

# Avaliação dos parâmetros de calibração do algoritmo genético na detecção de vazamentos em rede de distribuição de água utilizando o método transiente inverso

*Evaluation of calibration parameters of genetic algorithm in the detection of water dispensation network using the inverse transient method*

- **Data de entrada:**  
17/04/2018
- **Data de aprovação:**  
04/06/2018

Amanda Sousa Sampaio\* | John Kenedy de Araújo

DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.051>

## Resumo

A água é um recurso natural fundamental para a manutenção de todas as formas de vida, e a sua distribuição deve ser promovida com qualidade e sem desperdícios. A ideia de aperfeiçoar os sistemas de distribuição de água e simular redes reais por meio de modelos computacionais vem sendo explorada cada vez mais por pesquisadores. O Modelo Transiente Inverso (MTI), otimizado pelo Algoritmo Genético (AG), foi aplicado neste trabalho em uma rede de distribuição sintética para identificar e quantificar vazamentos. Ao mesmo tempo foram avaliados os efeitos da variação dos operadores do AG (tamanho da população; número de gerações; taxa de elitismo e taxa de ocorrência de mutação) na precisão das soluções encontradas. O desempenho do modelo MTI-AG foi testado e constatou-se sua eficácia na identificação e quantificação de vazamentos. Entretanto, seu tempo de processamento pode ser um elemento limitador de seu uso.

**Palavras-chave:** Análise Transiente Inversa. Algoritmo Genético. Vazamentos. Elitismo.

## Abstract

Water is a fundamental natural resource for the maintenance of all forms of life, and its distribution must be promoted with quality and without waste. The idea of improving water distribution systems has arisen from some researchers and it allows for the simulation of real networks through computational models capable of studying their behavior in different situations. Inverse Transient Analysis (ITA) optimized by a Genetic Algorithm (GA) was applied to a synthetic distribution network to identify and quantify leaks. At the same time, the effects of variation of the GA operators (population size, number of generations, elitism rate and mutation rate) were evaluated as to the accuracy of the solutions found. The performance of the ITA-GA model was tested and its effectiveness in the identification and quantification of leaks was verified. However, its processing time can be a limiting element of its use.

**Keywords:** Inverse Transient Analysis. Genetic Algorithm. Leaks Detection. Elitism.

**Amanda Sousa Sampaio** – Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

**John Kenedy de Araújo** – Graduação em Engenharia Civil pela Universidade de Fortaleza (1988). Mestre em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará. Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Professor associado da Universidade Federal do Ceará.

\***Endereço para correspondência:** Rua 112, 283. Bairro Parque Dois Irmãos. CEP: 60744-510. Fortaleza -CE. Telefone: (85) 99786-7525. E-mail: amandasousasampaio@gmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital, e seu armazenamento e distribuição vêm sendo desenvolvidos desde a pré-história, quando grupos humanos criaram maneiras simples de recolher águas das chuvas, rios e lagos. Na idade antiga surgiram as primeiras cidades, o que causou um aumento na demanda desse precioso recurso. Foi a partir desse momento que projetos de engenharia para condução e armazenamento de água começaram a ser desenvolvidos.

A análise de sistemas de distribuição de água é um problema de grande interesse de pesquisadores e de profissionais de engenharia. De acordo com Araújo (2003), nos últimos trinta anos o assunto vem sendo investigado com maior precisão por conta do aumento populacional e do advento das questões ambientais. A análise desses sistemas visa desenvolver tecnologias capazes de oferecer um serviço mais eficiente ao consumidor e eliminar desperdícios.

O monitoramento de redes hidráulicas pelos órgãos responsáveis aprimorou-se bastante. Diversas técnicas foram desenvolvidas no sentido de otimizar a distribuição de água buscando minimizar danos e vazamentos na rede. Ainda assim, segundo dados do Ministério das Cidades (SNSA, 2016), a média brasileira de perdas de água na distribuição situa-se no patamar dos 37%, incluindo perdas reais e aparentes. Nesse cenário, projetos de redução de vazamentos tornam-se prioritários para autoridades e pesquisadores.

Existem diversos modelos hidráulicos para cálculos de vazões, diâmetros e caracterização da estrutura física dos sistemas de abastecimento. A tentativa de tornar conhecidos esses parâmetros é chamada de calibração, objetivando reproduzir a performance da rede em uma modelagem computacional. Segundo Gambale (2000), os modelos de calibração auxiliam na determinação dos coeficientes de rugosidades das redes ou das demandas nos nós.

O processo de calibração pode ser desenvolvido em escoamento permanente e transiente. Os transientes em redes hidráulicas ocorrem quando há variação da pressão e vazão provocada por um distúrbio, tal como abertura e fechamento de uma válvula. Os transientes oferecem melhor oportunidade para realizar a calibração de redes por requererem menor número de locais de observação do que no caso de escoamento permanente, produzindo grande quantidade de informações em um curto período de tempo. O Método Transiente Inverso (MTI) determina fatores de atrito, rugosidades, localização de vazamentos, quantificação das demandas e outros parâmetros. A análise é feita por meio da minimização dos desvios entre as cargas hidráulicas medidas e calculadas.

Para resolver problemas que envolvem dados transientes, novas técnicas de otimização vêm sendo exploradas, entre elas a otimização genética, que vem desempenhando um papel fundamental na análise de sistemas de distribuição de água e colaborando com o processo de calibração. A técnica do Algoritmo Genético (AG) vem se destacando como ferramenta para encontrar a melhor solução na busca dos parâmetros desconhecidos.

Procedimentos para a detecção de vazamentos por meio da calibração de modelos de sistemas de distribuição de água no regime não permanente vêm sendo propostas por diversos autores, como Liggett e Chen (1994), Vítkovský, Simpson e Lambert (2000, 2002), Kapelan, Savic e Walters (2002, 2003, 2004), Covas (2003), Covas et al. (2004) e Soares (2007).

Araújo e Chaudhry (2003), Vasconcelos, Costa e Araújo (2015), Santos e Silva (2013) e Sampaio (2018) utilizaram um Método Transiente Inverso associado ao Algoritmo Genético (MTI-AG), com objetivo de aprimorar a calibração de parâmetros de uma rede sintética de distribuição de água. Os trabalhos apontam o MTI-AG como um

procedimento promissor na avaliação do estado das redes de distribuição de água.

A metodologia proposta neste trabalho apresenta o artifício de calibração baseada em dados observados no regime transiente e na técnica de otimização de Algoritmo Genético, para identificar e quantificar vazamentos (tratados como uma demanda adicional em um nó da rede) por meio do método MTI-AG, utilizando um modelo proposto por Araújo (2003) fundamentado no Método das Características (MOC).

Nesse processo será avaliado o desempenho da técnica do AG e a influência de seus parâmetros a fim de alcançar maior precisão da solução encontrada. Serão avaliados os efeitos da variação dos seguintes operadores do Algoritmo Genético: Tamanho da População (NC); Número de Gerações (NG); Taxa de Elitismo (TE) e Taxa de ocorrência de Mutação (TM).

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é avaliar o desempenho dos operadores genéticos computacionais do Algoritmo Genético aplicado na calibração e localização de vazamentos em redes hidráulicas de distribuição de água por meio do Método Transiente Inverso (MTI), que consiste na minimização dos desvios entre as cargas hidráulicas transientes observadas e calculadas.

De maneira específica, os objetivos desse trabalho são:

- Avaliar a influência de diferentes tamanhos da população de soluções no desempenho do modelo MTI-AG;
- Analisar a influência de diferentes números de gerações até a escolha da melhor solução;
- Avaliar a influência de diferentes taxas de elitismo no desempenho do modelo MTI-AG;

- Analisar a influência de diferentes taxas de ocorrência de mutação de geração para geração;
- Avaliar a influência de diferentes taxas de cruzamento do material genético.

## 3 O MÉTODO TRANSIENTE INVERSO

Durante a operação de sistemas de abastecimento de água, são necessárias diversas manobras em válvulas, bombas, reservatórios e canalizações. Em muitos casos, essas manobras causam alterações no regime de escoamento da água nos condutos. Essas variações podem gerar fenômenos conhecidos como transientes hidráulicos, que podem trazer consequências desastrosas, como o rompimento ou colapso de tubulações.

O escoamento transiente pode ser expresso matematicamente por duas equações diferenciais parciais não lineares: a equação da continuidade (Equação 1) e a equação do movimento (Equação 2). Essas duas equações diferenciais permitem calcular os valores da vazão  $Q$  e da carga hidráulica  $H$  ao longo da tubulação e do tempo. As equações podem ser resolvidas usando o Método das Características (MOC). Chaudhry (1987) e Wylie e Streeter (1978) são algumas das referências que fornecem as deduções destas equações e ilustram o uso delas em simulações com fluxo em redes hidráulicas.

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

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

Onde:  $H$  = carga piezométrica;  $Q$  = vazão volumétrica;  $A$  = área da seção transversal do tubo;  $a$  = celeridade da onda de pressão;  $D$  = diâmetro interno da tubulação;  $f$  = fator de atrito de Darcy-Weisbach;  $g$  = aceleração da gravidade;  $x$  = distância ao longo do tubo e  $t$  = tempo.

Entende-se o Método Transiente Inverso (MTI) como um método de calibração do tipo implícito que lança mão de dados disponíveis de carga hidráulica transiente para a identificação de parâmetros físicos da rede a ser calibrada ou ainda para a detecção de vazamentos e demandas nos nós, de forma a obter um ótimo ajuste entre os valores observados e calculados das referidas cargas através de técnicas de otimização. (ARAÚJO, 2003)

De acordo com Liggett e Chen (1994), a análise inversa usando medidas do regime transiente permite, simultaneamente, a calibração do sistema e a identificação de vazamentos. Além disso, com o uso de dados transientes, o monitoramento da rede torna-se mais adequado. As ondas transientes podem se deslocar com velocidades muito altas; essas ondas se refletem nas junções, válvulas e contornos do sistema. A coleta de informações pela propagação da onda transiente é a razão principal pela qual o MTI oferece maior potencial em comparação às técnicas de calibração em estado permanente.

## 4 CONCLUSÃO

### 4.1 Generalidades

Os Algoritmos Genéticos (AG's) são métodos de otimização e busca que usam técnicas de programação evolucionária baseados na teoria da evolução dos seres vivos e seleção natural do naturalista britânico Charles Darwin em 1859.

Com o princípio da seleção natural e a sobrevivência do mais apto reproduzida sinteticamente na ideia de seleção do algoritmo genético, juntamente com métodos probabilísticos para implementação, pode-se gerar populações cada vez aprimoradas. No caso das aplicações em enge-

nharia, essa ferramenta é empregada na procura da melhor solução de um dado problema.

Do et al. (2016) apresentaram um processo de calibração de fatores multiplicadores de demanda usando o AG com elitismo. O método conseguiu ter uma boa estimativa dos dados monitorados para diferentes demandas nodais, e os resultados mostraram alta sensibilidade à localização.

O funcionamento básico de um AG típico de seleção com elitismo obedece aos seguintes passos:

1º passo: geração de população inicial aleatória de  $NC$  indivíduos ( $a_1, a_2, \dots, a_{NC}$ ), conjunto de cromossomos, na qual cada um representa uma possível solução do problema;

2º passo: a partir de uma função objetivo, a população é avaliada e cada cromossomo recebe uma nota, que representa sua aptidão,  $f(a_i)$ , e mede o seu grau de sucesso;

3º passo: faz-se o ordenamento decrescente da aptidão,

4º passo: os indivíduos considerados menos aptos são descartados, e os mais aptos são selecionados para transmitir suas características e gerar uma nova população, de maneira a formar uma população de  $p_e \times NC$  indivíduos. Estabelece-se, assim, uma taxa de elitismo ( $p_e$ );

5º passo: aplicam-se os operadores genéticos de cruzamento e mutação nos membros selecionados gerando descendentes para a próxima geração;

6º passo: avaliação da nova população, verificando-se a aptidão de cada novo cromossomo;

7º passo: 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).

## 4.2 Operadores e parâmetros do AG

### • Número de Cromossomos

O parâmetro Número de Cromossomos (NC) deve ser definido com cautela. Uma grande população definida nos parâmetros do código leva a um tempo de processamento muito longo. Entretanto, se o tamanho da população for pequeno não haverá variedade genética suficiente para garantir êxito na busca pela melhor solução. Linden (2008) sugere que uma tentativa inicial razoável para o número de indivíduos dentro de sua população é dada por 40 vezes o número de características em seu cromossomo.

### • Número de Gerações

O parâmetro Número de Gerações (NG) é o critério de parada dos loops executados pelo algoritmo. A cada iteração, há um refinamento nos resultados de forma a se garantir progressivamente melhores resultados. Entretanto, quanto maior o número de gerações, maior será o tempo de processamento e nem sempre a melhoria relativa dos resultados compensa esse tempo perdido. Para cada tipo de problema é preciso avaliar e testar qual valor para o número de gerações atinge um resultado satisfatório no menor tempo possível.

### • Taxa de Cruzamento

O operador genético taxa de cruzamento, também chamado de crossover, permite a criação de uma nova geração e representa a transmissão de características, garantindo que os cromossomos filhos herdem características de seus cromossomos pais, mas que ainda assim sejam ligeiramente diferentes. Assim, o crossover é essencial na garantia de que o algoritmo não se torne uma busca aleatória. Ele é considerado o principal mecanismo de busca dos AG's para explorar re-

giões desconhecidas do espaço de busca. Quanto maior for esse operador, mais rapidamente estruturas com boas aptidões poderão ser introduzidas na população, mas da mesma maneira tais indivíduos de boa qualidade podem ser mais rapidamente descartados. Já com um baixo valor, o algoritmo tende a se tornar aleatório e pode ficar muito lento.

### • Taxa de Mutação

Após a operação de cruzamento, o operador de mutação é aplicado, com uma probabilidade, em cada cromossomo filho gerado. A mutação consiste em injetar novos cromossomos na população e permitir que o Algoritmo Genético busque soluções fora dos limites definidos pela população inicial, garantindo uma diversidade genética no decorrer das gerações. Por outro lado, destrói-se informação contida no cromossomo. Uma taxa de mutação baixa demais implicará em uma convergência genética; já uma taxa de mutação excessivamente alta pode levar o algoritmo a um estado de aleatoriedade no estabelecimento de suas próximas gerações. Logo, deve ser utilizada uma probabilidade de mutação pequena, mas suficiente para assegurar a diversidade. De acordo com Linden (2008), os valores usualmente adotados para essa taxa variam entre 0,5% e 1% seguindo uma tendência de bons resultados obtidos por trabalhos na área.

### • Taxa de Elitismo

Para garantir que o algoritmo tenha seu desempenho melhorado a cada geração criada, o operador de elitismo deve ser inserido no código. Esse operador seleciona uma porcentagem dos melhores indivíduos de sua geração, escolhidos de acordo com os valores da função objetivo, e os leva para a geração seguinte. Dessa maneira, na pior das hipóteses, o melhor indivíduo da gera-

ção seguinte será sempre melhor ou igual ao da geração anterior. Esse parâmetro é uma variante artificial da seleção natural de Darwin, onde a função objetivo funciona como mediador que decide se o cromossomo deve ser descartado ou selecionado para a próxima geração.

### 4.3 A Função Objetivo

O AG necessita de uma função objetivo para o cálculo e avaliação da aptidão (nota) de cada indivíduo. Cada indivíduo consiste de: *bits* (no caso de representação binária) e número real (representação real) que definem as características de uma solução particular. A aptidão de cada cromossomo representa o ajuste entre as cargas transientes medidas e calculadas por meio da soma das diferenças absolutas. Assim, a aptidão pode ser escrita como:

$$f = - \sum_{j=1}^{NL} \sum_{i=1}^{NM} |H_{i,j}^m - H_{i,j}^c| \quad (3)$$

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

A calibração do parâmetro vazamento é baseada na minimização da soma dos desvios absolutos. Dessa forma, pode-se definir a função objetivo como o negativo da soma dos desvios absolutos, demonstrando que durante a identificação do parâmetro vazamento a otimização compreende maximizar a função objetivo.

## 5 CALIBRAÇÃO VIA MTI-AG

A problemática é analisada para uma rede sintética de distribuição de água, na qual se conhecem as características físicas do sistema, vazões e demandas estabelecidas. Pretende-se calibrar os parâmetros que representam a identificação do nó que contém o vazamento e a quantificação da perda.

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. Depois, as cargas hidráulicas transientes da rede hidráulica são geradas e calcula-se a Função Objetivo. Aplicam-se os parâmetros do algoritmo genético: seleção, cruzamento e mutação. O critério de parada das simulações e comparações é o número máximo de gerações pré-estabelecido. Ressalta-se que no método inverso os parâmetros são considerados desconhecidos, sendo objeto de busca no problema de calibração. Só posteriormente à calibração, os parâmetros reais serão comparados com os estimados. Na Figura 1 abaixo é possível visualizar o procedimento do modelo MTI-AG.

Para trabalhar os dados, foram empregados três programas principais para a aplicação do método MTI-AG, desenvolvidos por Araújo (2003). O primeiro programa reproduz os cálculos hidráulicos das condições permanentes, quantificando as cargas nos nós e as vazões nos trechos. O segundo programa refere-se ao modelo hidráulico para o cálculo das cargas hidráulicas transientes por meio do Método das Características. O terceiro programa foi construído para o procedimento de otimização via Algoritmo Genético em

busca da identificação do nó que contém o vazamento e da quantificação da perda.

Os parâmetros do AG serão variados no código do terceiro programa na realização de cada teste. Os parâmetros a serem alterados são: Taxa de

Cruzamento (TC), Tamanho da População (NC), Taxa de Mutação (TM), Número de Gerações (NG) e Taxa de Elitismo (TE). Com essas variações nos mecanismos do AG, busca-se otimizar o programa afim de se minimizar erros absolutos entre resultados observados e simulados.

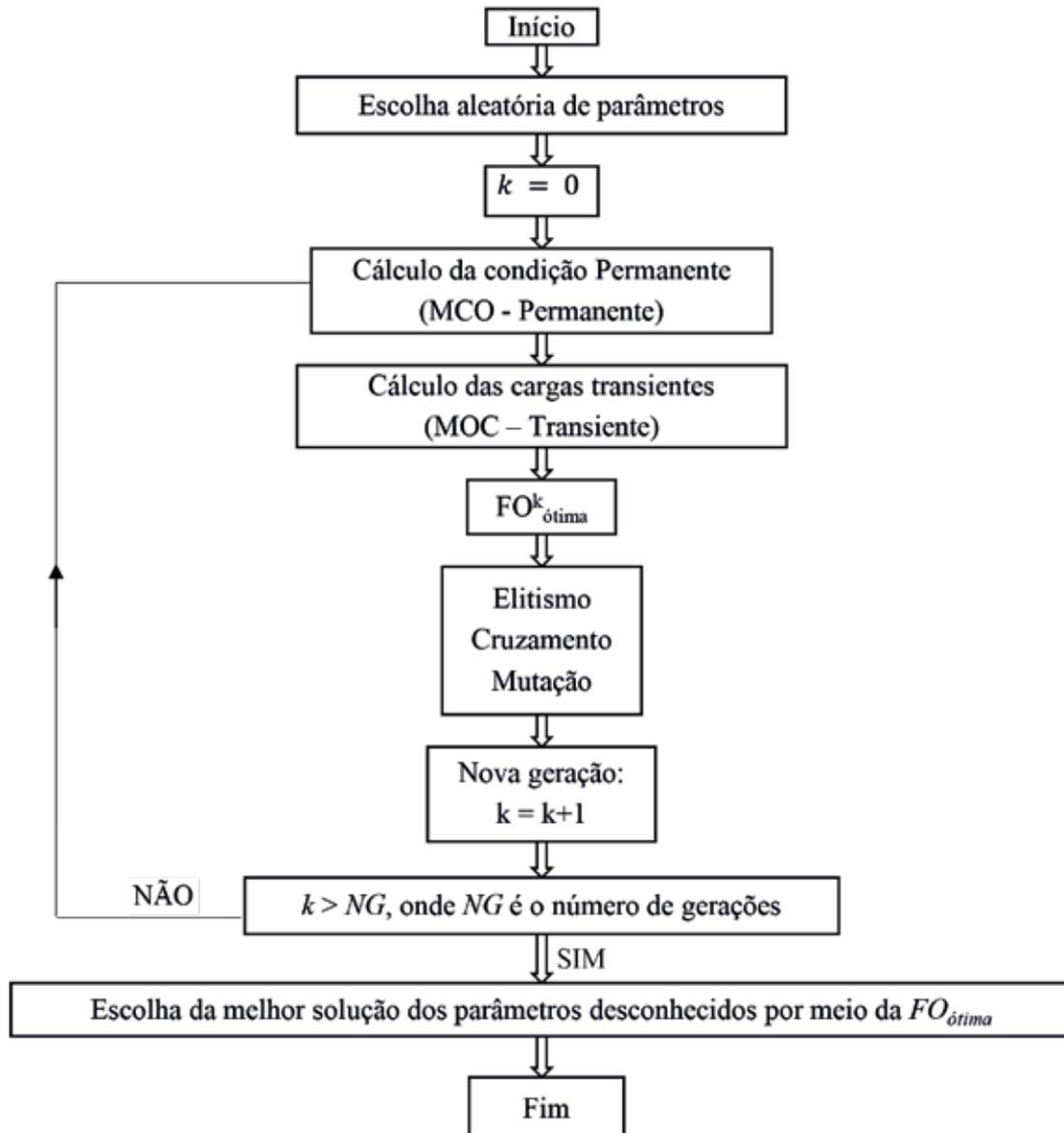


Figura 1 – Fluxograma do procedimento de calibração via MTI-AG.

Onde:  $k$  = Número da geração;  $FO_{ótima}^k$  = Função Objetivo ótima da geração  $k$ ;  $NG$  = número total de gerações; MOC = Método das Características;  $FO_{ótima}^k$  = Função Objetivo ótima de todo o procedimento.

### 5.1 Quantificação de Vazamentos

Neste trabalho, assume-se que os vazamentos ocorrem nos nós, tornando-se simplesmente demandas adicionais do sistema de distribuição de água. Fisicamente, um vazamento funciona como um orifício descarregando livremente na atmosfera. Desprezando a energia cinética no interior do tubo, o vazamento,  $Q_v$ , pode ser calculado pela equação do orifício, válida para orifícios em tubos rígidos:

$$Q_v = C_d A_v \sqrt{2g(H_v - z_v)} \quad (4)$$

Onde:  $C_d$  = coeficiente de descarga,  $A_v$  = área do orifício,  $H_v$  = carga hidráulica no nó do vazamento e  $z_v$  = cota do nó do vazamento.

Brunone e Ferrante (2004) comentam que os vazamentos influenciam em três aspectos na forma da onda de pressão. O primeiro deles acontece quando a onda de pressão atinge o ponto do vazamento. A reflexão produzida pode ser analisada por meio da observação da variação da pressão em determinada seção do tubo. O segundo efeito é a distorção nos picos de pressão depois do pico inicial, e o terceiro efeito, e último, é a redução na amplitude da variação de pressão depois que o pico de pressão inicial tenha ocorrido. Portanto, a presença de um vazamento pode ser detectada por meio da análise do primeiro sinal de pressão em determinado ponto do sistema, comparando-se as variações de pressão do conduto intacto e do mesmo conduto na presença de vazamento. Assim, quanto maior e mais rápida a mudança no estado do escoamento do sistema, mais abruptos serão os efeitos da onda de pressão e melhor será a detecção do vazamento.

### 5.2 Medida de Eficiência da Calibração

Para avaliar o grau de acerto na localização e magnitude de vazamento referente aos nós que contêm vazamento real, o Índice de Acerto (IA) pode ser escrito de acordo com a equação a seguir.

$$IA(\%) = \left\{ \left[ 1 - \frac{|Q_{v_i}^{real} - Q_{v_i}^{estimado}|}{Q_{v_i}^{real}} \right] \times 100 \right\} \quad (5)$$

Onde:  $Q_{v_i}^{real}$  = vazamento no nó  $i$ , em l/s e  $i$  = número do nó que contém vazamento real.

### 5.3 Aplicação do Modelo

Uma rede simples sintética de distribuição de água contendo cinco tubos, um reservatório de carga constante e cinco nós (Figura 2) foi utilizada para ilustrar o procedimento.

Supondo a inexistência de vazamentos e condições permanentes de escoamento, foram atribuídas a todos os cinco tubos da rede em questão as seguintes especificações: espessura da parede do tubo,  $e' = 10\text{mm}$ , coeficiente de Poisson,  $n = 0,25$ , módulo de elasticidade do material do tubo,  $E = 120\text{ GPa}$ , módulo de elasticidade da água,  $K = 2,19\text{ GPa}$ , e massa específica da água,  $r = 999\text{ kg/m}^3$ , rugosidade dos tubos,  $\epsilon = 0,3\text{mm}$ , fator de atrito,  $f = 0,3$ , Cota topográfica de  $0,00\text{m}$  para todos os nós. As condições iniciais (regime permanente) foram obtidas a partir de condições transientes usando o Método das Características.

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. Os números entre colchetes e parênteses referem-se aos nós e tubos, respectivamente. A Tabela 2 apresenta as características

físicas e as vazões iniciais. Os parâmetros dos tubos incluem o comprimento  $L$ , o diâmetro  $D$ , velocidades. Os nós estão na mesma cota topográfica (elevação igual a zero), e o nível da água do reservatório de nível fixo está na cota de 75,0 m.

Para todos os testes, foi definido tempo de duração do transiente de 20 segundos. Na rede sinté-

tica, o nó escolhido para apresentar o vazamento é o [2], com uma vazão de 16,5 L/s e seu  $C_d A_v$  correspondente é de 0,000429m<sup>2</sup>. O objetivo do AG é encontrar o valor do  $C_d A_v$ , que é o parâmetro desconhecido a ser calibrado. A combinação de valores dos parâmetros do AG que encontrar o valor mais próximo do real será a selecionada.

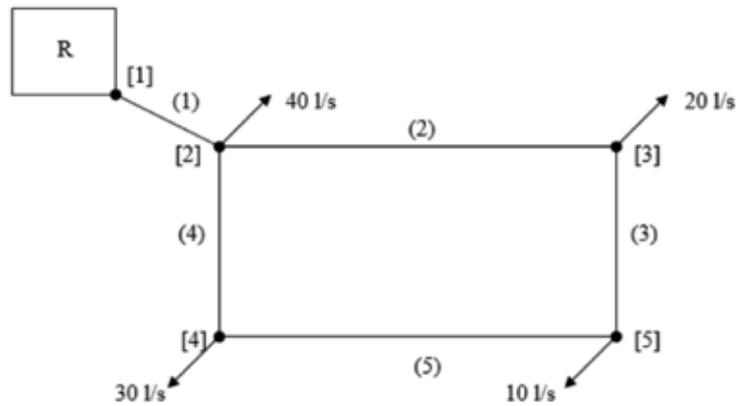


Figura 2 - Rede exemplo.

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

Nó	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Descrição do Nó
[1]	75,00	0,1000	Reservatório de carga constante
[2]	74,53	-0,0400	Demanda Constante
[3]	24,14	-0,0200	Demanda Constante
[4]	24,13	-0,0300	Demanda Constante
[5]	24,13	-0,0100	Demanda Constante

Tabela 2 – Características físicas dos tubos e vazões iniciais.

Tubo	Q <sub>inicial</sub> (m <sup>3</sup> /s)	L (m)	D (m)	vel. (m/s)
(1)	0,100	300	0,400	0,796
(2)	0,027	305	0,100	3,484
(3)	0,007	215	0,300	0,104
(4)	0,033	215	0,100	4,156
(5)	0,003	215	0,250	0,054

### 5.4 Manobra da Válvula

O nó 5 contém uma válvula reguladora, cuja manobra provoca o transiente na rede. Para se obter os dados transientes, uma manobra de fechamento de válvula foi simulada, representada pela

Figura 3 abaixo. De acordo com Araújo (2003), a caracterização da manobra de uma válvula é feita pela divisão entre o coeficiente de abertura (ou de fechamento) relativo, conhecido como *Tau*, pelo tempo.

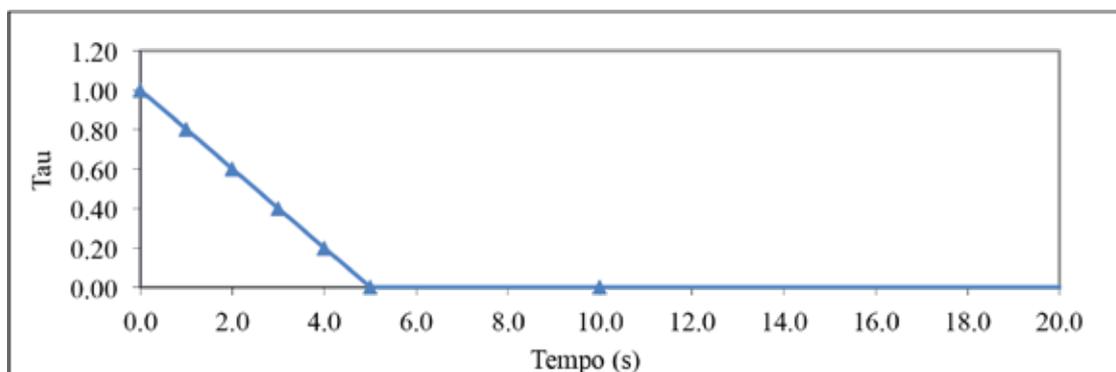


Figura 3 - Manobras executadas.

### 5.5 Configuração Geral do Algoritmo Genético

Como forma de se obter melhores soluções ao aplicar o código para identificação de vazamentos em redes de distribuição, alguns parâmetros do Algoritmo Genético serão variados, e outros serão mantidos. A Tabela 3 abaixo apresenta a relação de configurações escolhidas. Foram realizadas seis aplicações do método MTI-AG, caracterizadas a seguir. Em cada uma foi variado um operador do AG e mantidos fixos os demais operadores de acordo com uma configuração padrão inicial escolhida (Tabela 4).

- Aplicação 1: parâmetro Elitismo, variando de 0% a 100%, em intervalos de 10%, totalizando 11 casos;
- Aplicação 2: parâmetro Mutação, variando de 0% a 2%, em intervalos de 0,25%, totalizando 9 casos;
- Aplicação 3, 4: parâmetro Número de Gerações e Tamanho da População, variando de 10 a 100, em intervalos de 10, totalizando 20 casos;

- Aplicação 5: parâmetro Taxa de Cruzamento, variando de 10% a 100%, em intervalos de 10%, totalizando 10 casos;
- Aplicação 6: teste com os melhores parâmetros escolhidos em cada umas das seis aplicações anteriores.

Tabela 3 - Configuração utilizada no AG.

Representação dos parâmetros	Binária
Tamanho da população	Variado
Tipo de cruzamento	Aritmético
Probabilidade de cruzamento	Variada
Tipo de mutação	Uniforme
Taxa de ocorrência de mutação	Variada
Taxa de elitismo	Variada
Número de gerações:	Variado

Tabela 4 - Configuração padrão inicial.

Taxa de Elitismo	0%
Taxa de Mutação	0,5%
Taxa de Cruzamento	100%
Número de Gerações	20
Tamanho da População	20

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Aplicação 1: Taxa de Elitismo

Ao variar o elitismo entre 0% a 100%, podemos observar (Figura 4) que inicialmente há um aumento na eficiência do algoritmo, e que a partir de 50% ele tem sua precisão reduzida gradativamente. Essa redução se deve ao fato de que ao utilizar uma alta taxa de elitismo novas gerações

estão sendo compostas em sua maioria por indivíduos de gerações anteriores, dando uma pequena margem para a evolução atuar. É possível ver que o índice de acerto foi o maior quando utilizado um valor de 30% para o elitismo. Portanto, esse valor será selecionado. Nota-se também na Tabela 5 que o tempo de processamento não é afetado de maneira significativa ao se variar esse operador.

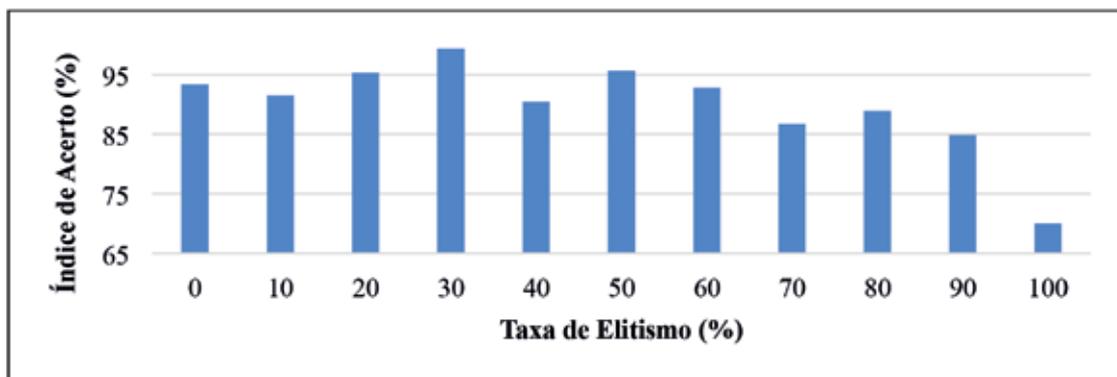


Figura 4 - Variação da Taxa de Elitismo e IA(%) correspondente.

Tabela 5 - Efeitos da variação da taxa de elitismo no IA(%) e no tempo de processamento.

Taxa de Elitismo (%)	$Q_{V(\text{real})}$ (L/s)	$Q_{V(\text{estimado})}$ (L/s)	$C_{D V(\text{real})}$	$CDAV_{(\text{estimado})}$	IA (%)	Tempo de Processamento (min)
0	16,5	15,41	0,000429	0,000403	93,4	8,90
10	16,5	17,9	0,000429	0,000468	91,5	9,04
20	16,5	17,3	0,000429	0,000452	95,4	9,08
30	16,5	16,4	0,000429	0,000429	99,4	9,00
40	16,5	18,1	0,000429	0,000473	90,5	9,04
50	16,5	17,2	0,000429	0,000450	95,7	9,06
60	16,5	15,3	0,000429	0,000400	92,9	9,18
70	16,5	14,3	0,000429	0,000374	86,8	9,24
80	16,5	14,7	0,000429	0,000384	88,9	9,18
90	16,5	19,0	0,000429	0,000497	84,9	8,97
100	16,5	21,5	0,000429	0,000562	70,0	8,92

### 6.2 Aplicação 2: Taxa de Mutação

A mutação é o elemento que traz diversidade para as gerações, fazendo com que elas não sejam tão dependentes da população inicial e que melhores resultados sejam alcançados. Apesar disso, quando muito alta, pode tornar as novas gerações demasiadamente aleatórias. A bibliografia indica que a taxa de mutação obtém seus melhores resultados quando entre 0,5% e 1,5%;

neste trabalho, ela foi variada entre 0% e 2%, e o resultado pode ser visto na Figura 5 e Tabela 6 a seguir. Com um valor de 2% de taxa de mutação, podemos observar uma queda muito acentuada na eficiência do código, assim como previsto na literatura. Percebe-se na Figura 5 que o maior IA ocorreu para  $TM = 1\%$ . Por esse motivo, esse valor será o selecionado. Pode-se observar também que o tempo de processamento não sofreu alterações relevantes.

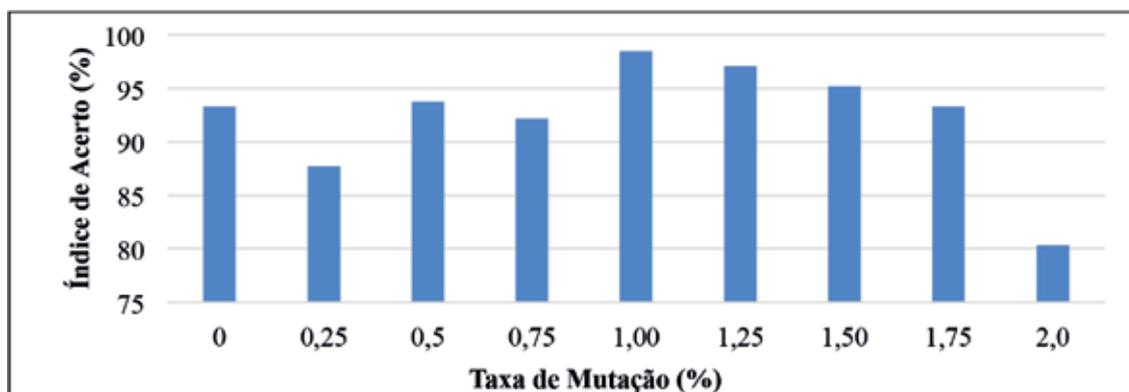


Figura 5 - Variação da Taxa de Mutação e IA(%) correspondente.

Tabela 6 - Efeitos da variação da taxa de mutação no IA(%) e no tempo de processamento.

Taxa de Mutação (%)	$Q_{V(\text{real})}$ (L/s)	$Q_{V(\text{estimado})}$ (L/s)	$C_{D^*V(\text{real})}$	$CDAV_{(\text{estimado})}$	IA (%)	Tempo de Processamento (min)
0	16,5	15,4	0,000429	0,000403	93,3	8,94
0,25	16,5	14,5	0,000429	0,000378	87,7	9,07
0,5	16,5	17,5	0,000429	0,000458	93,8	8,93
0,75	16,5	15,2	0,000429	0,000398	92,2	8,95
1,00	16,5	16,7	0,000429	0,000438	98,5	8,95
1,25	16,5	17,0	0,000429	0,000444	97,1	8,96
1,50	16,5	15,7	0,000429	0,000411	95,2	9,03
1,75	16,5	15,4	0,000429	0,000403	93,3	9,48
2,0	16,5	19,8	0,000429	0,000516	80,3	8,93

### 6.3 Aplicação 3: Número de Gerações

O número de gerações é o critério de parada do algoritmo. Pela teoria da evolução, quanto maior for esse número, melhores serão seus indivíduos e, nesse caso, melhores serão as soluções. Esse fenômeno foi observado nos testes realizados (Figura 6), entretanto o fator tempo de processamento também aumentou consideravelmente. A rede aqui estudada é composta de apenas 5 nós, e ainda assim, ao colocar o algoritmo para rodar por 90 ou 100 gerações, o tempo de processamento

foi maior que 40 minutos (Tabela 7). Para uma rede real de distribuição de água, esse valor aumentaria demasiadamente e seria inviável utilizar-se do algoritmo genético para identificação dos vazamentos.

O critério de parada de 50 gerações obteve um resultado consideravelmente bom em aproximadamente a metade do tempo, e por essa razão será selecionado. Para redes maiores, os valores de 30 e 40 gerações também podem ser utilizados caso necessite-se de resultados mais rápidos.

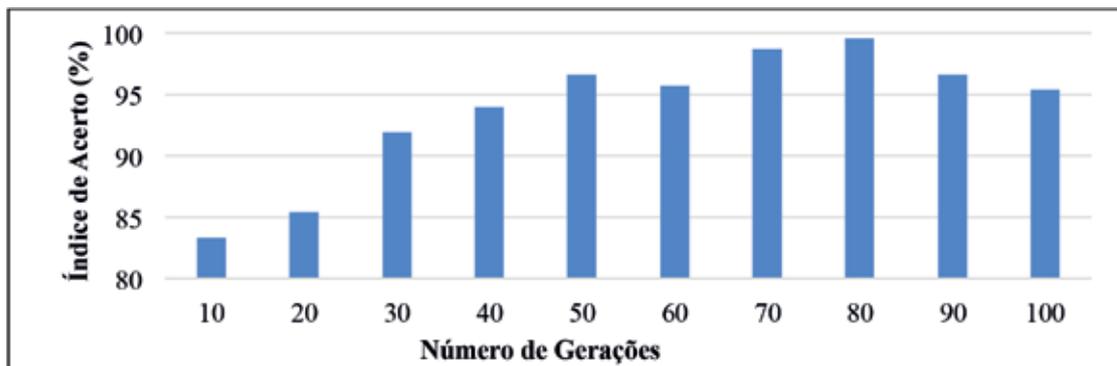


Figura 6 - Variação do número de gerações e IA(%) correspondente.

Tabela 7 - Efeitos da variação do número de gerações no IA(%) e no tempo de processamento.

Número de gerações	$Q_{V(\text{real})}$ (L/s)	$Q_{V(\text{estimado})}$ (L/s)	$C_{D V(\text{real})}$	$C_{DAV}$ (estimado)	IA (%)	Tempo de Processamento (min)
10	16,5	13,7	0,000429	0,000359	83,3	4,48
20	16,5	14,1	0,000429	0,000368	85,4	8,95
30	16,5	17,8	0,000429	0,000466	91,9	13,22
40	16,5	15,5	0,000429	0,000406	94,0	18,94
50	16,5	17,1	0,000429	0,000446	96,6	23,75
60	16,5	17,2	0,000429	0,000450	95,7	27,07
70	16,5	16,3	0,000429	0,000426	98,7	31,13
80	16,5	16,4	0,000429	0,000430	99,6	36,40
90	16,5	17,1	0,000429	0,000446	96,6	40,16
100	16,5	17,3	0,000429	0,000451	95,4	44,70

### 6.4 Aplicação 4: Tamanho da População

Assim como no parâmetro de número de gerações, o tamanho da população também afeta fortemente o tempo de processamento, como pode-se observar na Tabela 8, sendo este um fator a ser incluído na escolha do valor ideal a ser adotado. Quanto maior a população, maior a chance de um ou mais de seus indivíduos serem aptos e transmitirem seus genes para gerações seguintes. Isso pode ser visualizado nos testes efetuados (Figura 7).

Como deve-se ter em mente que o modelo poderá ser utilizado posteriormente em redes de larga escala, recomenda-se que um valor intermediário de tamanho de população seja escolhido. E já que o número de gerações escolhido foi relativamente alto (50 gerações), o valor aqui escolhido será de 40 indivíduos em cada população, com 91,2% de índice de acertos e um tempo de processamento de 17,95 minutos.

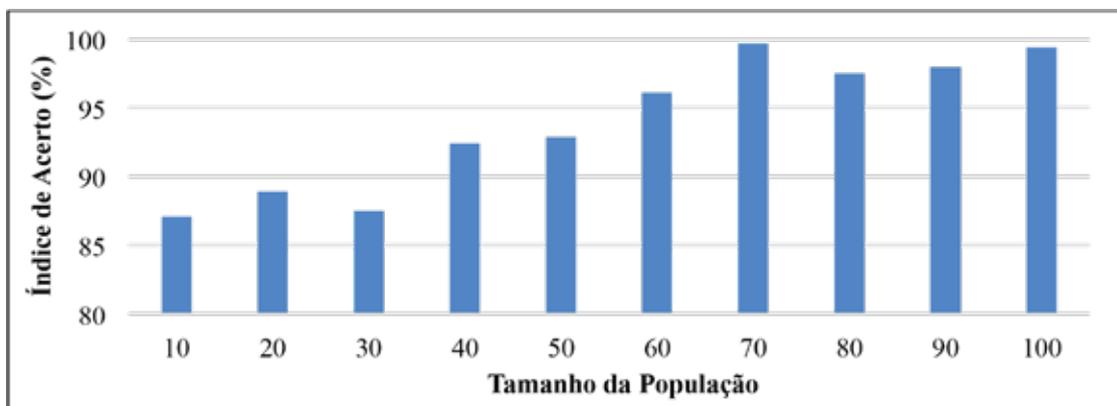


Figura 7 - Variação do tamanho da população e IA(%) correspondente.

Tabela 8 - Efeitos da variação do tamanho da população no IA(%) e no tempo de processamento.

Tamanho da população	$Q_{V(\text{real})}$ (L/s)	$Q_{V(\text{estimado})}$ (L/s)	$C_{D V(\text{real})}$	$CDAV_{(\text{estimado})}$	Índice de acerto (%)	Tempo de Processamento (min)
10	16,5	14,4	0,000429	0,000376	87,1	4,46
20	16,5	15,2	0,000429	0,000399	92,4	8,94
30	16,5	18,6	0,000429	0,000485	87,5	13,34
40	16,5	15,0	0,000429	0,000394	91,2	17,95
50	16,5	17,7	0,000429	0,000462	92,9	22,52
60	16,5	15,9	0,000429	0,000448	96,1	27,16
70	16,5	16,5	0,000429	0,000430	99,7	31,40
80	16,5	16,1	0,000429	0,000421	97,5	36,05
90	16,5	16,8	0,000429	0,000440	98,0	40,39
100	16,5	16,6	0,000429	0,000434	99,4	48,65

### 6.5 Aplicação 5: Taxa de Cruzamento

Sabe-se que quanto maior a probabilidade de crossover, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população devido à recombinação genética. Entretanto, caso essa taxa seja alta demais, é possível que estruturas de boa qualidade sejam descartadas rapidamente também. Quando uma baixa taxa de cruzamento é utilizada, o algoritmo pode demorar demasiadamente a encontrar uma solução satisfatória, pois a busca tende a se tornar aleatória.

Ao rodar os testes, não foi possível identificar o comportamento previsto pela literatura. Na Figura 8 pode-se observar bons resultados com

valores de 10 e 20%, que são considerados baixas taxas de crossover e também bons resultados com 50, 60 e 70%. Já o tempo de processamento permaneceu similar em todos os testes, como se observa na Tabela 9.

Linden (2008) afirma que existe na literatura uma tendência de se usar valores complementares entre taxa de cruzamento e elitismo (crossover % = 100% - elitismo%). De forma a garantir a não aleatoriedade do algoritmo, os valores foram de 10% e 20%. O valor de 70% (100% - 30%) para o parâmetro de taxa de mutação foi selecionado para prosseguimento do teste final com os melhores parâmetros.

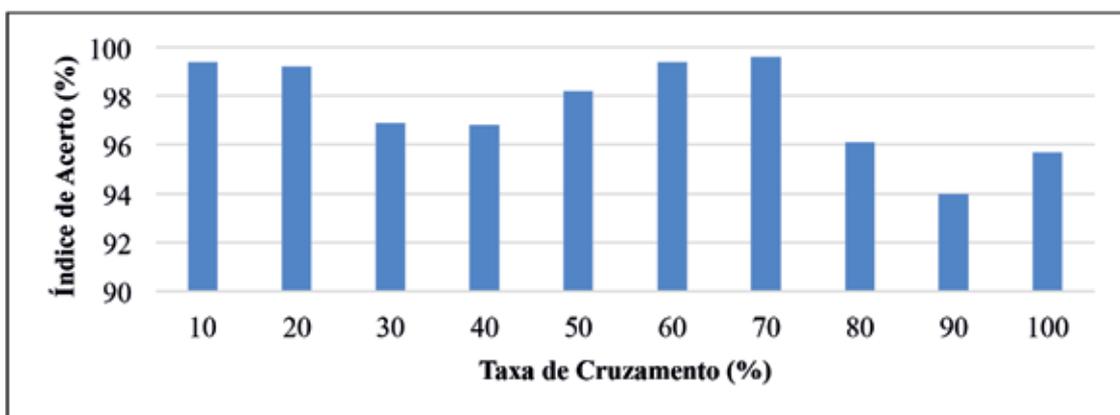


Figura 8 - Variação do taxa de cruzamento e IA(%) correspondente.

Tabela 9 - Efeitos da variação da Taxa de Cruzamento no IA(%) e no tempo de processamento.

Taxa de cruzamento (%)	$Q_{V(\text{real})}$ (L/s)	$Q_{V(\text{estimado})}$ (L/s)	$C_{D_{V(\text{real})}}$	CDAV (estimado)	Índice de acerto (%)	Tempo de Processamento (min)
10	16,5	16,40	0,000429	0,000429	99,4	8,93
20	16,5	16,43	0,000429	0,000430	99,6	8,94
30	16,5	16,68	0,000429	0,000436	98,9	8,97
40	16,5	15,97	0,000429	0,000418	96,8	8,97
50	16,5	16,80	0,000429	0,000439	98,2	8,91
60	16,5	16,63	0,000429	0,000435	99,2	9,11
70	16,5	16,38	0,000429	0,000428	99,3	9,38
80	16,5	15,86	0,000429	0,000415	96,1	8,95
90	16,5	17,49	0,000429	0,000457	94	8,61
100	16,5	15,79	0,000429	0,000450	95,7	8,91

## 6.6 Aplicação 6: Teste com os melhores parâmetros

Após fazer uma análise das variações dos índices de acerto conforme cada parâmetro era alterado, os melhores resultados foram selecionados para compor uma composição supostamente ideal. Os valores selecionados encontram-se na Tabela 10 abaixo. Ao rodar o programa com tal configuração, o índice de acerto obtido foi de 99,9%. O  $C_d A_v$  real definido era de 0,000429m<sup>2</sup> e o  $C_d A_v$  encontrado foi de 0,000428m<sup>2</sup>. Apesar da ótima precisão, o programa levou 46,8 minutos para chegar a esse resultado em uma pequena rede com 5 nós.

**Tabela 10** - Melhores parâmetros encontrados.

Taxa de Elitismo	30%
Taxa de Mutação	1%
Número de Gerações	50
Tamanho das Populações	40
Taxa de Cruzamento	70%

## 7 CONCLUSÕES

O Algoritmo Genético neste trabalho apresentou grande potencial para mitigar o problema da inexistência de mecanismos eficientes de monitoramento de sistemas hidráulicos. Ele vem se destacando nos últimos anos ao ser aplicado em diversos problemas na área de Engenharia Hidráulica. No presente trabalho, seu desempenho foi testado e constatou-se sua eficácia na identificação e quantificação de vazamentos em redes de distribuição de água. Entretanto, seu tempo de processamento pode ser um elemento limitador de seu uso.

Ao aumentar o tamanho da população, um aumento na precisão do algoritmo pode ser verificado, mas seu tempo de processamento cresce proporcionalmente de forma linear. Mesmo sabendo que valores maiores proporcionariam maior precisão, o tamanho de população igual a 40 foi selecionado, já que apresentou um resulta-

do satisfatório no teste final com baixo tempo de processamento. O mesmo ocorre com o número de gerações quanto ao tempo de processamento e precisão, o valor de 50 gerações foi selecionado, mas de acordo com os dados apresentados nos resultados, um valor de 30 já traria resultados suficientemente bons. Os outros parâmetros (taxa de mutação, elitismo e cruzamento) não demonstraram variações significantes no tempo de resposta. A taxa de mutação de 1% apresentou a melhor solução.

A taxa de elitismo garante que indivíduos considerados extremamente aptos de uma geração permaneçam existentes na geração seguinte. Foi identificado um aumento padrão na precisão à medida em que se crescia o elitismo até um certo ponto (50%), quando então os valores começam a decair, uma vez que as gerações vão se tornando demasiadamente similares e há perda na variabilidade. O valor de 30% demonstrou ser a melhor opção.

Paralelamente ao elitismo e de forma inversa, a taxa de cruzamento garante a variabilidade dos indivíduos, trazendo novas combinações nas gerações seguintes. Entretanto, valores muito altos poderiam descartar bons indivíduos de gerações anteriores. Existe na literatura uma tendência de se usar na taxa de cruzamento um valor de 100% menos taxa de elitismo; portanto, apesar de seu comportamento ter sido um tanto quanto casual, o valor de 70% foi selecionado.

Pode-se concluir que a definição da configuração geral do AG, na qual se atribuem valores para os parâmetros de calibração do método, é uma etapa importante e deve ser analisada com cuidado antes de iniciar as simulações, pois cada parâmetro exerce influência na eficiência dos resultados. Foi possível identificar quais os valores mais adequados para cada operador na calibração de vazamentos em redes hidráulicas e chegar na melhor configuração para o caso analisado.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- ARAÚJO, J. K.; CHAUDHRY, F. H. Calibração de Redes Hidráulicas com Dados Transientes de Precisão Variável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n.1, p. 55-66. 2004.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016. 212 p.
- BRUNONE, B.; FERRANTE, M. Pressure Waves as a Tool for Leak Detection in Closed Conduits. **Urban Water Journal**, v. 1, n. 2, p. 145-155, 2004.
- CHAUDHRY, M. H. **Applied hydraulic transients**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1987. 521p.
- COVAS, D. I. C. **Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems Modelling Special Dynamic Effects**. PhD Thesis – Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK. 2003.
- COVAS, D.; RAMOS, H.; BRUNONE, B.; YOUNG, A. Leak Detection in Water Trunk Mains using Transient Pressure Signals: Field Tests in Scottish Water. In: **9<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges**, Chester, UK, Vol. 1, Ed. Murray, S. J., Pub. BHR Group Ltd., Bedfordshire, UK, p. 185-198. (2004)
- DARWIN, C. **A Origem das Espécies**. São Paulo: Hemus Livraria Editora Ltda., 2002.
- DO, N. C.; SIMPSON, A. R.; DEUERLEIN, J. W.; PILLER, O. Calibration of water demand multipliers in water distribution systems using Genetic Algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 11, nov. 2016.
- GAMBALE, Sérgio Ricardo. **Aplicação de Algoritmo Genético na Calibração de Redes de Água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Hybrid GA for Calibration of Water Distribution Hydraulic Models. **Proceedings of the 2002 Conference on Water Resources Planning and Management**, Roanoke, Virginia, USA. 2002.
- KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. A Hybrid Inverse Transient Model for Leakage Detection and Roughness Calibration in Pipe Networks. **Journal of Hydraulic Research**, v. 41, n. 5, p. 481-492. 2003.
- KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Incorporation of Prior Information on Parameters in Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Roughness Calibration. **Urban Water Journal**, v. 1, n. 2, p. 129-143. 2004.
- LINDEN, Ricardo. **Algoritmos Genéticos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008. 402p.
- 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.
- SAMPAIO, A. S. **Avaliação do operador Elitismo na detecção de vazamentos em rede de distribuição de água utilizando o Método Transiente Inverso e Algoritmo Genético**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2018.
- SANTOS, A. C. N.; SILVA, F. G. B. Estudo de Calibração de Rugosidades em Rede de Distribuição de Água do Bairro Jardim América - MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, V. 18, n. 3, p. 261-269, 2013.
- SOARES, A. K. **Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos, SP, 2007.
- VASCONCELOS, G. C. M. P.; COSTA, B. C. A.; ARAÚJO, J. K. 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. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 980 – 990, 2015.
- VÍTKOVSKÝ, J. P.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. (2000). Leak Detection and Calibration Using Transients and Genetic Algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 126, n. 4, p. 262-265, July/Aug.
- VÍTKOVSKÝ, J. P.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Minimization Algorithms and Experimental Inverse Transient Leak Detection. **Proceedings of the 2002 Conference on Water Resources Planning and Management**, Roanoke, Virginia. 2002.
- WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. **Fluid transients**. New York: McGraw-Hill, 1978, 384p.