

**IV-063 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE INDIVÍDUOS DA POPULAÇÃO NA QUALIDADE DA CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DE RUGOSIDADES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE UTILIZANDO A FERRAMENTA CARTAG.**

**Paula Nobre de Andrade<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Ceará. Mestra em Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA/UFC). Professora dos Cursos de Engenharia Civil, Engenharia de Produção e Arquitetura e Urbanismo do Centro Universitário Christus.

**Italo Ruan Dantas Ferreira<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará. Mestrando em Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA/UFC).

**John Kenedy de Araújo<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade de Fortaleza. Mestre em Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA/UFC). Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Professor Associado da Universidade Federal do Ceará.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Engenheiro Santana Júnior, 333 - Papicu - Fortaleza - CE - CEP: 60192-205 - Brasil - Tel: (85) 3181-4625 - e-mail: [paulanobreandrade@gmail.com](mailto:paulanobreandrade@gmail.com)

**RESUMO**

A simulação das condições de equilíbrio hidráulico de uma rede de distribuição é uma das principais etapas na análise técnica de sistemas de abastecimento de água. Para que os modelos simuladores reproduzam com fidelidade o escoamento do fluido na rede, é fundamental que os parâmetros do sistema sejam identificados com precisão. Considerando o coeficiente de resistência das tubulações como a variável de maior dificuldade de determinação devido à sua característica dinâmica, é desenvolvida uma rotina computacional para calibração da rugosidade absoluta de redes de distribuição, utilizando o método dos algoritmos genéticos como técnica de otimização. O modelo de calibração proposto permite a escolha de parâmetros de cálculo dos algoritmos genéticos, possibilitando uma análise comparativa entre métodos de substituição de indivíduos, operadores de seleção, mutação e recombinação (crossover), bem como uma avaliação da influência da quantidade de indivíduos da população inicial na qualidade das soluções encontradas. Os resultados da calibração realizada apontam os dados esperados de rugosidade. Diante disso, conclui-se que os resultados alcançados na calibração se aproximam da realidade à medida em que o escoamento é mais turbulento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Calibração, Rugosidade, Redes de distribuição de água, Algoritmos genéticos.

**INTRODUÇÃO**

O transporte de água ao ponto de consumo é uma preocupação recorrente desde as civilizações antigas de Roma, Grécia, Egito e etc, onde se tem conhecimento da construção de aquedutos para distribuição de água para a população por meio de cisternas, tanques, banhos públicos, entre outros.

Os sistemas evoluíram e se adequaram às civilizações ascendentes. Com esse processo de evolução, os condutos livres foram substituídos gradativamente por tubulações sob pressão, as redes ramificadas foram transformadas em malhas e passou-se a inserir equipamentos nas redes para melhorar o controle de operação. Com base nessa crescente, pode-se definir uma rede de distribuição de água como um conjunto de tubulações, conexões, válvulas, registros, bombas e reservatórios, cujo objetivo é o abastecimento das unidades de consumo por meio de ramais de ligação.

O aumento populacional e o desenvolvimento industrial das últimas décadas ocasionaram o aumento da demanda, o que tornou as estruturas das redes hidráulicas mais complexas e vem exigindo análises mais acuradas do comportamento hidráulico nos sistemas de distribuição.

Para que se tenha um estudo mais eficaz das redes de distribuição de água, faz-se uso de simulações que auxiliam na elaboração de projetos e na operação, fornecendo dados e resultados indicadores da capacidade do sistema em atender ou não à demanda solicitada em condições adequadas de pressão.

As condições de equilíbrio hidráulico são dependentes de parâmetros que identificam as características do fluido transportado (peso específico e viscosidade cinemática), da geografia da região do sistema (cota e demanda nos nós), dos aspectos físicos do sistema de distribuição (comprimento, diâmetro e rugosidade) e dos tipos de conexões existentes.

Calibração é o processo de identificação dos parâmetros necessários para que a simulação hidráulica de redes de distribuição represente rigorosamente o comportamento do sistema. Considerando-se a grande quantidade de variáveis envolvidas na análise de sistemas de abastecimento de água, a precisão com que as mesmas são obtidas é um fator determinante para a confiabilidade dos modelos hidráulicos.

O peso específico ( $\gamma$ ) e a viscosidade cinemática ( $\nu$ ) do fluido são variáveis identificadas experimentalmente com resultados consolidados disponibilizados em manuais de hidráulica. Para a determinação das cotas nos nós, utiliza-se o levantamento topográfico e a restituição aerofotogramétrica da região. O comprimento ( $L$ ) e o diâmetro ( $D$ ), assim como as conexões existentes, da tubulação podem ser obtidos por planta cadastral.

As demandas nodais podem ser determinadas pelo sistema de micromedição das unidades consumidoras, porém, esses dados são imprecisos devido ao volume de água não computado – referente a vazamentos, consumo operacional, sub-medição dos hidrômetros e ligações clandestinas. A simplificação em admitir os consumos pontualmente nos extremos de montante e jusante de cada trecho, quando os pontos de consumo estão distribuídos ao longo da rede. Em macro-sistemas adutores de água, os consumos dos nós podem ser obtidos através de macromedidores instalados nos pontos onde as linhas de adução alimentam os sistemas de distribuição.

Segundo Zahed Filho (1990), a rugosidade é o parâmetro mais difícil de ser identificado dentre os parâmetros necessários à reprodução do comportamento hidráulico, pois a sua característica dinâmica exige um levantamento abrangente e contínuo sobre todo o sistema. Assim, o cálculo da rugosidade em redes de distribuição se torna complexo devido às incertezas dos dados de demanda nodal associada ao grande número de pontos de consumo e à relevante quantidade de peças e conexões que ocasionam perdas localizadas. Essa situação gera a necessidade da calibração simultânea das rugosidades dos tubos e dos consumos nos nós em redes de distribuição.

A rugosidade da tubulação é o parâmetro de rede de distribuição decisivo para análise do sistema, pois é fator determinante para identificação de trechos críticos que demandem serviços como limpeza, desobstrução ou substituição. Tendo essa necessidade de se ter dados válidos de rugosidades, foi desenvolvido o programa de Calibração Automática de Rugosidades de Tubulações por Algoritmos Genéticos – CARTAG, que pode ser aplicado a qualquer rede de distribuição e fornece dados consistentes para avaliação dos parâmetros e operadores de cálculo dos algoritmos genéticos.

Algoritmo Genético é a técnica de busca estocástica da melhor solução para um determinado problema, que está firmado no conjunto de regras e operações fundamentadas no princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, apresentado pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin. Segundo o processo de seleção natural descrito por DARWIN (1859), quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes.

A ideia de implementar a teoria da evolução das espécies como um possível método de otimização de problemas nos campos das engenharias vem desde as décadas de 1950 e 1960. Esse método foi introduzido em 1975 por John Holland, enquanto criava as primeiras bases teóricas para a aplicação em conjunto a métodos computacionais não com a pretensão de encontrar a solução de problemas específicos, mas sim de uma gama de fenômenos adaptativos que ocorrem na natureza. Segundo Araújo (2003) Holland apresentou as bases teóricas de aplicação do método tendo como referência a evolução biológica.

A ferramenta Algoritmo Genético trabalha com uma população inicial de cromossomos que é gerada aleatoriamente ou de acordo com os dados obtidos. Dependendo do caso, esses cromossomos representam possíveis soluções do problema em estudo. Para que ocorra uma hierarquização da população em relação à qualidade de ser solução do problema, uma nota ou “aptidão” é dada a cada cromossomo. Normalmente aqueles mais aptos são os selecionados deixando os menos aptos desaparecerem. Após a seleção, podem ocorrer processos de *crossover* e mutação, que são os responsáveis pela variabilidade genética da população e permitem a criação dos indivíduos da geração seguinte. Este processo se repete até o encontro de uma solução satisfatória (GALVÃO *et al.*, 1999).

Uma grande quantidade trabalhos que utilizam AGs em problemas de recursos hídricos mostram a habilidade dos mesmos em obter soluções melhores que as dos métodos convencionais. Araújo (2003) cita alguns mais importantes, a aplicação dos AGs para obtenção do ótimo global para problema de projeto em redes hidráulicas por Simpson *et al.* (1994) e Savic e Walters (1997). Trabalhando com problemas de grande complexidade e com similaridade ao mundo real, Ritzel (1994) enfatizou a importância do AG perante a sistemas de otimização convencionais. Cieniawski *et al.* (1995) estudaram um problema de monitoramento multi-objetivo em água subterrânea usando AGs e dois objetivos, maximização da confiabilidade e minimização de áreas contaminadas, afirmando que a solução obtida tem uma vantagem sobre aproximações multi-objetivo tradicionais pois pode gerar tanto pontos convexos como não-convexos, acomodar não-linearidade nas duas funções objetivo, encontrar vários pontos Pareto ótimo em uma simples iteração. Gambale (2000) aplicou a técnica dos algoritmos genéticos à calibração dos coeficientes de rugosidades de redes hidráulicas em regime permanente. Simpson *et al.* (2000) usaram o AG na calibração das rugosidades dos tubos sob condições transientes em um sistema de distribuição de água.

Kondageski (2008) cita uma aplicação feita por Park *et al.* (2006) que integra os algoritmos genéticos e um sistema de informações geográficas (SIG) com a finalidade de maximizar a alocação ótima de estações de monitoramento de qualidade de água na bacia do Nakdong, Coreia. Foi mostrado pelos resultados que a configuração atual das estações está aquém da otimizada pelo AG como também que a melhoria na função-objetivo decresce com a aproximação do ponto ótimo.

Costa *et al.* (2010) comenta que o AG possui uma grande flexibilidade no estudo do espaço de busca além de permitir facilmente sua conectividade com modelos de simulação, sendo esses uns dos principais motivos para a existência de inúmeros trabalhos no Brasil que utilizam o AG como ferramenta de otimização.

Sendo os AGs uma metáfora da seleção natural das espécies, a terminologia empregada está diretamente ligada àquela utilizada na biologia. Os termos aqui utilizados e presentes na literatura são (GALVÃO *et al.*, 1999):

- Cromossomo e genoma: representam um ponto de resposta no espaço de busca da solução;
- Gene: um parâmetro codificado no cromossomo;
- Indivíduo: o conjunto feito pelo cromossomo e a sua aptidão;
- Genótipo: representação da informação contida no cromossomo;
- Fenótipo: é o cromossomo decodificado, ou seja, a representação da estrutura construído a partir das informações do genótipo.
- Alelo: no caso dos AGs representa os valores que o gene pode assumir;
- Epistasia: ocorre quando um gene interfere no valor de outro gene.

O processo de seleção dos cromossomos que serão responsáveis pela geração de filhos se dá de acordo com a aptidão. Normalmente esse parâmetro é calculado para cada cromossomo de acordo com a função objetivo, segundo Araújo (2003) a função objetivo representa uma característica que desejamos otimizar, logo aqueles que possuem grande aptidão terão as maiores chances de contribuir para a formação de filhos da geração futura.

Em algumas alternativas de processo de seleção a utilização da aptidão como mostrada anteriormente pode apresentar problemas devido ao fato da mesma vir a ter valores negativos. Pode-se ver isso no algoritmo *Roda de Roleta* que não aceita aptidões abaixo de zero, Galvão *et al.* (1999) comenta que podemos contornar o problema utilizando outras alternativas como a *Seleção por Torneio*, em que  $n$  cromossomos são escolhidos aleatoriamente e com probabilidade iguais e aquele que possuir maior aptidão é escolhido, ou ainda o *Ordenamento* em que é dado um certo valor de aptidão a um cromossomo e zero a outro e todos os outros serão interpolados linearmente entre os dois iniciais.

De acordo com Araújo (2003) outra importante forma de seleção foi proposta em 1975 por DeJong e se chama *Elitismo*, nesse processo os cromossomos que parecem ter mais chances de possuir a solução do problema são automaticamente guardados para a próxima geração sem ter que passar por outros processos, essa alternativa visa principalmente que as melhores soluções não se percam, o autor ainda comenta que esse processo visa o aprimoramento do desempenho do AG.

O operador *crossover* ou cruzamento é o responsável pela criação da geração nova de cromossomos, esse processo é de grande importância uma vez que sem ele os filhos seriam sempre iguais aos pais. Essa etapa é aplicada aos cromossomos que foram anteriormente selecionados estão localizados em uma população intermediária, existe uma probabilidade de aplicação de cruzamento que segundo Galvão *et al.* (1999) gira em torno de 60% a 90% e essa taxa é importante para a preservação de algumas soluções presente em gerações anteriores. Existem vários métodos de cruzamentos, basicamente eles dividem a sequência do cromossomo em dois e estas são trocadas entre os pais, assim formam-se dois filhos com uma sequência genética nova. Cada tipo de representação, real ou binária, possuem um grande número de métodos de *crossover*, que podem ser de divisão de cadeia, aritméticos ou outros.

O processo de mutação ocorre após a criação dos filhos, nessa o operador age com determinada probabilidade em cada bit de cada filho, com essa probabilidade girando em torno de 0,1% a 5%, assim se caso for selecionado o bit muda de valor. A aplicação desse método é importante para garantir a diversidade da população, porém possui a característica de destruir informações, por isso a aplicação de uma probabilidade baixa (ARAÚJO, 2003).

Os cromossomos podem ser representados tanto como binários ou como reais. A representação binária mostra sua importância histórica por estar presente nos primeiros estudos do assunto e por possuir uma facilitação de manipulação e utilização. Alguns problemas enfrentados pela representação binária está o fato de se tornar muito grande quando tratar de parâmetros contínuos se desejarmos grandes precisões.

A representação real se mostra mais precisa e ocupa menor memória além de ser melhor compreendida pela mente humana, alguns estudos foram feitos e muitos deles têm se mostrados mais favoráveis à representação real quando comparada à binária. Para cada uma das duas escolhas existem diferentes tipos de operadores de cruzamento e mutação, porém para a opção real temos mais opções e uma maior facilidade de criação de novas operações.

Galvão *et al.* (1999) comenta alguns dos critérios de parada utilizados nas análises de AGs:

- Quando atingirmos um referido número de gerações ou ciclos;
- Se conhecermos o valor ótimo da função objetivo, paramos ao alcançá-lo;
- Ou quando ocorrer convergência, isto é não existir melhoramento significativo da solução encontradas entre gerações;
- Em relação à convergência, se 90% da população tem um mesmo valor para o gene ou se 90% a 95% dos genes convergirem consideramos que o conjunto (AG) convergiu.

Existem alguns métodos de otimização que são bastante utilizados, porém que não se mostram eficientes para alguns tipos de problema. Podemos citar alguns como o *Gerar e Testar*, *Métodos Analíticos* e o *Subida de Encosta*, esses métodos possuem as vantagens e desvantagens, assim como os AGs. O último é bastante utilizado em problemas mais complicados de otimização em que os outros métodos citados falham. Algumas vantagens dos AGs listadas por Galvão *et al.* (1999) são apresentadas a seguir:

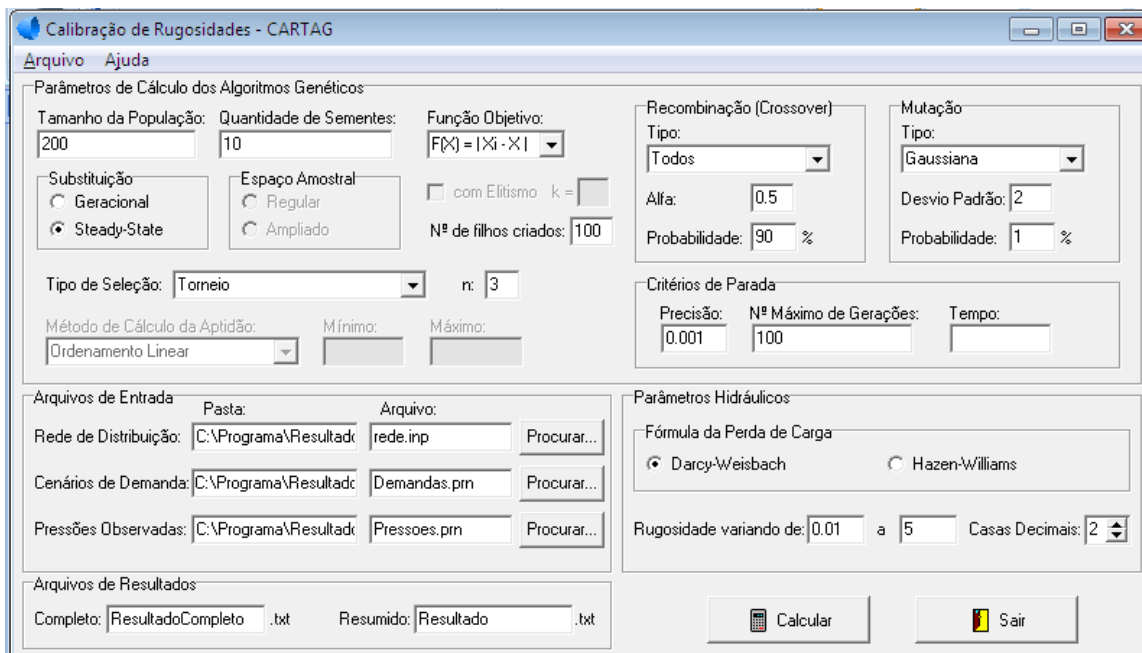
- A possibilidade de utilizar tanto parâmetros contínuos ou discretos ou mesmo uma combinação dos dois;
- Por trabalharem com uma população e não um ponto realizam buscas em várias regiões do espaço;
- Um conhecimento matemático muito profundo do problema não se mostra necessário;
- São capazes de otimizar um grande número de variáveis;
- Podem trabalhar com dados gerados experimentalmente;
- Possuem facilidade para ser implementadas em computadores;
- Capazes de trabalhar com a otimização de múltiplas funções, mesmo com objetivos conflitantes.

Os Algoritmos Genéticos possuem a desvantagens de se mostrarem bastantes lentos em sua busca pela otimização quando comparados a outros métodos. Os operadores de cruzamento e mutação se mostram de suma importância no método para evitar uma convergência prematura, um dos problemas ligados ao AG, quando uma solução é encontrada, mas na realidade ela ainda não é a melhor, sendo a taxa de mutação o principal meio de evitar isso.

O modelo, denominado CARTAG – Calibração Automática de Rugosidades de Tubulações por Algoritmos Genéticos, foi desenvolvido em linguagem DELPHI 7.0.A Figura 1, a seguir, representa a interface do aplicativo. Na concepção do programa, alguns aspectos dos Algoritmos Genéticos foram considerados invariáveis. Outro aspecto inerente ao aplicativo é a metodologia adotada para a geração da população inicial com a finalidade de melhorar a representação do espaço de busca, onde a primeira metade é gerada aleatoriamente e a segunda metade a partir da primeira, invertendo a posição dos cromossomos no espaço de busca conforme a equação (1).

$$\text{indivíduo}_{N/2 + 1} = b_i - \text{indivíduo}_i + a_i \quad \text{equação (1)}$$

Onde  $a_i$  e  $b_i$  são respectivamente os limites inferior e superior do intervalo permitido e  $N$  o tamanho da população inicial.



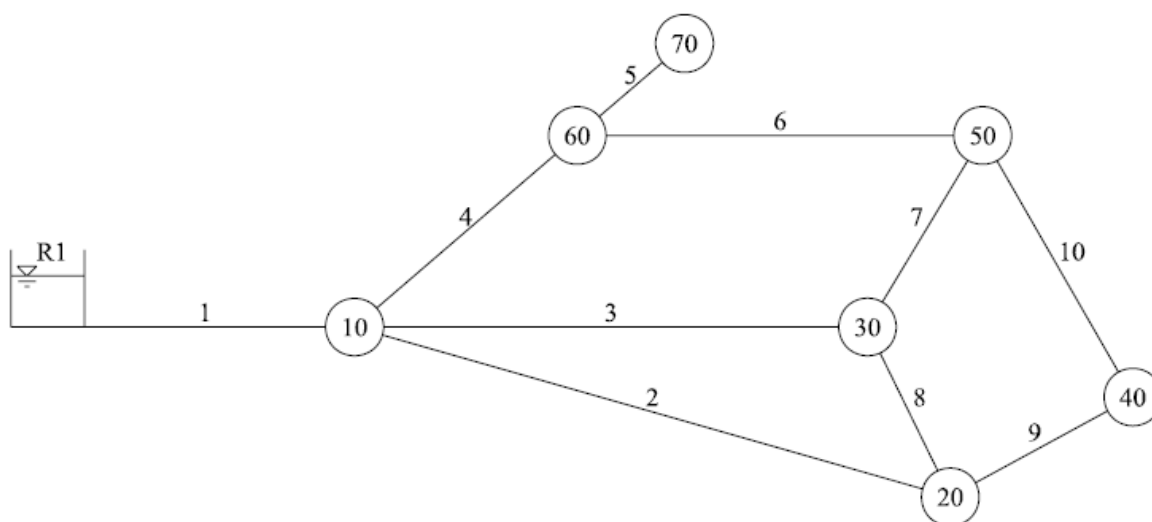
**Figura 1: Janela Principal de entrada de dados do aplicativo CARTAG.**

Os dados de entrada são divididos em duas categorias: parâmetros do cálculo dos algoritmos genéticos e informações sobre o sistema de distribuição a ser calibrado, como mostra a Tabela 1, a seguir.

**Tabela 1: Divisão dos dados de entrada do aplicativo CARTAG.**

<i>Dados de entrada do Cartag</i>		
<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>	
Tamanho da população	Quantidade de indivíduos que compõem a população de possíveis soluções.	
Quantidade de populações	Quantidade de populações que são geradas ao final do processo de calibração	
Função Objetivo	Função a ser otimizada.	
Tipo de substituição e espaço amostral	Forma como os indivíduos serão substituídos a cada geração. As opções do programa são geracional e steady-state.	
Parâmetros de Cálculo	Tipo de seleção	Modo como os indivíduos serão selecionados para compor a população intermediária.
	Método de cálculo da aptidão	Metodologia a ser empregada na conversão da função objetivo em valor de aptidão.
	Tipo de recombinação (crossover)	Operador de recombinação a ser utilizado e sua probabilidade de ocorrência.
	Tipo de mutação	Operador de mutação a ser utilizado e sua probabilidade de ocorrência.
Critérios de parada	Condição a ser estabelecida para que o processo de calibração seja encerrado.	
Dados de entrada	Informações da rede	Nome e caminho do arquivo de texto no formato de importação para o EPANET, contendo os dados da rede.
	Cenários de demanda	Nome e caminho do arquivo de texto contendo os valores das demandas nos nós com a identificação dos respectivos cenários.
	Pressões observadas	Nome e caminho do arquivo de texto contendo os valores observados de pressão nos nós para cada cenário.
	Parâmetros hidráulicos	Fórmula da perda de carga a ser empregada no simulador hidráulico.
	Arquivos de resultados	Nome dos arquivos de texto a serem criados pelo programa para o armazenamento dos resultados.

Verifica-se que o CARTAG foi idealizado para possibilitar a calibração das rugosidades de tubulações para uma rede de distribuição qualquer, tornando-o uma poderosa ferramenta com aplicação prática em sistemas reais. A Figura 2, a seguir, representa a rede hipotética a ser utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.



**Figura 2: Rede hipotética a ser analisada.**

As variáveis conhecidas dessa rede são: topografia do terreno, demandas nodais, nível do reservatório, diâmetro, comprimento e rugosidade das tubulações. Esses parâmetros encontram-se na Tabela 2, a seguir.

**Tabela 2: Características físicas da rede de distribuição hipotética.**

Características da rede de distribuição				
Tubo	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Rugosidade	
			$C (m^{0.368} / s)$	$\epsilon$ (mm)
1	500	700	140	0,09
2	250	1800	110	1,20
3	400	1520	130	0,20
4	300	1220	135	0,12
5	300	600	90	4,80
6	200	1220	110	1,20
7	250	920	120	0,50
8	150	300	115	1,00
9	200	600	85	6,50
10	100	1220	80	7,80

Como trata-se de um teste em modelo hipotético, a simulação e obtenção dos valores de pressão serão obtidos pelo EPANET 2.0. O modelo de calibração será avaliado pelo confronto dos valores de pressão calibrados e observados. A avaliação da eficiência dos operadores genéticos será feita por meio da comparação entre os valores simulados pelo CARTAG e os reais, apresentados na Tabela 2.

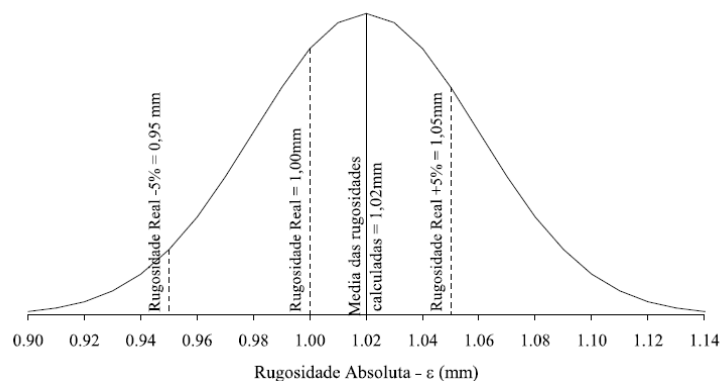
Esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência da quantidade de indivíduos da população na qualidade da calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água utilizando o CARTAG em uma rede hipotética de literatura e comparando as soluções encontradas com os valores simulados de pressão e rugosidade.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A análise foi realizada por meio de estudos comparativos entre os tamanhos das populações. Para cada população, o programa foi processado doze vezes para calibração das rugosidades da rede hipotética, com os seguintes critérios de parada: função objetivo menor que 0,001 e número máximo de gerações igual a 1000. Assim, foram obtidos doze resultados para cada alternativa, onde cada resultado é um vetor, cuja dimensão é a quantidade de tubos, e cada posição do vetor corresponde à rugosidade de um tubo.

Tendo em vista a distribuição normal dos resultados da calibração, foi realizado um estudo probabilístico, que se iniciou com a determinação da média e do desvio padrão das amostras de doze resultados obtidos para cada alternativa. Com base na curva de distribuição normal, foram calculadas, para as situações analisadas, as probabilidades dos coeficientes de rugosidade serem estimados com um erro menor que 5% e 10% do total.

Para ilustrar a metodologia adotada, a Figura 3, a seguir, apresenta a curva de distribuição normal referente a uma amostra de rugosidades absolutas ( $\epsilon$ ) calibradas pelo CARTAG com média 1,02mm e desvio padrão de 0,04mm. Sabendo que a rugosidade absoluta real é 1,00mm, calcula-se a probabilidade do programa identificar a rugosidade com uma margem de erro de 5% pela área compreendida entre o eixo das abscissas e a curva de distribuição, no intervalo de 0,95mm até 1,05mm.



**Figura 3: Exemplo de curva de distribuição normal das rugosidades calculadas pelo CARTAG.**

Com base nesse estudo estatístico, a análise de desempenho do CARTAG é feita comparando as probabilidades médias de cada alternativa, que é a média geométrica das probabilidades calculadas para cada tubo.

## RESULTADOS

Para que as alternativas sejam analisadas em condições de igualdade, os parâmetros dos algoritmos genéticos serão os mesmos e estão dispostos na Tabela 3, abaixo.

**Tabela 3 - Parâmetros dos algoritmos genéticos comuns.**

<i>Parâmetros dos algoritmos genéticos</i>	
Representação dos parâmetros	Real
Função Objetivo	Erro absoluto
Probabilidade de Recombinação (Crossover)	90%
Probabilidade de Mutação	1%

Para a rede, foram considerados dois cenários de demanda não proporcionais, indicados na Tabela 4, a seguir.

**Tabela 4: Demandas nodais para os cenários estudados.**

<i>Nó</i>	<i>Demandas nodais</i>	
	<i>Demanda (L/s)</i>	
	<i>Cenário 1</i>	<i>Cenário 2</i>
10	0,0	0,0
20	15,0	36,0
30	62,5	120,0
40	15,0	10,0
50	47,5	80,0
60	30,0	80,0
70	37,5	37,5

Os valores de pressão considerados como reais foram calculados pela simulação do sistema hipotético utilizando o EPANET 2.0, em que são aplicadas as fórmulas de *Darcy-Weisbach* e *Hazen-Williams*. Essas pressões estão dispostas na Tabela 5.

**Tabela 5: Pressões observadas, geradas sinteticamente pelo simulador hidráulico.**

<i>Nó</i>	<i>Pressões reais sintéticas</i>			
	<i>Darcy-Weisbach</i>		<i>Hazen-Williams</i>	
	<i>Cenário 1</i>	<i>Cenário 2</i>	<i>Cenário 1</i>	<i>Cenário 2</i>
10	58,78	56,42	58,74	56,44
20	55,90	48,24	55,75	48,37
30	56,28	48,72	56,08	48,72
40	53,71	46,81	53,77	47,03
50	53,55	41,46	53,35	41,80
60	54,47	43,95	54,27	44,12
70	53,17	42,66	53,03	42,88

Na calibração das rugosidades absolutas das tubulações optou-se em analisar a influência da quantidade de indivíduos da população na qualidade dos resultados alcançados, tendo em vista a dimensão do espaço de busca, que é maior no caso dos coeficientes de *Hazen-Williams*. Os demais parâmetros e operadores foram considerados os mesmos em todas as calibrações e estão indicados na Tabela 6.



**Tabela 6: Dados utilizados para análise dos tipos de substituição dos indivíduos.**

<i>Substituição de indivíduos</i>	
<i>Substituição de indivíduos</i>	Steady-state
<i>Seleção</i>	Torneio (n=3)
<i>Recombinação</i>	Em cada geração um dos operadores é escolhido aleatoriamente.
<i>Mutação</i>	Gaussiana ( $\sigma = 2$ )
<i>Cálculo da perda de carga</i>	Darcy-Weisbach

## POPULAÇÃO DE 200 INDIVÍDUOS

Os resultados de rugosidade obtidos nas 12 calibrações realizadas com 1000 iterações, utilizando uma população de 200 indivíduos gerando 100 filhos, estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7: Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando população de 200 indivíduos.**

<i>Calibração</i>	<i>Rugosidade absoluta calculada por tubo – <math>\epsilon</math> (mm)</i>									
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
1	0,047	1,602	0,094	0,240	4,779	24,058	0,287	2,806	5,534	3,790
2	0,100	0,855	0,195	0,135	4,615	2,360	0,429	3,462	6,294	4,044
3	0,065	1,125	0,191	0,161	4,764	3,832	0,396	1,493	5,971	2,603
4	0,067	0,951	0,246	0,135	3,887	0,832	0,561	2,876	5,800	2,836
5	0,010	0,059	0,871	0,235	4,399	10,115	0,104	0,000	6,671	6,402
6	0,091	1,347	0,256	0,057	5,123	0,009	1,311	1,001	6,181	6,355
7	0,088	0,945	0,265	0,091	4,579	0,230	0,780	2,554	6,197	4,984
8	0,086	1,550	0,204	0,068	4,567	0,010	1,334	1,293	5,954	5,203
9	0,245	0,342	0,178	0,100	4,798	2,457	0,361	24,547	6,730	5,152
10	0,095	1,212	0,229	0,086	5,096	0,313	0,833	0,332	4,700	1,958
11	0,532	0,309	0,043	0,081	4,932	6,546	0,319	6,960	5,966	3,074
12	0,097	0,996	0,185	0,121	4,788	1,406	0,546	2,216	5,679	3,353
<i>Média</i>	<i>0,127</i>	<i>0,941</i>	<i>0,246</i>	<i>0,126</i>	<i>4,694</i>	<i>4,347</i>	<i>0,605</i>	<i>4,128</i>	<i>5,973</i>	<i>4,146</i>
<i><math>\sigma</math></i>	<i>0,139</i>	<i>0,489</i>	<i>0,207</i>	<i>0,060</i>	<i>0,331</i>	<i>6,917</i>	<i>0,391</i>	<i>6,681</i>	<i>0,538</i>	<i>1,465</i>
<i>Real</i>	<i>0,090</i>	<i>1,200</i>	<i>0,200</i>	<i>0,120</i>	<i>4,800</i>	<i>1,200</i>	<i>0,500</i>	<i>1,000</i>	<i>6,500</i>	<i>8,000</i>
<i>Erro</i>	<i>41,13%</i>	<i>21,58%</i>	<i>23,22%</i>	<i>4,84%</i>	<i>2,21%</i>	<i>262,27%</i>	<i>21,00%</i>	<i>312,82%</i>	<i>8,11%</i>	<i>48,17%</i>

A Tabela 8 e a Figura 4 mostram o comparativo entre as pressões reais e calibradas pelo programa.

**Tabela 8: Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 200 indivíduos.**

<b>Nó</b>	<b>Pressão</b>					
	<b>Cenário 1</b>			<b>Cenário 2</b>		
	<b>Observada</b>	<b>Calculada</b>	<b>Diferença</b>	<b>Observada</b>	<b>Calculada</b>	<b>Diferença</b>
10	58,78	58,73	0,05	56,42	56,23	0,19
20	55,90	55,75	0,15	48,24	47,84	0,40
30	56,28	56,16	0,12	48,72	48,31	0,41
40	53,71	53,56	0,15	46,81	46,35	0,46
50	53,55	53,25	0,30	41,46	40,56	0,90
60	54,47	54,46	0,01	43,95	43,86	0,09
70	53,17	53,17	0,00	42,66	42,57	0,09

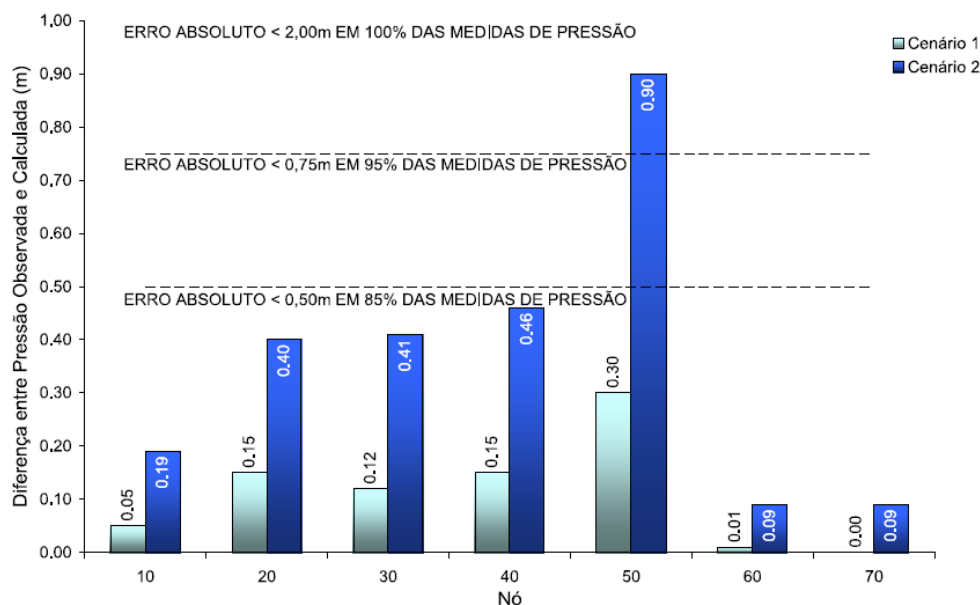


Figura 4: Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 200 indivíduos.

#### POPULAÇÃO DE 500 INDIVÍDUOS

A Tabela 9 apresenta as amostras de 12 rugosidades calibradas com 400 iterações e uma população de 500 indivíduos gerando 250 filhos.

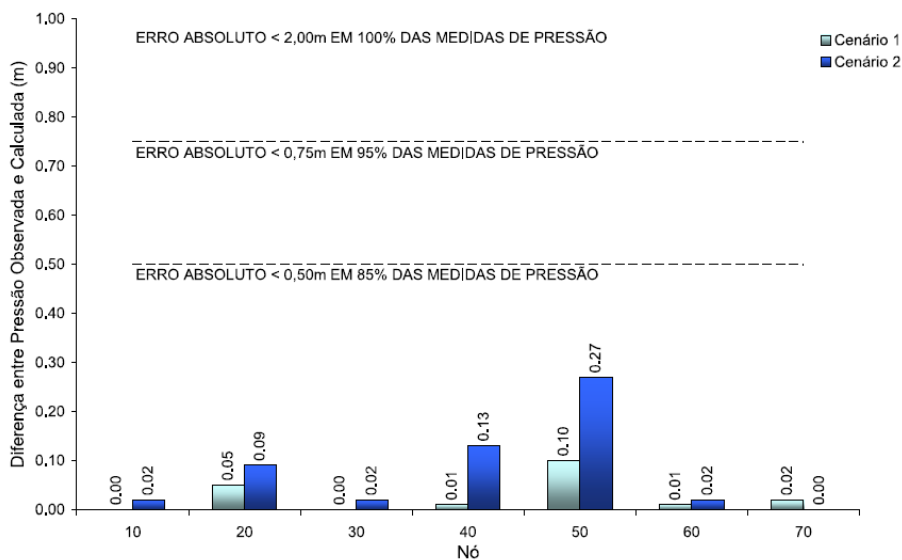
Tabela 9: Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 400 iterações, utilizando população de 500 indivíduos.

Calibração	Rugosidade absoluta calculada por tubo – $\epsilon$ (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,087	1,175	0,206	0,122	4,756	1,271	0,502	0,710	5,884	5,106
2	0,091	0,844	0,212	0,133	4,418	1,860	0,517	2,411	4,161	1,099
3	0,086	0,804	0,206	0,154	4,138	3,281	0,390	4,746	5,320	2,400
4	0,118	0,704	0,189	0,133	4,889	2,859	0,433	4,871	5,374	1,658
5	0,074	0,897	0,247	0,123	4,245	0,846	0,610	2,529	4,860	1,521
6	0,108	0,893	0,194	0,126	4,373	1,680	0,473	2,560	5,861	3,676
7	0,080	0,968	0,183	0,168	4,587	5,477	0,334	2,088	5,652	3,402
8	0,092	0,680	0,356	0,062	4,886	0,006	1,146	9,107	6,093	4,418
9	0,092	0,843	0,203	0,137	4,851	2,393	0,431	3,924	6,268	3,786
10	0,096	0,901	0,189	0,144	4,372	2,903	0,405	2,903	5,808	3,414
11	0,119	1,905	0,093	0,091	4,447	0,358	1,018	0,761	5,845	3,409
12	0,100	0,743	0,285	0,080	4,680	0,135	0,876	9,525	5,986	4,902
Média	0,095	0,946	0,214	0,123	4,553	1,922	0,595	3,845	5,593	3,233
$\sigma$	0,014	0,329	0,063	0,031	0,258	1,581	0,268	2,869	0,591	1,313
Real	0,090	1,200	0,200	0,120	4,800	1,200	0,500	1,000	6,500	8,000
Erro	5,88%	21,13%	6,78%	2,28%	5,14%	60,20%	18,92%	284,45%	13,96%	59,59%

Observa-se pela Tabela 10 e pela Figura 5 que o sistema está calibrado, pois as diferenças absolutas entre pressões observadas e pressões simuladas com a média das rugosidades calibradas estão dentro dos limites definidos anteriormente.

**Tabela 10: Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 500 indivíduos.**

Nó	Pressão					
	Cenário 1			Cenário 2		
	Observada	Calculada	Diferença	Observada	Calculada	Diferença
10	58,78	58,78	0,00	56,42	56,40	0,02
20	55,90	55,85	0,05	48,24	48,15	0,09
30	56,28	56,28	0,00	48,72	48,70	0,02
40	53,71	53,72	0,01	46,81	46,68	0,13
50	53,55	53,45	0,10	41,46	41,19	0,27
60	54,47	54,46	0,01	43,95	43,93	0,02
70	53,17	53,19	0,02	42,66	42,66	0,00



**Figura 5: Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 500 indivíduos.**

### POPULAÇÃO DE 1000 INDIVÍDUOS

Os resultados da calibração com 200 iterações utilizando uma população de 1000 indivíduos gerando 500 filhos são apresentados na Tabela 11.

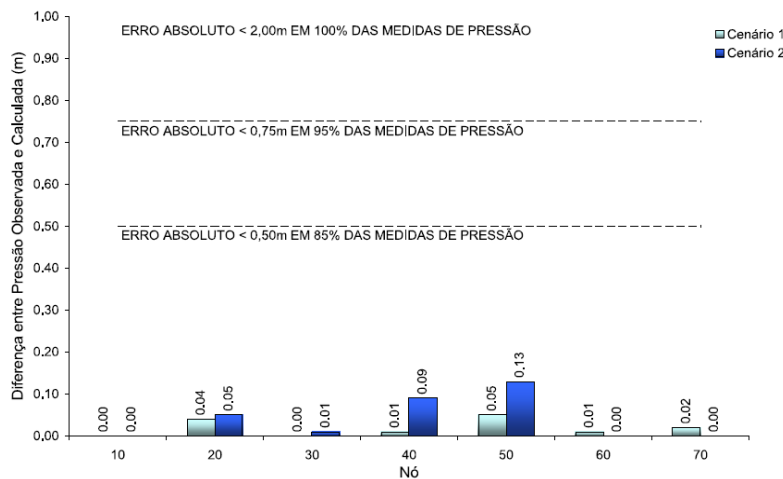
**Tabela 11: Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 200 iterações, utilizando população de 1000 indivíduos.**

Calibração	Rugosidade absoluta calculada por tubo – $\epsilon$ (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,092	0,844	0,236	0,109	4,769	0,777	0,613	3,385	5,462	3,077
2	0,098	0,989	0,169	0,155	4,744	4,808	0,352	1,789	5,986	3,296
3	0,092	1,015	0,188	0,142	4,623	2,742	0,394	2,060	6,344	6,309
4	0,087	1,250	0,251	0,083	4,625	0,132	0,909	0,496	5,442	3,800
5	0,091	0,815	0,218	0,127	4,724	1,588	0,511	3,761	5,032	2,155
6	0,090	0,766	0,198	0,149	5,070	4,011	0,382	4,698	5,527	2,549
7	0,092	1,311	0,152	0,136	4,752	2,262	0,484	1,036	6,033	4,334
8	0,089	0,906	0,187	0,150	4,830	3,701	0,383	3,014	6,232	3,584
9	0,091	0,857	0,204	0,136	4,739	2,303	0,432	3,744	6,283	4,268
10	0,091	0,825	0,211	0,135	4,606	2,102	0,433	5,053	6,189	5,034
11	0,090	0,698	0,232	0,130	4,740	1,797	0,455	10,783	6,093	4,362
12	0,090	1,314	0,161	0,162	4,355	4,876	0,329	0,316	5,877	5,030
Média	0,091	0,966	0,201	0,135	4,715	2,592	0,473	3,344	5,875	3,983
$\sigma$	0,003	0,215	0,031	0,022	0,166	1,502	0,157	2,816	0,414	1,162
Real	0,090	1,200	0,200	0,120	4,800	1,200	0,500	1,000	6,500	8,000
Erro	1,30%	19,52%	0,29%	12,15%	1,77%	115,97%	5,39%	234,45%	9,61%	50,21%

A Tabela 12 e a Figura 6 mostram as diferenças absolutas entre pressões observadas e pressões simuladas com a média das rugosidades calibradas. De acordo com os critérios estabelecidos anteriormente, observa-se que o sistema está calibrado.

**Tabela 12: Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 1000 indivíduos.**

Nó	Pressão					
	Cenário 1			Cenário 2		
	Observada	Calculada	Diferença	Observada	Calculada	Diferença
10	58,78	58,78	0,00	56,42	56,42	0,00
20	55,90	55,86	0,04	48,24	48,19	0,05
30	56,28	56,28	0,00	48,72	48,71	0,01
40	53,71	53,72	0,01	46,81	46,72	0,09
50	53,55	53,50	0,05	41,46	41,33	0,13
60	54,47	54,48	0,01	43,95	43,95	0,00
70	53,17	53,19	0,02	42,66	42,66	0,00



**Figura 6: Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 1000 indivíduos.**

## POPULAÇÃO DE 2000 INDIVÍDUOS

Para uma população de 2000 indivíduos gerando 1000 filhos em cada iteração, as soluções encontradas, dispostas na Tabela 13, são as seguintes:

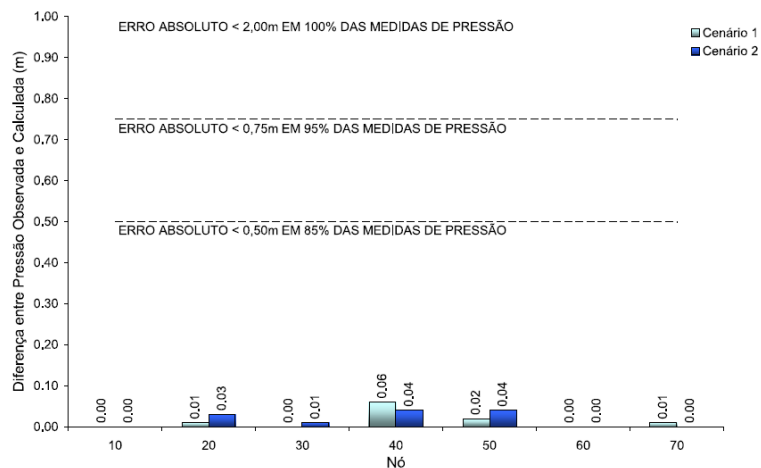
**Tabela 13: Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando população de 2000 indivíduos.**

Calibração	Rugosidade absoluta calculada por tubo – $\epsilon$ (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,087	0,987	0,210	0,127	4,775	1,570	0,494	2,032	5,497	3,576
2	0,086	1,152	0,199	0,128	4,725	1,562	0,508	0,861	5,455	3,397
3	0,089	1,374	0,183	0,130	4,734	1,783	0,473	0,213	5,506	3,649
4	0,094	1,006	0,182	0,142	4,731	2,905	0,415	1,796	5,754	3,392
5	0,090	1,236	0,180	0,133	4,845	1,994	0,463	0,696	5,664	4,226
6	0,090	1,065	0,181	0,148	4,848	3,425	0,384	1,276	5,518	3,898
7	0,090	1,207	0,174	0,141	4,768	2,759	0,452	0,422	4,561	1,630
8	0,101	0,910	0,193	0,130	4,700	2,057	0,454	2,631	6,042	3,719
9	0,091	1,132	0,172	0,153	4,828	4,081	0,355	1,094	6,048	5,390
10	0,091	1,127	0,202	0,120	4,697	1,211	0,528	1,054	5,645	4,304
11	0,091	1,051	0,210	0,119	4,744	1,143	0,531	1,522	5,733	4,551
12	0,092	0,862	0,194	0,145	4,711	3,201	0,403	3,492	5,949	2,870
Média	0,091	1,092	0,190	0,135	4,759	2,307	0,455	1,424	5,614	3,717
$\sigma$	0,004	0,144	0,013	0,011	0,055	0,946	0,056	0,946	0,392	0,926
Real	0,090	1,200	0,200	0,120	4,800	1,200	0,500	1,000	6,500	8,000
Erro	1,16%	8,96%	5,05%	12,24%	0,86%	92,29%	9,01%	42,40%	13,63%	53,54%

Os critérios estabelecidos para calibração foram atendidos, conforme indicado na Tabela 14 e na Figura 7.

**Tabela 14: Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 2000 indivíduos.**

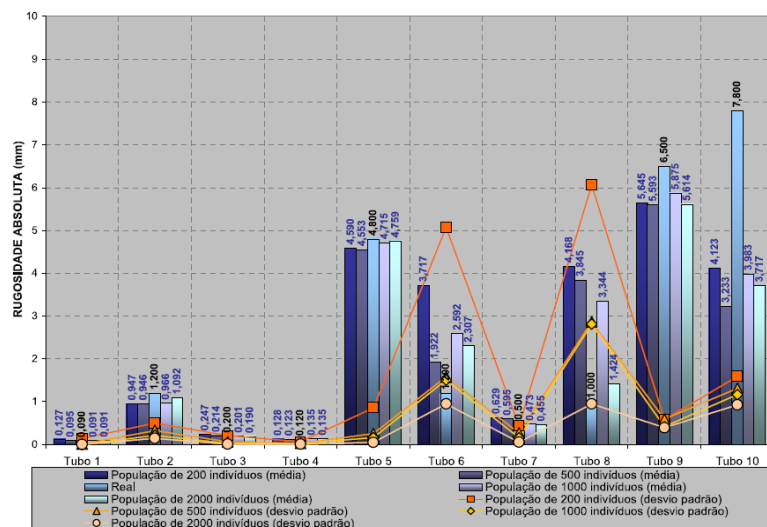
Nó	Pressão					
	Cenário 1			Cenário 2		
	Observada	Calculada	Diferença	Observada	Calculada	Diferença
10	58,78	58,78	0,00	56,42	56,42	0,00
20	55,90	55,89	0,01	48,24	48,21	0,03
30	56,28	56,28	0,00	48,72	48,73	0,01
40	53,71	53,77	0,06	46,81	46,77	0,04
50	53,55	53,53	0,02	41,46	41,42	0,04
60	54,47	54,47	0,00	43,95	43,95	0,00
70	53,17	53,18	0,01	42,66	42,66	0,00



**Figura 7: Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 2000 indivíduos.**

### ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS ALTERNATIVAS DE TAMANHO DA POPULAÇÃO

A partir das simulações realizadas, percebe-se que, nas alternativas de população com 500, 1000 e 2000 indivíduos, as diferenças entre pressões reais e calculadas em todas as medidas de pressão são inferiores a 0,50m, indicando que o sistema está calibrado. Na alternativa de população com 200 indivíduos, em uma medida de pressão o erro absoluto foi superior a 0,75m, mostrando que, nesse caso, o sistema está no limite do intervalo aceitável de calibração. Notou-se que as rugosidades estimadas para os tubos 6, 8 e 10 apresentaram um desvio padrão elevado, como mostra a Figura 8.



**Figura 8: Média e desvio padrão das rugosidades absolutas calibradas por tamanho da população.**

A avaliação da influência da quantidade de indivíduos da população na qualidade das soluções é feita com base no cálculo da probabilidade com que as rugosidades absolutas são determinadas com erro menor que 10% (Figura 9), e não 5% como foi analisado o coeficiente de *Hazen-Williams*, tendo em vista a menor sensibilidade da rugosidade absoluta. Diante disso e do gráfico da Figura 10, que mostra o comportamento da função objetivo média no decorrer das iterações, conclui-se que com o aumento da população, eleva-se consideravelmente a probabilidade média de identificação das rugosidades absolutas com erro menor que 10%.

Observa-se, ainda, que, no caso estudado, as pressões simuladas com rugosidades absolutas calibradas a partir de uma população de 1000 indivíduos, são semelhantes às pressões simuladas com coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados a partir de uma população de 200 indivíduos.

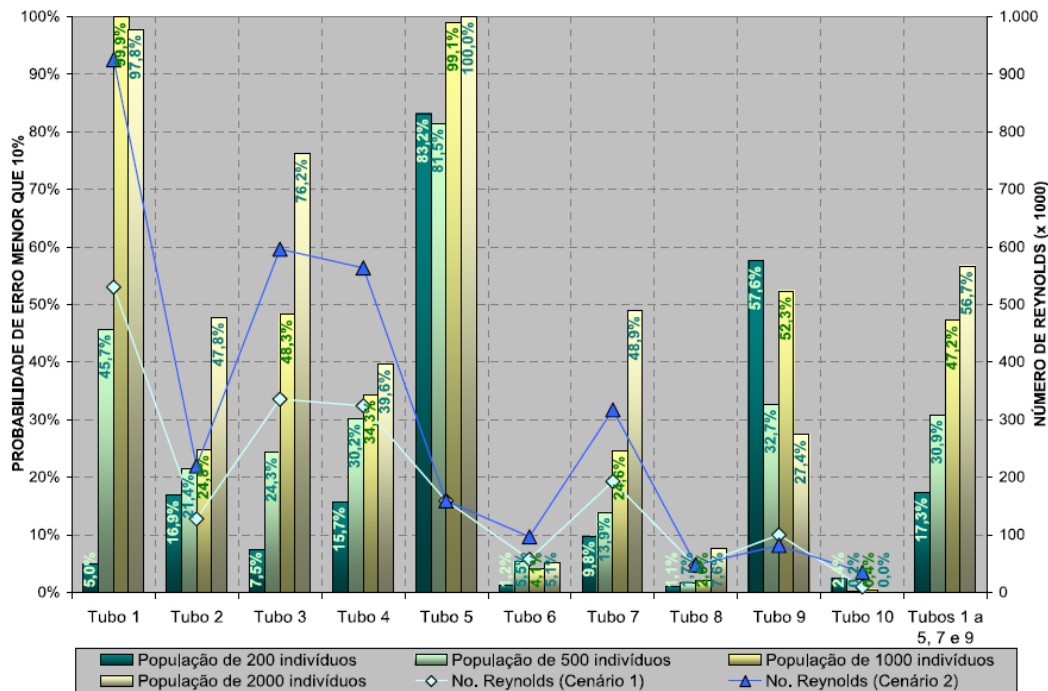


Figura 9: Probabilidade de calibração das rugosidades absolutas com erro menor que 10%, por tamanho da população.

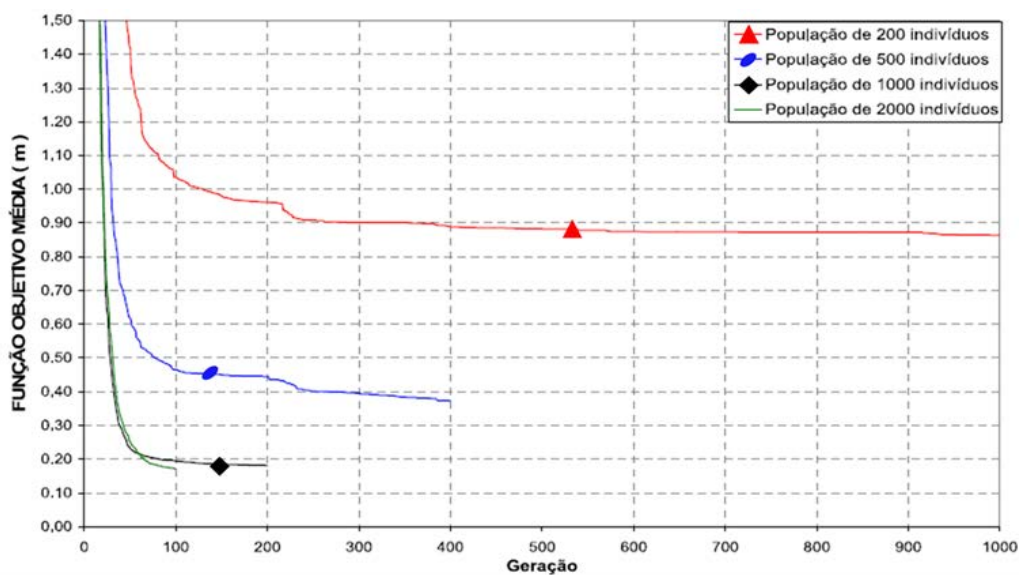


Figura 10: Comportamento da função objetivo média por tamanho da população.

## CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados apresentados, pode-se afirmar que o modelo proposto pode ser utilizado como ferramenta de calibração, tendo em vista que as pressões calculadas apresentaram erros absolutos dentro dos limites de tolerância definidos pelo WATER RESERARCH CENTRE (1989).

A partir de uma visão geral dos resultados obtidos, observa-se que, apesar do modelo calibrar pressões com precisão, as rugosidades estimadas para os tubos 6, 9 e 10 apresentaram desvio padrão elevado, demonstrando que esses tubos são menos sensíveis ao processo de calibração. Analisando as condições de equilíbrio hidráulico do sistema, observa-se que os tubos menos sensíveis possuem em comum o baixo valor do número de *Reynolds*, que ocasiona diferenças insignificantes na perda de carga unitária para qualquer variação da rugosidade. Diante disso, conclui-se que, para o modelo proposto, os resultados alcançados na calibração se aproximam da realidade à medida em que o escoamento é mais turbulento, característica observada pelo aumento do número de *Reynolds*.

O acréscimo da quantidade de indivíduos melhorou a diversidade da população inicial, refletindo em uma maior precisão da solução final, de forma que os erros absolutos de pressão para calibração de rugosidades absolutas a partir de uma população de 1000 indivíduos são semelhantes àqueles obtidos na calibração dos coeficientes de *Hazen-Williams* a partir de uma população de 200 indivíduos. Conclui-se, portanto, que a calibração das rugosidades absolutas necessita de um maior tempo de processamento computacional, que pode ser minimizado reduzindo o espaço de busca, através da ampliação dos conhecimentos sobre os materiais das tubulações, tornando menor o intervalo compreendido entre as rugosidades mínima e máxima.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAÚJO, J. K. Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
2. COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. *Sanit. Ambient. [online]*. 2010, vol.15, n.2, pp.187-196. ISSN 1413-4152. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522010000200011>>. Acesso em: 20 jun. 2016.
3. DARWIN, C. *On the origin of species*. London, John Murray, 1859
4. GALVÃO, C. O. et al. Sistemas inteligentes – aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Porto Alegre. 1999.
5. GAMBALE, S. R. Aplicação de algoritmo genético na calibração de rede de água. São Paulo. 266 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.
6. KONDAGESKI, Jonas Heitor. Calibração de modelo de qualidade da água para rio utilizando algoritmo genético. Dissertação (Mestrado). – Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
7. SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v 123, n 2, p. 67-77, Mar/Abr, 1997
8. ZAHED FILHO, K. Previsão de demanda de consumo em tempo real no desenvolvimento operacional de sistemas de distribuição de água. São Paulo. 135p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil, 1990.