
Identificação do Fator de Atrito em Rede de Distribuição de Água por meio do Método do Transiente Inverso - Algoritmo Genético (MTI-AG) e Fórmula de Swamee

Identification of the Friction Factor in a Water Distribution Network using the Transient Inverse Method - Genetic Algorithm (MTI-AG) and Swamee Formula

Gabriela Celso Melo Pinheiro de Vasconcelos, Bárbara Cristina Alves Costa e John Kenedy Araújo

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

gabrielacelso@ufpi.edu.br; barbaracivil@hotmail.com; kenedy@ufc.br

Recebido: 14/04/15 - Revisado: 12/05/15 - Aceito: 16/07/15

RESUMO

A água é um recurso natural essencial para todas as formas de vida e a sua distribuição deve ser realizada com qualidade e sem desperdícios. A ideia de aperfeiçoar os sistemas de distribuição de água surgiu de alguns pesquisadores e permite simular redes reais através de modelos computacionais capazes de estudar o seu comportamento nas situações diversas. As principais etapas dessa modelagem são calibração; operação e controle; projeto e otimização; e traçado de redes. Com o objetivo de aprimorar uma dessas técnicas, a de calibração, esse trabalho identifica alguns parâmetros (fator de atrito e rugosidade) de um sistema hidráulico e analisa a técnica mais conveniente: identificar o fator de atrito pelo método transiente inverso (MTI) com otimização da seleção da solução pelo algoritmo genético (AG) ou identificá-lo a partir da rugosidade (fórmula de Swamee), que também é calibrada pelo MTI-AG. O estudo é realizado a partir de uma rede sintética tirada da literatura, mas que representa um sistema real. As condições impostas para a análise abordam: uma manobra de válvula responsável pelo evento transiente, o monitoramento de cargas transientes somente em um nó da rede e a utilização de dois tipos de seleção de solução do algoritmo genético (com elitismo e sem elitismo). Os resultados encontrados apontam que independente do tipo de seleção é mais conveniente identificar o fator de atrito a partir das rugosidades absolutas do que calibrá-lo pelo método do transiente inverso devido à grande variabilidade dos fatores de atrito durante a ocorrência do evento transiente.

Palavras Chave: Calibração. Fator de atrito. Rugosidade. Método implícito. Regime transiente. Elitismo.

ABSTRACT

Water is an essential natural resource for all life forms and should be distributed with quality and without waste. The idea of optimizing water distribution systems came from some researchers with simulations of real networks using computational models to study their behavior in different situations. The main steps of this modeling are calibration; operation and control; design and optimization; and route networks. In order to improve one of these techniques, calibration, this work identifies some parameters (friction and roughness factor) of a hydraulic system and analyzes the most convenient technique: identifying the friction factor by the inverse transient method (ITM) with optimization of the selection of the solution by genetic algorithm (GA) or identifying it from roughness (Swamee formula), which is also calibrated by ITM-GA. The study is conducted based on a synthetic mesh taken from the literature, but it represents a real system. The conditions for the analysis are: a valve maneuver responsible for the transient event, the monitoring of transient loads on only one node of the network and the use of two types of solution of the genetic algorithm selection (with elitism and without elitism). The results show that regardless of the type of selection, it is more convenient to identify the friction factor determined from the absolute roughness than calibrate it by the inverse transient method due to the large variability of friction factors during the transient event.

Keywords: Calibration. Friction factor. Roughness. Implicit method. Transient. Elitism.

INTRODUÇÃO

Os desenvolvimentos populacional e industrial avançam demasiadamente sem planejamento e adoção de políticas socioambientais provocando a escassez de produtos naturais essenciais a todas as formas de vida, entre os principais: a água.

A necessidade de aprofundar o assunto resultou em técnicas de modernização e melhoramento dos projetos de sistemas de distribuição de água, possibilitando que suas operações ocorram de forma eficiente através do acompanhamento das condições de todos os seus componentes (trechos de tubulações, válvulas, registros, conexões, bombas, reservatórios e outros) ao longo do tempo.

Uma das ferramentas adotadas para estudar esses tipos de sistemas é a simulação dos mesmos através de modelos computacionais que possibilite prever seus comportamentos em situações diversas ao longo de sua vida útil. A importância desse estudo se evidencia visto que uma rede de distribuição de água pode ter suas propriedades e parâmetros (rugosidade absoluta, fator de atrito, diâmetros internos, componentes hidráulicos, cotas topográficas, demandas e outros) alterados ao longo do tempo e tais modificações podem chegar a afetar significativamente o mecanismo de distribuição de água ocasionando perdas de pressões internas, perda de capacidade de transporte de fluidos e até mesmo vazamentos.

Para Shamir e Howard (1977) os principais pontos a serem investigados na criação e melhoramento desses modelos são: calibração; operação e controle; projeto e otimização; e lançamento de redes. A calibração é o primeiro passo no estudo de uma rede já existente e pode ser interpretada como parte do processo de modelagem. Completado o processo de calibração, deve-se partir para a possibilidade de operar e controlar o sistema estudando opções de funcionamento e carregamento da rede através de processamento computacional.

A calibração, etapa enfatizada nesse trabalho, compreende o processo de identificação de parâmetros físicos e operacionais, passíveis de alteração com o tempo, possibilitando um mapeamento verdadeiro da rede e a criação de estratégias de decisões das concessionárias, evitando gastos desnecessários e perdas de água.

Segundo Vieira (2008) a técnica de calibração é julgada por muitos pesquisadores como sendo a mais apropriada para resolver problemas complexos como os sistemas de distribuição de água, principalmente por utilizar de técnicas de otimização para o ajuste dos parâmetros. O tema já foi abordado por diversos pesquisadores como: Simpson (2000), Araújo (2003), Soares (2003 a), Galiza (2006), Silva (2006), Soares (2007 b), Vieira (2008), Santos e Silva (2013) e outros.

O presente trabalho tem como objetivo utilizar o artifício de calibração, baseado em método implícito, em dados observados em regime transiente e na técnica de otimização de algoritmo genético, para ajustar o parâmetro fator de atrito a partir de duas técnicas propostas: de forma direta, através do método transiente inverso (MTI) com otimização da seleção da solução pelo algoritmo genético (AG), utilizando modelo proposto por Araújo (2003) fundamentado no Método das Características (MOC); e de forma indireta, utilizando a fórmula de Swamee

(1993) que depende da calibração prévia da rugosidade, que neste trabalho é realizada pelo MTI-AG. Nesse processo será avaliada também a influência do tipo de mecanismo de seleção do algoritmo genético: com elitismo e sem elitismo.

METODOLOGIA

Método Transiente Inverso

A análise de redes de distribuição de água pode ser abordada em duas situações: na primeira é realizado o estudo de redes hidráulicas ainda em fase de elaboração de projeto e na segunda esse estudo é concretizado em redes existentes. Na primeira, conhecida como problema direto, é comum se conhecer as necessidades e as demais características físicas do sistema desejando-se calcular as cargas hidráulicas nos nós e as vazões nos tubos de forma a atender a demanda. A segunda situação, também chamada de problema inverso, é adotada nesse trabalho e trata da análise de redes existentes nas quais geralmente são conhecidas somente as características físicas (quantidade e comprimento dos tubos, posicionamento dos nós e em alguns casos os diâmetros) e alguns dados disponíveis de cargas hidráulicas que podem ser medidas com ajuda de aparelhos “in loco”; e pretende-se identificar os parâmetros reais (fator de atrito, rugosidade, diâmetros, vazamentos, demandas e outros).

O método inverso, também denominado de método implícito, é apresentado por Vieira (2008) como o mais empregado para a calibração de redes, por utilizar de técnicas de otimização para alcançar ajustes mais reais entre os valores medidos e calculados de pressão e/ou vazão. O modelo é baseado na minimização da diferença entre esses valores e é aplicado para determinação de variáveis do sistema, tais como rugosidades, fatores de atrito, diâmetros, demandas etc.

A técnica é utilizada da seguinte forma: para inicializar o processo devem-se medir cargas hidráulicas nos nós durante o regime permanente. Em seguida estimam-se os parâmetros que se pretende calibrar e calculam-se as condições permanentes. A cada iteração é encontrado um conjunto de parâmetros que representam o sistema no modelo. A partir dessas variáveis, são encontrados como resposta, valores para vazões nos trechos e pressões nos nós. Esses valores encontrados são comparados com os valores medidos através de uma função objetivo. Caso a diferença entre os valores simulados e os obtidos no campo seja maior do que o pré-estabelecido, os parâmetros devem ser modificados até que a condição seja atendida. O modelo pode ser considerado calibrado quando for atingido pelo menos um dos critérios de parada: a aptidão satisfatória, número de gerações do otimizador ou a critério do pesquisador (VIEIRA, 2008).

O artifício adotado para a resolução do problema inverso é a ocorrência de um evento transiente, que ocasiona alteração no fluxo, antes em estado permanente. Nos casos mais comuns a alteração é transitória e o sistema volta às condições iniciais em determinado tempo. O fenômeno pode ocorrer em condutos fechados sob pressão (tubulações) ou em condutos abertos (rios e canais) e emite ondas de pressão que conduzem informações para todo o sistema hidráulico. Para os primeiros,

os fatores responsáveis podem ser: abertura e fechamento de válvulas de pressão, ligação ou interrupções de bombas, variação nas demandas ou consumos, vazamentos, alteração no nível dos reservatórios etc.

O estudo do fenômeno transiente em tubulações pode ser descrito matematicamente pelas equações de continuidade (equação 1) e de conservação de quantidade de movimento (equação 2). Essas equações são denominadas diferenciais parciais e possuem em seus termos elementos não lineares, impossibilitando a existência de uma solução analítica explícita.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

Equação da conservação de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f|Q|Q}{2DA} = 0 \quad (2)$$

Onde: $H [L]$ é a carga piezométrica, $Q [L^3T^{-1}]$ é a vazão volumétrica, $A [L^2]$ é a área da seção transversal do tubo, $a [LT^{-1}]$ é a celeridade (velocidade) da onda de pressão, $g [LT^{-2}]$ é o diâmetro interno da tubulação, f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach, $g [LT^{-2}]$ é a aceleração da gravidade, $x [L]$ é a distância e $t [T]$ o tempo.

As equações 1 e 2 podem ser resolvidas usando o Método das Características (MOC). Chaudhry (1987) e Wylie e Streeter (1978) ilustram seu uso em simulações com fluxo em redes hidráulicas:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = a \quad (3)$$

$$(4)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = -a$$

A celeridade, velocidade da onda, pode ser apresentada de acordo com a expressão de Halliwell apud Chaudhry (1987):

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1+(K/E)\Psi]}} \quad (5)$$

onde:

Ψ - parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto, sendo $\Psi = D/e'(1 - 0,5\nu')$ para condutos elásticos e paredes finas; D = diâmetro do conduto $[L]$; e' = espessura da parede $[L]$ e ν' = razão de Poisson, parâmetro adimensional.

E - módulo de elasticidade de Young da parede do conduto $[FL^{-2}]$

K - módulo de elasticidade $[FL^{-2}]$; e

P - massa específica do fluido $[ML^{-3}]$.

Transformando as equações diferenciais parciais (1) e (2) em equações diferenciais ordinárias na variável independente t (3) e (4) e representando-as em um plano *Espaço x Tempo*, as mesmas seriam simuladas por duas linhas características retas cujas inclinações seriam $\pm 1/a$. Essas linhas dividem o plano x - t em duas regiões, ver figura 1.

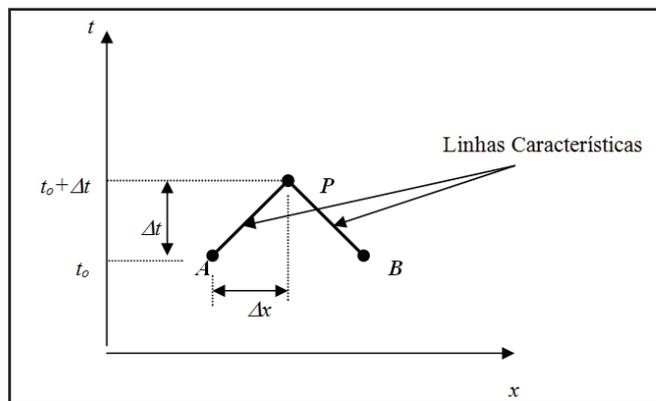


Figura 1 – Linhas Característica no plano x-t

Fonte: Araújo (2003)

A malha pode ser construída através da adoção de condições de contorno e condições iniciais de carga hidráulica e vazão.

Incorporação da rugosidade no MTI

O fator de atrito de Darcy-Weisbach, f , é um parâmetro adimensional geralmente considerado constante, entretanto para o regime transiente que apresenta escoamento turbulento, ou seja, o fluxo sofre alterações no decorrer do tempo, esse fator varia repentinamente de acordo com a vazão, através do Número de Reynolds, e com a rugosidade relativa (ϵ/D). Essa relação pode ser descrita matematicamente pela fórmula de Swamee (1993):

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

Sendo Re número de Reynolds $[4Q/(\pi D\nu)]$, adimensional; Q vazão $[LT^{-3}]$; D = diâmetro $[L]$; ν = coeficiente de viscosidade cinemático do fluido $[FL^{-2}T]$; e ϵ = rugosidade absoluta $[L]$

As rugosidades serão abordadas como parâmetros a serem calibradas pelo MTI-AG inicialmente e posteriormente utilizadas para cálculo de fatores de atrito ditos “equivalentes” através da fórmula de Swamee, uma vez que para cada valor da vazão corresponderá um número de Reynolds que resultará em um fator de atrito

correspondente.

Algoritmo Genético

Lacerda e Carvalho (1999) descrevem os algoritmos Genéticos, AGs, como técnicas de programação evolucionária inspiradas nos mecanismos de evolução dos seres vivos e seleção

natural, ideias enfatizadas pelo naturalista e fisiologista Charles Darwin em 1859 em seu livro “A origem das espécies”.

O mecanismo de seleção dos algoritmos genéticos é a reprodução sintética da ideia de seleção natural, na qual os indivíduos mais aptos sobrevivem e tem possibilidade de transferir as características boas para os próximos descendentes, enquanto os seres menos aptos morrem, gerando assim populações cada vez melhoradas.

A geração de um algoritmo típico obedece aos seguintes passos (adaptado de SILVA, 2006):

1º geração de população inicial aleatória, conjunto de cromossomos, na qual cada um representa uma possível solução do problema;

2º a partir de uma função objetivo, a população é avaliada e cada cromossomo recebe uma nota, que representa sua aptidão e mede o seu grau de sucesso;

3º os indivíduos considerados menos aptos são descartados e os mais aptos são selecionados para transmitir suas características e gerar uma nova população;

4º aplica-se os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação nos membros selecionados gerando descendentes para a próxima geração;

5º verifica-se aptidão de cada cromossomo;

6º procuram-se soluções ótimas até o critério de parada (limite máximo de gerações ou quando a taxa de aptidão for estabelecida através da função objetivo).

Representação da solução

Uma solução é constituída por um conjunto de parâmetros, geralmente codificados, que podem ter dois tipos de representação que facilitem seu manuseio pelos operadores genéticos: representação binária e representação real. A representação binária, aplicada neste trabalho, é mais tradicional e tem sua importância devido ao seu uso em trabalhos pioneiros de Holland (1975 apud LACERDA e CARVALHO, 1999), é considerada de fácil utilização, manuseio e análise, sendo mais utilizada para intervalo de valores discretos, ou seja, com menor número de casas decimais.

Número de cromossomos e gerações

Os parâmetros de número de gerações (NG) e número de cromossomos (NC) foram adotados de acordo com simulações realizadas para diversos NG's e NC's. Os processamentos permitiram identificar quais parâmetros, entre os utilizados, apresentaram resultados mais satisfatórios, ou seja, apresentam menores funções objetivo e erros médios relativos. O tipo de parâmetro a ser calibrado e o tempo de processamento computacional também foram levados em consideração, pois os processamentos para calibração de fatores de atrito apresentaram duração menor que os processamentos para rugosidade.

Tipo de cruzamento

De acordo com Lacerda e Carvalho (1999) o operador genético de crossover é o principal mecanismo de busca de

soluções, pois alcançam as regiões desconhecidas do espaço de busca. Esses operadores são utilizados para simular a combinação de informações genéticas entre dois indivíduos.

O crossover em um ponto é utilizado a cada par de cromossomos pais gerando dois cromossomos filhos com uma probabilidade que será de 100%. Como cada um dos cromossomos pais tem sua cadeia de bits cortada em uma posição aleatória. As partes serão trocadas gerando dois novos cromossomos. Pode-se verificar o comportamento deste operador na Figura 2.

| | |
|---------|---|
| pai 1 | (0 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0) |
| pai 2 | (0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 1 0 0) |
| filho 1 | (0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 1 0 0) |
| filho 2 | (0 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0) |

Figura 2 – Crossover de um ponto
Fonte: Adaptado de Lacerda e Carvalho (1999)

Tipo de mutação: simples

O operador da mutação ocorre logo após a recombinação e envolve, no caso de representação binária, a alteração de bits com dada probabilidade, invertendo seus valores, ou seja, altera o valor de um dado bit de 1 para 0 ou vice-versa. Conforme os estudos de Lacerda e Carvalho (1999) a operação é importante porque melhora a diversidade dos cromossomos na população, porém acaba por eliminar informações contidas no cromossomo. Por isso a taxa de mutação utilizada deve ser pequena, variando entre 0,1% a 5%, mas suficiente para garantir a diversidade.

Seleção

O artifício adotado nesse trabalho para escolha desses cromossomos será a seleção proporcional à aptidão, baseada na ideia do Elitismo. Segundo Lacerda e Carvalho (1999) essa estratégia, proposta inicialmente por DeJong (1975), transfere o melhor cromossomo de uma geração para outra sem alterações, para que a melhor solução não se perca durante os processos de recombinação e mutação.

Segundo Silva (2006) a aplicação do elitismo garante que os k melhores indivíduos da geração anterior nunca serão substituídos por filhos piores. Dessa forma o AG com elitismo encontra a solução mais rapidamente que o AG sem elitismo, ressaltando que o AG ocasionalmente encontra máximos locais (SOARES, 2003).

As calibrações realizadas são resultados de dois tipos de seleção: com elitismo e sem elitismo; e correspondem à média de 10 processamentos de AG. Os parâmetros adotados para o algoritmo genético são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros dos AGs utilizados para a calibração

| | |
|-----------------------------|-------------|
| Representação da solução | Binária |
| Nº de cromossomos | 50 |
| Nº de gerações | 50 |
| Tipo de cruzamento | De um ponto |
| Probabilidade de cruzamento | 100 % |
| Tipo de mutação | Simple |
| Probabilidade de mutação | 0,50 % |
| Taxa de elitismo | 0% e 50 % |
| Taxa de sucessão | 50 % |

Função Objetivo

A função objetivo é a metodologia adotada para ajustar os valores calculados de cargas aos valores medidos melhorando a precisão da solução, através da avaliação da aptidão (nota) de cada cromossomo ou possível solução.

As calibrações dos parâmetros de fator de atrito e rugosidade são baseadas na minimização da soma dos desvios absolutos. A função aptidão sendo expressa por F:

$$aptidão = F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} |H_{i,j}^m - H_{i,j}^c| \quad (7)$$

Sendo:

TS = duração do transiente [T];

NL = número de locais de medida na rede

$H_{i,j}^m$ = carga medida [L]

$H_{i,j}^c$ = carga calculada [L]

$i = 1, 2, \dots, NL$

$j = 1, 2, \dots, TS$

Assim, pode-se definir a função objetivo como o negativo da soma dos desvios absolutos, o que demonstra que durante a identificação dos parâmetros, de rugosidade e fator de atrito, a otimização compreende maximizar a função objetivo:

$$F_{obj} = -F \quad (8)$$

Calibração via MTI

A problemática é analisada para uma rede sintética de distribuição de água, na qual se conhece as características físicas do sistema (quantidade, extensão e diâmetros dos trechos), vazões e demandas estabelecidas; e pretende-se calibrar os parâmetros de rugosidade e fator de atrito dos trechos. A rugosidade calibrada será utilizada como parâmetro para cálculo do fator de atrito equivalente a partir da equação 6 (fórmula de Swamee). Os valores de fatores de atrito equivalentes serão comparados com os fatores de atrito calibrados pelo método adotado.

É necessário conhecer as condições de vazões e cargas no regime permanente. Para tal estima-se, inicialmente, um

conjunto de parâmetros objetos da calibração para a aplicação de um modelo hidráulico permanente a fim de se conhecer as condições iniciais.

A ocorrência de um evento transiente será responsável pela produção de cargas sintéticas (MOC), que simularão as cargas medidas no campo, em um nó monitorado no intervalo de tempo de 80 segundos. Considerando que o registro de cargas ocorrerá no espaço de tempo de 0,1 segundos, totalizam-se 800 valores de cargas “medidas” no referido nó. Segundo Chaudhry (1987) sistemas de redes constituídos por mais de 02 trechos devem possuir mesmo intervalo de tempo em todos os trechos possibilitando assim o uso das condições de contorno nas conexões. O cálculo desse intervalo de tempo deve obedecer à condição de estabilidade de Courant-Friedrich-Lewy ($\Delta x > a\Delta t$), a fim de se evitar interpolações no valor de Δt utiliza-se a seguinte equação (CHAUDHRY, 1987):

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i N_i} \quad (1 \text{ até } n) \quad (9)$$

onde:

L_i – Comprimento do i -ésimo conduto [L⁻¹];

a_i – Celeridade do i -ésimo conduto [LT⁻¹];

N_i – número inteiro e igual ao número de trechos no qual o i -ésimo conduto é dividido [adimensional];

n – é o número de tubos no sistema [adimensional].

Os tubos são discretizados em 14 trechos com cerca de 150 m de comprimento cada um.

As cargas denominadas transientes são comparadas com as cargas permanentes calculadas inicialmente através da função objetivo repentinamente. Aplicam-se os parâmetros do algoritmo genético de seleção, cruzamento, mutação e sucessão. A relação mais satisfatória fornece valores para o cálculo dos parâmetros de rugosidade e fator de atrito. O critério de parada das simulações e comparações pode ser: o alcance da função objetivo ou do número máximo de gerações adotadas.

Indicadores de eficiência

Para comparar a eficiência da calibração dos parâmetros citados será aplicada a análise através do Erro Médio Relativo (EMR) que demonstra quão distantes em % estão os valores estimados dos calibrados, ver equação 10.

$$EMR(\%) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{(w_i^{real} - w_i^{estimado})}{w_i^{real}} \right] \times 100 \quad (10)$$

Onde:

w - representa os parâmetros a serem calibrados f e ε ;

i - número do tubo;

n - número total de tubos na rede.

Rede Hidráulica

A rede adotada (figura 3) foi adaptada da literatura de Liggett e Chen (1994) e é constituída por 05 anéis, 01 reservatório de carga constante (nó 1) de vazão constante de 46 l/s , 11 trechos de tubos, 02 nós de demanda (nó 4 e nó 7), 04 nós

comuns e uma válvula de controle (nó 4), no qual ocorrerá o fenômeno transiente. As cotas foram consideradas constantes.

O material adotado para as tubulações pertence à categoria ferro fundido, não são do mesmo material e não possuem a mesma rugosidade. Para início de cálculo de calibração, as rugosidades são consideradas constantes e iguais a 0,3 mm.

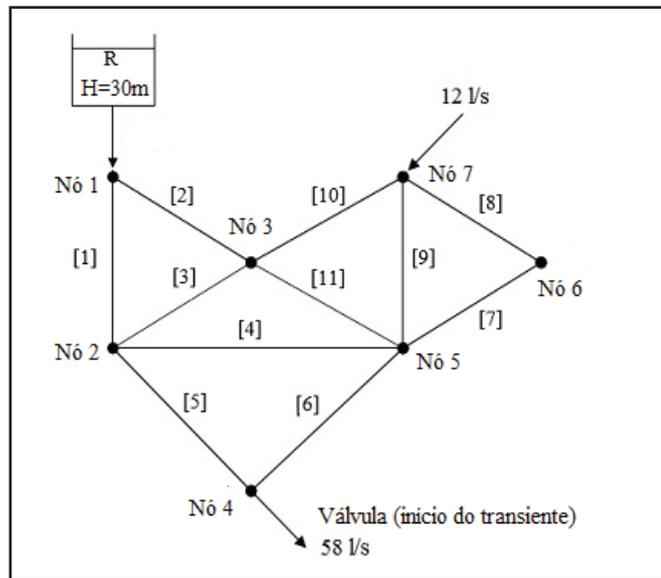


Figura 3 – Rede de distribuição de água
Fonte: Adaptada de Liggett e Chen, 1994

As características físicas da rede são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Características físicas da rede

| Tubo (1) | Q inicial (2) | L (3) | D (4) | a (5) | a* (6) | f _{equiv.} (7) |
|-------------|------------------|----------|----------|----------|-----------|----------------------------|
| 1 | 0,02279 | 305 | 0,25 | 1251,7 | 1525 | 0,02273 |
| 2 | 0,02321 | 215 | 0,25 | 1251,7 | 2150 | 0,02270 |
| 3 | 0,00760 | 215 | 0,20 | 1289,0 | 2150 | 0,02563 |
| 4 | 0,00128 | 305 | 0,20 | 1289,0 | 1525 | 0,03503 |
| 5 | 0,02910 | 215 | 0,25 | 1251,7 | 2150 | 0,02233 |
| 6 | 0,02890 | 215 | 0,25 | 1251,7 | 2150 | 0,02234 |
| 7 | 0,00289 | 215 | 0,20 | 1289,0 | 2150 | 0,02958 |
| 8 | 0,00289 | 215 | 0,15 | 1329,9 | 2150 | 0,02918 |
| 9 | 0,01056 | 305 | 0,25 | 1251,7 | 1525 | 0,02452 |
| 10 | 0,00145 | 215 | 0,15 | 1329,9 | 2150 | 0,03281 |
| 11 | 0,01417 | 215 | 0,25 | 1251,7 | 2150 | 0,02372 |

Esses valores correspondem às seguintes características: espessura da parede do tubo, $t = 10$ mm; coeficiente de Poisson, $\nu = 0,25$; módulo de elasticidade do material do tubo, $E = 120$ GPa; módulo de elasticidade da água, $E_w = 2,19$ GPa; e massa específica da água, $\rho = 999$ kg/m³. Seguindo a condição de estabilidade de Courant (Δt) e o método de ajuste da celeridade (Chaudhry, 1987) a coluna (6) apresenta os valores da celeridade ajustadas. A coluna (7) representa os valores dos fatores de atrito calculados (a partir das rugosidades reais e vazões iniciais, obtidas a partir de condições transientes usando o MOC).

Manobra

A manobra responsável pelo evento transiente pode ser representada por um gráfico que descreve a relação entre o coeficiente de abertura ou fechamento relativo da válvula, τ (tau), em função do tempo t . A abertura máxima é apresentada quando $\tau=1$ e o fechamento total acontece quando $\tau=0$.

Inicialmente, quando $t=0$, a válvula encontra-se totalmente aberta. Em seguida o operador inicia o seu fechamento que se completa em 60 segundos de forma linear e a mesma permanece fechada, ver gráfico 1.

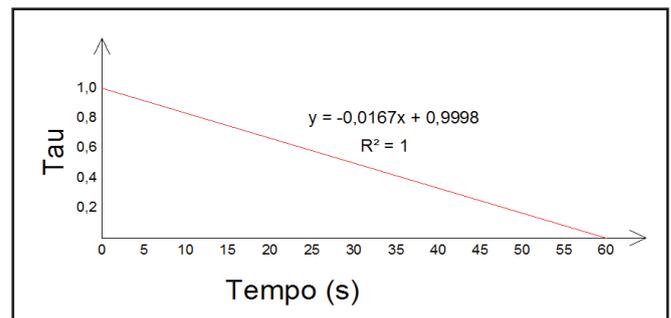


Gráfico 1 – Manobra de válvula

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A obtenção dos resultados para a metodologia adotada segue os seguintes passos:

1. Cálculo das cargas nas condições permanentes;
2. Simulação do evento transiente e monitoramento de cargas no nó 04;
3. Calibração da rugosidade através do MTI-AG;
4. Cálculo das novas condições de pressão e vazão do sistema diante dos novos valores encontrados de rugosidade a fim de obter os fatores de atrito equivalentes pela fórmula de Swamee;
5. Calibração do parâmetro fator de atrito através do MTI-AG utilizando os dados de fator de atrito equivalentes às rugosidades reais;
6. Comparação entre os valores de fatores de atrito apontados pela calibração e pela fórmula de Swamee.

Cálculo das cargas nas condições permanentes

As condições iniciais de vazão e pressão para regime permanente da rede são encontradas com o auxílio de programa produzido por Araújo(2003) a partir dos valores adotados de rugosidades e dos valores de fatores de atrito equivalentes da tabela 2. As tabelas 3 e 4 apresentam os resultados.

Monitoramento do evento transiente para a rugosidade e fator de atrito

A simulação do evento transiente, considerando a manobra apresentada, possibilita o monitoramento de 800 cargas

Tabela 3 – Cargas hidráulicas no regime permanente nos nós da rede na calibração da rugosidade

| Nó | Carga hidráulica HO(m) |
|----|------------------------|
| 1 | 30,0000 |
| 2 | 29,6952 |
| 3 | 29,7774 |
| 4 | 29,3508 |
| 5 | 29,6906 |
| 6 | 29,7043 |
| 7 | 29,7612 |

Tabela 4 – Cargas hidráulicas no regime permanente nos nós da rede na calibração do fator de atrito

| Nó | Carga hidráulica HO(m) |
|----|------------------------|
| 1 | 30,0000 |
| 2 | 29,6951 |
| 3 | 29,7773 |
| 4 | 29,3509 |
| 5 | 29,6905 |
| 6 | 29,7042 |
| 7 | 29,7612 |

sintéticas no nó 04. O parâmetro a ser calibrado influencia na geração das cargas transientes conforme os gráficos 2 e 3.

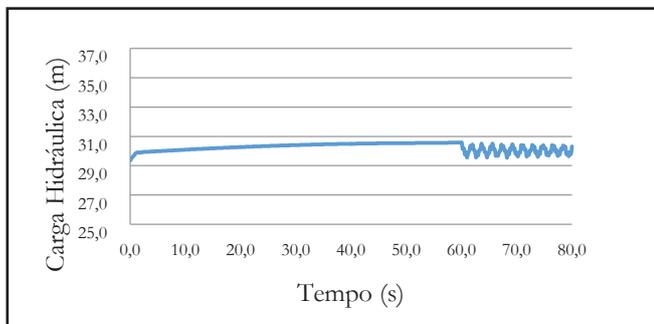


Gráfico 2 - Cargas hidráulicas transientes “observadas” no nó 04 referentes à identificação da rugosidade

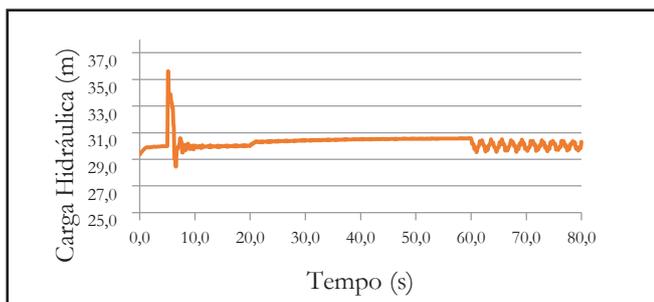


Gráfico 3 - Cargas hidráulicas transientes “observadas” no nó 04 referentes à identificação do fator de atrito

Calibração da rugosidade através do MTI-AG

A calibração da rugosidade feita pelo programa proposto por Araújo (2003) utiliza-se das cargas transientes e permite analisar através do EMR(%) quão diferentes estão os valores reais adotados inicialmente dos valores calibrados. A tabela 5 apresenta os valores de rugosidades absolutas encontradas considerando os tipos de seleção adotados no algoritmo genético: com elitismo e sem elitismo.

Tabela 5 – Calibração da rugosidade via MTI-A

| Trecho | ϵ_{real} (mm) | f_{real} | ϵ (mm) | |
|---------|------------------------|------------|-----------------|--------------|
| | | | com elitismo | sem elitismo |
| 1 | 0,3000 | 0,02273 | 0,3560 | 0,2580 |
| 2 | 0,3000 | 0,02270 | 0,2810 | 0,3380 |
| 3 | 0,3000 | 0,02563 | 0,3270 | 0,3255 |
| 4 | 0,3000 | 0,03503 | 0,3450 | 0,3890 |
| 5 | 0,3000 | 0,02233 | 0,3330 | 0,3340 |
| 6 | 0,3000 | 0,02234 | 0,2740 | 0,2980 |
| 7 | 0,3000 | 0,02958 | 0,4090 | 0,5170 |
| 8 | 0,3000 | 0,02918 | 0,3510 | 0,3980 |
| 9 | 0,3000 | 0,02452 | 0,3700 | 0,2600 |
| 10 | 0,3000 | 0,03281 | 0,3522 | 0,2805 |
| 11 | 0,3000 | 0,02372 | 0,3760 | 0,2825 |
| EMR (%) | - | - | 17,10 | 18,86 |
| IA (%) | | | 82,90 | 81,14 |

Os índices de EMR (%) estão na mesma faixa: 17,10% para calibração da rugosidade com elitismo e 18,86% para a calibração desse parâmetro sem elitismo, demonstrando que o tipo de seleção influencia muito pouco na identificação desse parâmetro. No entanto, a calibração com elitismo apresenta menor dispersão em relação aos valores adotados inicialmente como reais, conforme se pode verificar nos gráficos 4 e 5.

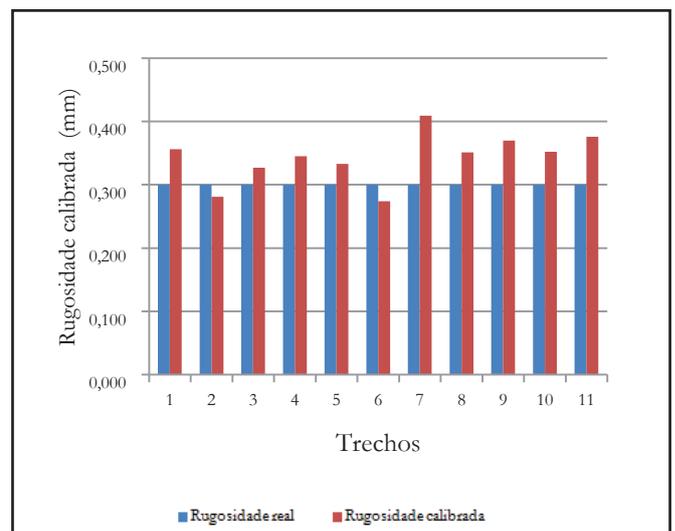


Gráfico 4 - Rugosidades calibradas com elitismo

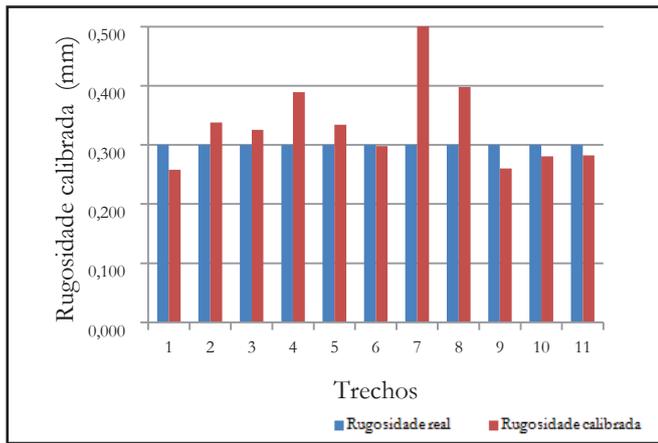


Gráfico 5 - Rugosidades calibradas sem elitismo

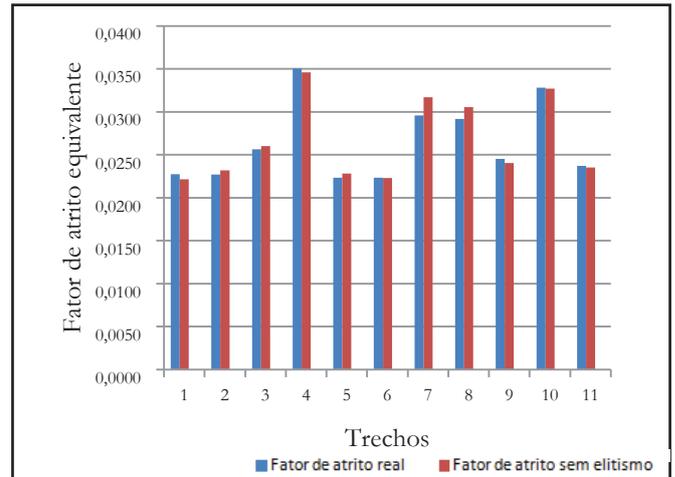


Gráfico 7 - Fatores de atrito equivalentes sem elitismo

Cálculo dos fatores de atrito equivalentes

A partir dos valores encontrados de rugosidades calibradas calculam-se novas condições de vazão e em seguida o fator de atrito equivalente através da fórmula de Swamee (1993). Ver tabela 6 com os valores encontrados.

Tabela 6 – Cálculo dos fatores de atrito equivalentes

| Trecho | f_{real} | com elitismo | sem elitismo |
|---------|------------|-------------------|-------------------|
| | | $f_{equivalente}$ | $f_{equivalente}$ |
| 1 | 0,02273 | 0,0231 | 0,0221 |
| 2 | 0,02270 | 0,0233 | 0,0232 |
| 3 | 0,02563 | 0,0260 | 0,0260 |
| 4 | 0,03503 | 0,0340 | 0,0346 |
| 5 | 0,02233 | 0,0238 | 0,0228 |
| 6 | 0,02234 | 0,0230 | 0,0223 |
| 7 | 0,02958 | 0,0302 | 0,0317 |
| 8 | 0,02918 | 0,0298 | 0,0305 |
| 9 | 0,02452 | 0,0253 | 0,0240 |
| 10 | 0,03281 | 0,0290 | 0,0327 |
| 11 | 0,02372 | 0,0191 | 0,0235 |
| EMR (%) | | 5,14 | 2,25 |
| IA (%) | | 94,86 | 97,75 |

Os índices de erros encontrados variam entre 2,25% a 5,14% e apesar da pouca diferença os melhores resultados são encontrados para o cálculo do fator de atrito equivalente a partir das rugosidades calibradas sem elitismo. Situação comprovada nos gráficos 6 e 7.

Calibração do fator de atrito através do MTI-AG

A calibração do fator de atrito se inicia a partir dos dados adotados na tabela 2, do cálculo das condições iniciais e das cargas transientes geradas pela manobra conforme gráfico 3.

Tabela 7 – Calibração do fator de atrito via MTI-AG

| Trecho | ϵ_{real} (mm) | f_{real} | com elitismo | sem elitismo |
|---------|------------------------|------------|-----------------|-----------------|
| | | | $f_{calibrado}$ | $f_{calibrado}$ |
| 1 | 0,3000 | 0,02273 | 0,0206 | 0,0217 |
| 2 | 0,3000 | 0,02270 | 0,0202 | 0,0223 |
| 3 | 0,3000 | 0,02563 | 0,0331 | 0,0299 |
| 4 | 0,3000 | 0,03503 | 0,0397 | 0,0412 |
| 5 | 0,3000 | 0,02233 | 0,0312 | 0,0259 |
| 6 | 0,3000 | 0,02234 | 0,0292 | 0,0286 |
| 7 | 0,3000 | 0,02958 | 0,0461 | 0,0355 |
| 8 | 0,3000 | 0,02918 | 0,0357 | 0,0287 |
| 9 | 0,3000 | 0,02452 | 0,0306 | 0,0321 |
| 10 | 0,3000 | 0,03281 | 0,0359 | 0,0326 |
| 11 | 0,3000 | 0,02372 | 0,0308 | 0,0286 |
| EMR (%) | | | 25,05 | 14,39 |
| IA (%) | | | 74,95 | 85,61 |

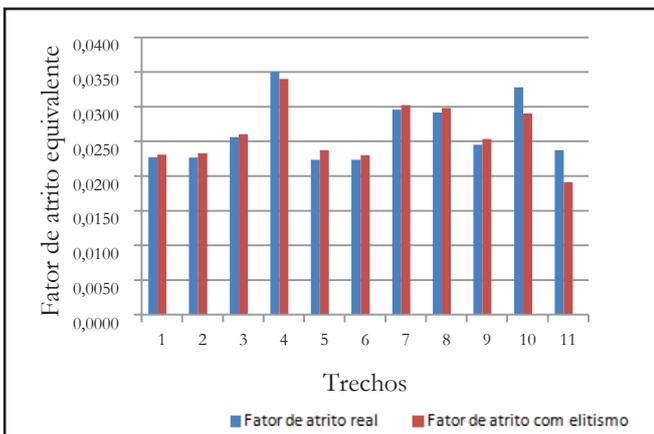


Gráfico 6 - Fatores de atrito equivalentes com elitismo

Os valores de EMR (%) encontrados na calibração do fator de atrito variam entre 14,39% para a calibração sem elitismo até 25,05% para calibração com elitismo. A dispersão entre esses números pode ser melhor analisada nos gráficos 8 e 9.

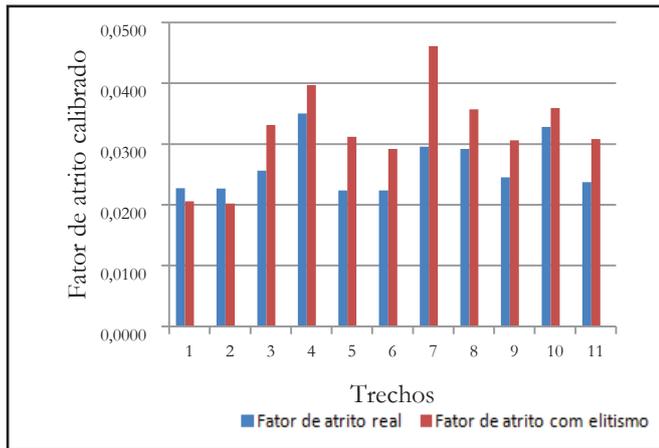


Gráfico 8 – Fatores de atrito calibrados com elitismo

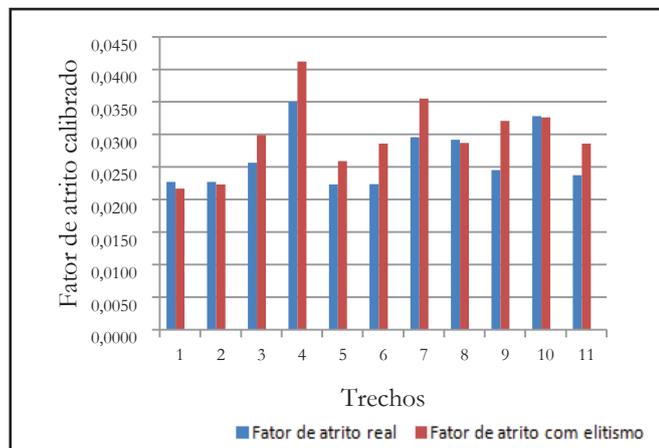


Gráfico 9 – Fatores de atrito calibrados sem elitismo

Comparação entre os valores de fatores de atrito apontados pela: pelo MTI-AG e fórmula de Swamee

As etapas realizadas possibilitam comparar os valores de fator de atrito calibrados pelo MTI -AG com os valores de fator de atrito calculado diretamente pela fórmula de Swamee.

Tabela 8 - Análise entre $f_{equivalente}$ e $f_{calibrado}$

| Trecho | ϵ_{real} (mm) | f_{real} | Com elitismo | | | Sem elitismo | | |
|---------|------------------------|------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| | | | $\epsilon_{calibrada}$ (mm) | $f_{equivalente}$ | $f_{calibrado}$ | $\epsilon_{calibrada}$ (mm) | $f_{equivalente}$ | $f_{calibrado}$ |
| 1 | 0,3 | 0,02273 | 0,3560 | 0,0231 | 0,0206 | 0,2580 | 0,0221 | 0,0217 |
| 2 | 0,3 | 0,02270 | 0,2810 | 0,0233 | 0,0202 | 0,3380 | 0,0232 | 0,0223 |
| 3 | 0,3 | 0,02563 | 0,3270 | 0,0260 | 0,0331 | 0,3255 | 0,0260 | 0,0299 |
| 4 | 0,3 | 0,03503 | 0,3450 | 0,0340 | 0,0397 | 0,3890 | 0,0346 | 0,0412 |
| 5 | 0,3 | 0,02233 | 0,3330 | 0,0238 | 0,0312 | 0,3340 | 0,0228 | 0,0259 |
| 6 | 0,3 | 0,02234 | 0,2740 | 0,0230 | 0,0292 | 0,2980 | 0,0223 | 0,0286 |
| 7 | 0,3 | 0,02958 | 0,4090 | 0,0302 | 0,0461 | 0,5170 | 0,0317 | 0,0355 |
| 8 | 0,3 | 0,02918 | 0,3510 | 0,0298 | 0,0357 | 0,3980 | 0,0305 | 0,0287 |
| 9 | 0,3 | 0,02452 | 0,3700 | 0,0253 | 0,0306 | 0,2600 | 0,0240 | 0,0321 |
| 10 | 0,3 | 0,03281 | 0,3522 | 0,0290 | 0,0359 | 0,2805 | 0,0327 | 0,0326 |
| 11 | 0,3 | 0,02372 | 0,3760 | 0,0191 | 0,0308 | 0,2825 | 0,0235 | 0,0286 |
| EMR (%) | - | - | 17,10 | 5,14 | 25,05 | 18,86 | 2,25 | 14,39 |
| IA (%) | - | - | 82,90 | 94,86 | 74,95 | 81,14 | 97,75 | 85,61 |
| FO | - | - | -0,22 | - | -81,06 | -0,18 | - | -80,97 |

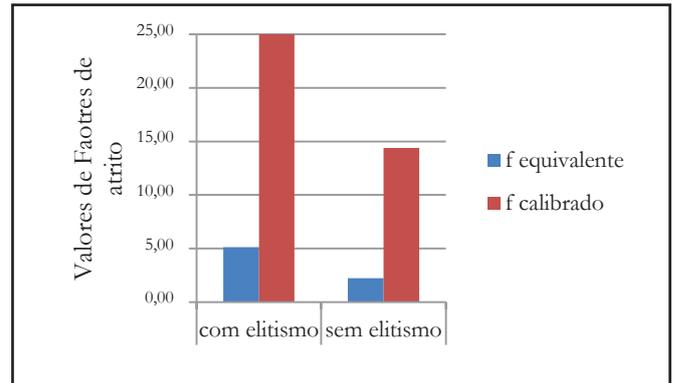


Gráfico 10 – Valores de EMR entre fatores de atrito equivalentes e calibrados

Os resultados encontrados apresentaram erros relativos médios menores (ERM) para o cálculo do fator de atrito a partir da rugosidade calibrada do que quando calculados pelo MTI-AG para as duas circunstâncias. A tabela 8 apresenta a análise.

RESUMO DOS RESULTADOS

Uma análise final compara, através de gráfico e tabela resumo, os valores de EMR(%) encontrados na identificação dos fatores de atrito equivalentes e calibrados

para as condições e metodologias adotadas verificando a influência do tipo de seleção do algoritmo genético (com elitismo e sem elitismo). Ver gráfico 10 e tabela 9.

Tabela 9 – Valores de EMR entre fatores de atrito equivalentes e calibrados

| Tipo de seleção | EMR (%) | |
|-----------------|-------------------|-----------------|
| | $f_{equivalente}$ | $f_{calibrado}$ |
| com elitismo | 5,14 | 25,05 |
| sem elitismo | 2,25 | 14,39 |

A tabela 9 permite verificar que os EMR (%) na identificação dos fatores de atrito equivalentes são próximos de zero e variam muito pouco para as situações a que são submetidos. Entretanto, são observados valores de EMR (%) maiores e instáveis para os fatores de atrito calibrados pelo MTT-AG. Ambos os resultados para a identificação do fator de atrito apresentaram resultados mais satisfatórios para a situação sem elitismo.

CONCLUSÕES

O trabalho proposto trata da calibração do fator de atrito em uma rede sintética de distribuição de água utilizando dois métodos: o primeiro identifica esse parâmetro através do transiente inverso com otimização da solução com algoritmo genético (MTI-AG) e o segundo identifica-o a partir da rugosidade, também calibrada pelo MTT-AG e posteriormente inserida na fórmula de Swamee. A aplicação dos dois métodos permite comparar os resultados com o fator de atrito real da rede através do erro médio relativo - EMR (%) sugerindo a melhor forma de identificar esse parâmetro.

Os resultados apontam que os métodos utilizados são promissores à identificação do parâmetro, sobretudo em sua comparação. Em ambas as situações adotadas, a identificação do fator de atrito apresenta menor EMR (%) quando calculado de forma indireta, através da rugosidade, do que quando calibrado diretamente pelo MTT-AG. A explicação se dá porque quando calculado diretamente, o fator de atrito que depende da vazão (número de Reynolds) se altera comumente (apresentando valores instáveis) durante o evento transiente, enquanto a rugosidade, quando calibrada pelo mesmo método, admite a influência da variabilidade temporal das vazões nos tubos e permanece constante. Essas rugosidades calibradas são inseridas na fórmula de Swamee fornecendo valores de fatores de atrito mais próximos dos reais.

Outra análise realizada verifica a influência direta do tipo de seleção do algoritmo genético (com elitismo e sem elitismo) e pode ser dividida em duas partes. A primeira compara os valores de EMR (%) encontrados na identificação dos fatores de atrito equivalentes, na qual se conclui que as duas condições impostas parecem não influenciar nos resultados, pois os erros médios relativos são baixos e próximos de zero (ver tabela 9), variando de 2,25% (sem elitismo) até 5,14% (com elitismo). A pouca instabilidade desses resultados ocorre porque esses valores são calculados a partir de rugosidades calibradas pelo MTT-AG, que nesse estudo mostra não se alterar significativamente quando na mudança do tipo de seleção. A segunda parte permite comparar os valores de EMR (%) encontrados na calibração do fator de atrito pelo MTT-AG para as duas situações, nas quais os valores de erros são maiores e variam entre 14,39% (sem elitismo) a 25,05% (com elitismo). No entanto, o menor erro se apresenta para a situação sem elitismo.

Recomenda-se para um próximo trabalho aplicações da metodologia para sistemas de distribuição de água hipotéticos ou reais considerando as suas condições de vazamentos e erros de leitura de cargas para que seja identificada a proporção do erro em relação às condições apresentadas nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. K. Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicada à escoamento transiente. 2003. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- CHAUDHRY, M. H. *Applied hydraulic transients*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1987. 521p.
- DARWIN, C. *A Origem das Espécies*. São Paulo: Hemus Livraria Editora Ltda., 2002.
- DEJONG, K. *The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems*. 1975. (PhD thesis) - University of Michigan, 1975.
- GALIZA, R. V. P. Calibração de rugosidade de tubulações de redes de distribuição de água, via método transiente inverso com aplicação de algoritmo genético. 2006. 162f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, 2006.
- LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. Introdução aos algoritmos genéticos. In: Galvão, C.O.; Valença, M.J.S. (Org.). *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999. p. 99-150.
- LIGGETT, J. A.; CHEN, L-C. Inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Hydraullic Engineering*, ASCE, v. 120, n. 8, p. 934-955, 1994.
- SANTOS, A. C. N; SILVA, F.G.B. Estudo de calibração de Rugosidade em Rede de Distribuição de Água do Bairro Jardim América - MG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.18, n.3, p. 261-269, 2013.
- SHAMIR, U.; HOWARD, C. D. D. - Engineering Analysis of Water-Distribution Systems. *Journal American Water Works Association*, v. 69 n.9, p. 510-514, 1977.
- SILVA, A. C. A. Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos. 2006. 134f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, 2006.
- SILVA, F. G. B. Estudos de calibração de redes de Distribuição de água através de Algoritmos Genéticos. 2003. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos, São Paulo, 2003.
- SIMPSON, A.; VITKOVSKÝ, J.; LAMBERT, M. Transients for calibration of pipe roughnesses - *A review and the application of 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.

SOARES, A. K. Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão. São Carlos. 2003. 153f.. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

SOARES, A. K. - Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no escoamento Transitório. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos, SP, 2007.

SWAMEE, P. K. – Design of a submarine pipeline. *Journal Transp. Eng., ASCE*, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.

ZZZ, M. E. A G. - Calibração de modelos de redes de distribuição de água usando algoritmo genético multiobjetivo. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, 2008.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. - *Fluid transients*. New York: McGraw-Hill, 1978, 384p.

Contribuição dos autores

Gabriela Celso: pesquisa bibliografica e simulacoes, bem como a elaboraçao e formataçao do artigo.

Barbara Cristina: pesquisa bibliografica e formataçao do artigo.

Kenedy Araujo: orientaçao e autor do programa utilizado na simulacoes.