste entre as cargas transientes medidas e calculadas através da soma das diferenças absolutas. Assim, a aptidão pode ser escrita como:

$$f = - \sum_{j=1}^{NL} \sum_{i=1}^{NM} |H_{i,j}^m - H_{i,j}^c| \quad (13)$$

onde NM = número total de pontos de dados; NL = número de locais de medida na rede; $H_{i,j}^m$ = carga medida; $H_{i,j}^c$ = carga calculada; $i = 1, 2, \dots, NM$; e $j = 1, 2, \dots, NL$.

O objetivo é calibrar as rugosidades absolutas dos tubos e comparar com a calibração dos fatores de atrito.

SEQUÊNCIA PARA CALIBRAÇÃO VIA MTI

A sequência de passos da execução do modelo de calibração é a seguinte:

1. início;
2. geração aleatória de NC indivíduos;
3. codificação para representar a rugosidade ou o fator de atrito de cada tubo;
4. cálculo das cargas hidráulicas transientes usando o MOC;
5. cálculo da aptidão de cada indivíduo;
6. determinação da nova geração através dos operadores de: seleção com elitismo, cruzamento, mutação, e sucessão;
7. retorno ao passo (3) até que um número máximo de gerações ou um critério de convergência seja atendido;
8. fim.

APLICAÇÃO DO MODELO

Uma rede simples (Liggett e Chen, 1994) contendo onze tubos e sete nós (Figura 1) é usada para ilustrar o procedimento. A Tabela 1 apresenta as condições de estado permanente da rede. A última coluna descreve o tipo de nó. Demanda positiva indica fluxo de entrada na rede enquanto demanda negativa indica fluxo de saída.

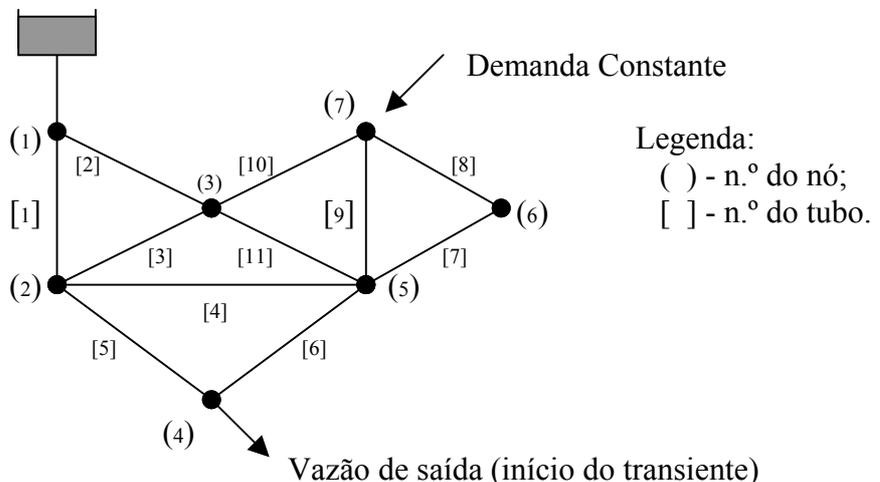


Figura 1 – Rede hidráulica usada no exemplo.

Tabela 1 – Dados do estado permanente para os nós da rede.

Nó (1)	H (m) (2)	Demanda (m ³ /s) (3)	Descrição do Nó (4)
1	30,00	0,046	Reservatório de carga constante
2	29,70	0,000	Junção comum
3	29,78	0,000	Junção comum
4	29,35	-0,058	Válvula de controle
5	29,69	0,000	Junção comum
6	29,70	0,000	Junção comum
7	29,76	0,012	Demanda constante

A Tabela 2 apresenta as características físicas e as vazões iniciais. Os parâmetros dos tubos incluem o comprimento, diâmetro, celeridade, e os valores considerados corretos de rugosidades e fatores de atrito. Os tubos da rede-exemplo são todos de ferro fundido com leve oxidação. Uma vazão positiva significa que a direção do fluxo coincide com a direção adotada para os nós.

Tabela 2 – Características físicas dos tubos e vazões iniciais.

Tubo (1)	Nó montante (2)	Nó jusante (3)	$Q_{inicial}$ (m ³ /s) (4)	L (m) (5)	D (m) (6)	a (m/s) (7)	a* (m/s) (8)	ϵ (mm) (9)	f (10)
1	1	2	0,023	305	0,250	1100,0	1560,5	0,30	0,0227
2	1	3	0,023	215	0,250	1100,0	1100,0	0,30	0,0227
3	3	2	0,008	215	0,200	1153,0	1153,0	0,30	0,0255
4	2	5	0,001	305	0,200	1153,0	1560,5	0,30	0,0372
5	2	4	0,029	215	0,250	1100,0	1100,0	0,30	0,0223
6	5	4	0,029	215	0,250	1100,0	1100,0	0,30	0,0223
7	6	5	0,003	215	0,200	1153,0	1153,0	0,30	0,0294
8	7	6	0,003	215	0,150	1187,0	1187,0	0,30	0,0290
9	7	5	0,011	305	0,250	1100,0	1560,0	0,30	0,0244
10	3	7	0,001	215	0,150	1187,0	1187,0	0,30	0,0354
11	3	5	0,014	215	0,250	1100,0	1100,0	0,30	0,0237

O intervalo de tempo, Δt , para a simulação computacional foi de 0,2s. O transiente foi simulado para um comprimento de registro de 20s. Com este intervalo de tempo foram considerados 11 trechos (1 trecho para cada tubo) na rede. A coluna (7) da Tabela 2 apresenta os valores iniciais da celeridade nos tubos. Esses valores correspondem às seguintes características: espessura da parede do tubo, $e' = 10$ mm; coeficiente de Poisson, $\nu = 0,25$; módulo de elasticidade do material do tubo, $E = 120$ GPa; módulo de elasticidade da água, $K = 2,19$ GPa; e massa específica da água, $\rho = 999$ kg/m³. Seguindo a condição de estabilidade de Courant ($\Delta x > a\Delta t$) e o método de ajuste da celeridade (Chaudhry, 1987) a coluna (8) apresenta os valores da celeridade ajustadas. A coluna (10) representa os valores dos fatores de atrito calculados a partir das rugosidades reais e vazões iniciais ou de regime permanente. As condições iniciais (regime permanente) foram obtidas a partir de condições transientes usando o MOC.

O nó 4 contém uma válvula que regula a vazão cuja manobra provoca o transiente na rede. Seguindo Simpson et al. (2000), inicialmente a válvula está completamente aberta, com uma vazão de 58 l/s, e mantida nesta posição até 2s. A partir daí, a válvula fecha-se linearmente em 8s até atingir uma vazão de 27,5 l/s. A válvula volta a abrir-se linearmente em 10s, atingindo a posição original.

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 20s, o número total de valores de carga foi de 100. A Figura 3 ilustra a variação temporal.

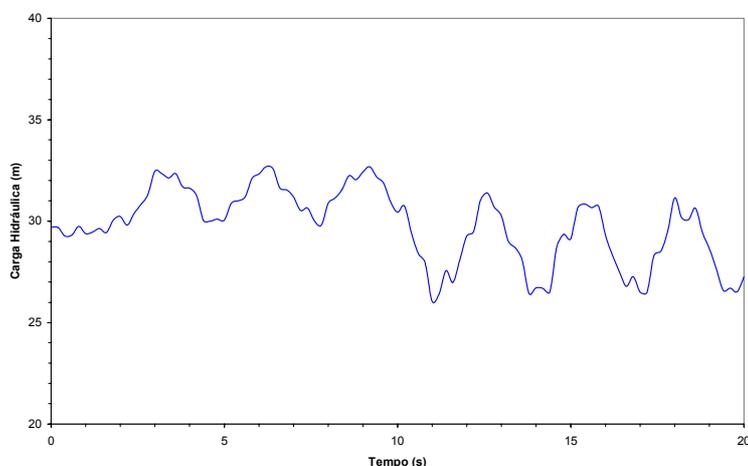


Figura 3 – Carga hidráulica “observada” para o nó 5.

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 são de 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 3 apresenta esta codificação.

Tabela 3 – 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)

- Caso 2: O material dos tubos pertence a uma certa faixa conhecida. 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 4.

Tabela 4 – Valores da rugosidade absoluta para o Caso 2

Nº Inteiro	ε (mm)								
1	0,10	10	0,19	19	0,28	28	0,37	37	0,46
2	0,11	11	0,20	20	0,29	29	0,38	38	0,47
3	0,12	12	0,21	21	0,30	30	0,39	39	0,48
4	0,13	13	0,22	22	0,31	31	0,40	40	0,49
5	0,14	14	0,23	23	0,32	32	0,41	41	0,50
6	0,15	15	0,24	24	0,33	33	0,42		
7	0,16	16	0,25	25	0,34	34	0,43		
8	0,17	17	0,26	26	0,35	35	0,44		
9	0,18	18	0,27	27	0,36	36	0,45		

- Caso 3: O material dos tubos é conhecido e possuem a mesma rugosidade. A codificação é feita pela Tabela 3.
- 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 0,040 com um incremento de 0,001; totalizando 31 valores possíveis. Essa codificação pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 – Escolha do fator de atrito conforme o esquema discreto

Nº Inteiro	f						
1	0,010	9	0,018	17	0,026	25	0,034
2	0,011	10	0,019	18	0,027	26	0,035
3	0,012	11	0,020	19	0,028	27	0,036
4	0,013	12	0,021	20	0,029	28	0,037
5	0,014	13	0,022	21	0,030	29	0,038
6	0,015	14	0,023	22	0,031	30	0,039
7	0,016	15	0,024	23	0,032	31	0,040
8	0,017	16	0,025	24	0,033		

RESULTADOS

Os parâmetros do AG aplicado para identificação de parâmetros foram: tamanho da população, $NC = 100$; probabilidade de elitismo, $p_e = 50\%$; probabilidade de cruzamento, $p_c = 100\%$; probabilidade de mutação, $p_m = 0,5\%$; probabilidade de sucessão, $p_s = 50\%$; número de gerações, $NG = 1000$. 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 5). A análise do ajuste dos parâmetros foi feita pelo Erro Médio Relativo (EMR) e que pode ser escrito assim:

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

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

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 6 apresenta as estimativas da rugosidade absoluta obtidas a partir do registro transiente de 20s de carga hidráulica observada no nó 5 para os três primeiros casos de estudo descritos na metodologia. Também são apresentadas 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 drasticamente 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 numa faixa estreita, a determinação das rugosidades absolutas ainda é obtida com grande eficiência, apresentando um EMR de apenas 5,8 %. Neste caso, a rugosidade absoluta variou entre 0,25 mm 0,36 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 72,5 % que, a primeira vista, parece ser um erro demasiado grande. As estimativas extremas de rugosidade de 0,07 mm e 1,61 mm correspondem às tubulações 4 e 10 respectivamente, tubulações estas que conduzem as menores vazões em estado permanente.

Tabela 6 – Estimativas das rugosidades obtidas do registro de carga hidráulica de 20 s no nó 5.

Tubo (1)	ε (mm) (2)	<i>Estimado</i>		
		Caso 1 (3)	Caso 2 (4)	Caso 3 (5)
1	0,30	0,34	0,30	0,30
2	0,30	0,27	0,30	0,30
3	0,30	0,16	0,28	0,30
4	0,30	0,07	0,25	0,30
5	0,30	0,29	0,30	0,30
6	0,30	0,26	0,29	0,30
7	0,30	0,62	0,36	0,30
8	0,30	0,16	0,30	0,30
9	0,30	0,22	0,29	0,30
10	0,30	1,61	0,32	0,30
11	0,30	0,37	0,29	0,30
EMR (%)	-	72,5	5,8	0,0

Para se Ter uma maior sensibilidade a respeito do verdadeiro significado do erro de estimação da rugosidade absoluta, apresentam-se na Tabela 7 fatores de atrito equivalentes às rugosidades apresentadas na Tabela 1 para os três casos, calculados com base nas vazões nos tubos em estado permanente. Observa-se que o EMR no fator de atrito para o caso 1 cai para 6,4 % dado que o EMR na rugosidade absoluta era de 72,5 %. Vê-se ainda que os valores reais e equivalentes dos fatores de atrito na tubulação 4 são 0,0372 e 0,0357 e na tubulação 10 são respectivamente de 0,0354 e 0,0456. Estas diferenças correspondem a 4 % e 28 %. Os valores dos fatores de atrito equivalentes à estimativa da rugosidade absoluta do caso 2 apresenta EMR de apenas 0,6 %.

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 8 apresenta tais estimativas. Observa-se que o EMR nos fatores de atrito de 6,4 % referente ao caso 1 é menor que o erro de 8,7 % 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 menor que 1 %.

Tabela 7 – Fatores de atrito equivalentes às estimativas de rugosidades da Tabela 1 calculados para condição permanente.

Tubo (1)	<i>f_{equivalente}</i>			
	Real (2)	Caso 1 (3)	Caso 2 (4)	Caso 3 (5)
1	0,0227	0,0232	0,0227	0,0227
2	0,0227	0,0223	0,0227	0,0227
3	0,0255	0,0236	0,0252	0,0255
4	0,0372	0,0357	0,0369	0,0372
5	0,0223	0,0222	0,0223	0,0223
6	0,0223	0,0218	0,0222	0,0223
7	0,0294	0,0322	0,0299	0,0294
8	0,0290	0,0270	0,0289	0,0290
9	0,0244	0,0235	0,0243	0,0244
10	0,0354	0,0456	0,0356	0,0354
11	0,0237	0,0245	0,0236	0,0237
EMR (%)	-	6,4	0,6	0,0

Tabela 8 – 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	0,0232	0,0218
2	0,0227	0,0223	0,0233
3	0,0255	0,0236	0,0276
4	0,0372	0,0357	0,0240
5	0,0223	0,0222	0,0220
6	0,0223	0,0218	0,0221
7	0,0294	0,0322	0,0293
8	0,0290	0,0270	0,0327
9	0,0244	0,0235	0,0231
10	0,0354	0,0456	0,0300
11	0,0237	0,0245	0,0260
EMR (%)	-	6,4	8,7

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.

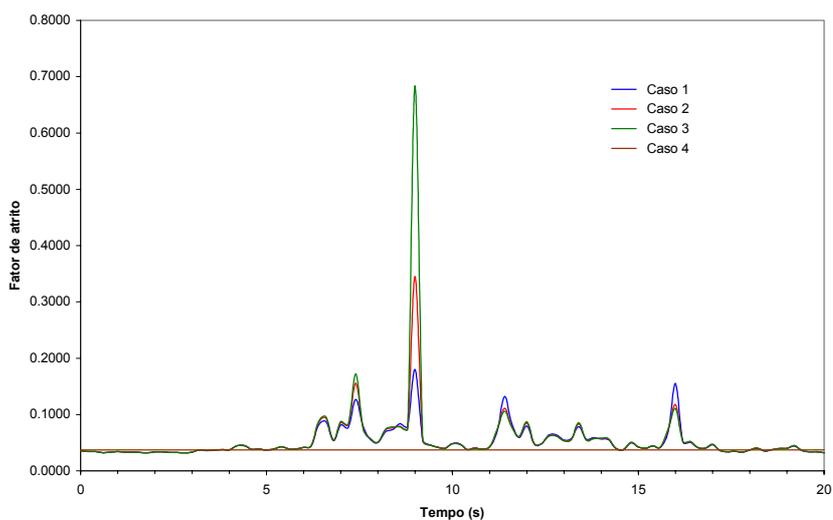


Figura 4 – Variação temporal do fator de atrito para os 4 casos de estudo referente ao tubo 4.

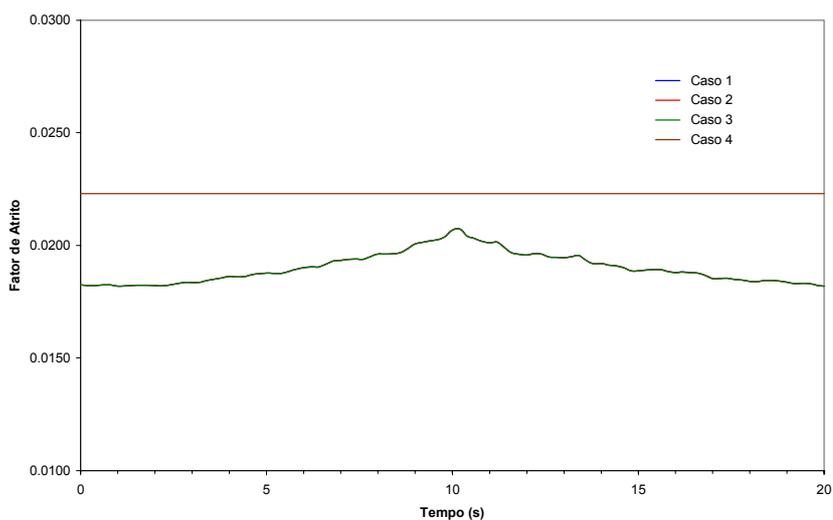


Figura 5 – Variação temporal do fator de atrito para os 4 casos de estudo referente ao tubo 5.

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, principalmente no caso 1, apresentam valores extremos em tubos que conduzem baixas vazões. 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- 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. & **JAIN**, A. K. – Explicit Equations for Pipe-Flow Problems. **Journal of Hydraulics Division**, ASCE, v. 102, n. 5, p. 627-664, 1976.

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.