

# ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO PROBLEMA INVERSO E ALGORITMOS GENÉTICOS

*Carolina de Lima Neves<sup>1</sup> ; Sérgio Koide<sup>2</sup>; José Goes Vasconcelos Neto<sup>3</sup> & Domingo Stalin Aguerro-Martinez<sup>4</sup>*

**RESUMO** --- A análise computacional de redes de distribuição de água tem se tornado uma ferramenta cada vez mais importante para a tomada de decisão de operadores e engenheiros. Entretanto, para obtenção de resultados confiáveis na simulação de sistemas de distribuição de água é necessário o levantamento de parâmetros corretos sobre todo o sistema. Porém, a extensão e a complexidade geométrica das redes inviabilizam a medição direta desses parâmetros por meio de experimentos campo. Por isso, a calibração automática de parâmetros de redes de abastecimento de água tem se tornado uma opção interessante. Dentre os trabalhos realizados tem se contemplado o procedimento inverso e os algoritmos genéticos como técnica de otimização. Entretanto, não se sabe muito bem como se comporta a calibração para diferentes parâmetros de entrada dos algoritmos genéticos. O presente trabalho aborda a influência do número de indivíduos da população e do número de pontos de controle de pressão na rede verificando um grande número de soluções possíveis para uma mesma rede de distribuição de água.

**ABSTRACT** --- The computational analysis of water distribution networks has become an important tool for the operated and engineers decision making. However, in order to obtain reliable results in water distribution network simulations, it is necessary to obtain correct parameters about the system. However, the extension and complexity of the network geometry prevents direct measure of such parameters with field experiments. Thus, water network calibration has become an interesting option. Previous work in this field has included the inverse procedure and the genetic algorithms as optimization techniques. However, it is not completely known how the calibration behaves for different genetic algorithms input parameters. The present work aims to study the influence of the population individuals number and the number of control pressure points of the network verifying a great number of possible solutions for one same water distribution network.

**Palavras-chave:** calibração, parâmetros e algoritmos genéticos.

---

1) Mestranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília, DF. AOS 1, Bl. "C", apt. 102, Octogonal Sul, Cruzeiro, DF, 70660-113. e-mail: carolinalneves@yahoo.com.br.

2) Professor Associado da Universidade de Brasília, Brasília/DF. e-mail:skoide@unb.br.

3) Professor Adjunto da Universidade de Brasília, Brasília/DF. e-mail:jvasconcelos@unb.br.

4) Doutorando em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília, Brasília/DF. e-mail:domingostalin@unb.br.

# 1 - INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação hidráulica se tornaram de suma importância na avaliação de projetos e operação de redes de distribuição de água pela possibilidade de prever diversas condições de funcionamento e avaliar possíveis problemas e solucioná-los, quando for o caso, na fase de projeto.

Entretanto, quando é analisada a operação de sistemas de distribuição de água (SDA) já em operação, muitas características podem ser desconhecidas ou foram alteradas com o passar dos anos. Muitas vezes a verificação *in loco* dessas características é muito onerosa tornando essa forma de obtenção de dados inviável. Por isso, a calibração de dados de SDA se torna uma ferramenta atrativa na determinação dos parâmetros hidráulicos da rede.

A calibração visa determinar os parâmetros hidráulicos da rede pela comparação de dados operacionais medidos, como pressões e vazões, dados simulados de maneira a aproximá-los até atingir uma diferença máxima arbitrada de acordo com a finalidade que se pretende dá aos resultados obtidos. Para implementar um algoritmo de calibração deve-se definir além do modelo de simulação, o procedimento de calibração e a técnica de calibração. No procedimento de calibração que tem sido muito utilizado é o processo inverso e na técnica de otimização que tem apresentado bons resultados é os algoritmos genéticos (AGs).

A eficiência do AG depende das taxas de cruzamento e mutação e dos tipos utilizados. Algumas dessas características já foram testadas e mostradas na literatura indicando valores que conduzem a uma maior eficiência da técnica. Entretanto, outros aspectos, tais como o valor da semente da geração aleatória, o número de indivíduos por geração e o número de pontos de controle também influem nos resultados do algoritmo genético.

## 2 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

As ferramentas computacionais têm sido muito utilizadas na tarefa de auxiliar os operadores e projetistas a entregar água de qualidade a baixos custos. Atualmente, esse tipo de instrumento tornou-se uma necessidade incontestável para a maioria dos SAA (Moura *et al.*, 2001).

A simulação do comportamento hidráulico da rede pelo uso de modelos computacionais se tornou uma prática comum entre os projetistas de redes de distribuição de água, sendo o termo simulação empregado para o processo de representação do comportamento de um sistema. Primeiramente porque essa ferramenta elimina os cálculos iterativos, permitindo aos projetistas focar nas decisões de projeto, considerando a complexidade dos cálculos reais e possibilitando maior confiança de que a rede instalada irá trabalhar tal como projetado. Além disso, a facilidade e a velocidade com a qual esses modelos podem ser usados dão ao engenheiro a possibilidade de

explorar muitas alternativas sob várias condições, resultando em um menor custo-benefício e em projetos mais robustos (Walski *et al.*, 2001).

Os simuladores podem se comportar de maneira diferente com relação ao tempo. Alguns modelos não consideram a variação das condições de contorno com o tempo. Esses simuladores são conhecidos como de regime permanentes. Existem outros, nos quais as características de funcionamento do sistema são alteradas com o passar do tempo, sendo conhecidos simuladores de regime não permanentes ou transientes. Como tentativa de simular o comportamento inconstante da rede, foi desenvolvido um modelo que analisa o sistema como permanente em diversos intervalos de tempo, variando em cada cenário as características limites, recebendo o nome de simulação por período estendido (SPE).

Entretanto, o uso de ferramentas hidráulicas exige alto grau de conhecimento da rede e pessoas treinadas para usar os modelos de simulação hidráulica. Muitas vezes, as empresas de saneamento não possuem todos os dados da rede, sendo que muitas dessas informações são de conhecimento apenas de alguns funcionários da empresa e são perdidas quando esses deixam a companhia. Outros dados, ainda, se alteram com o passar dos anos e precisam ser identificados para se obter resultados de simulação confiáveis na tomada de decisão.

Nesse contexto, a calibração se apresenta como uma ferramenta para se obter parâmetros desconhecidos da rede de distribuição de água. Covas e Ramos (2001) descrevem o processo de calibração como um método de identificação de parâmetros desconhecidos a partir de técnicas de otimização na qual o comportamento do sistema é modelado hidraulicamente, minimizando as diferenças entre valores observados e valores calculados. Alguns pesquisadores desenvolveram modelos de calibração para determinação de características de redes de distribuição de água.

Soares (2003) implementou um modelo inverso que minimiza a diferença entre os valores de pressão e vazão observados e aqueles obtidos computacionalmente. O simulador hidráulico utilizado foi o EPANET, que calcula a rede em modo permanente e também em SPE. O autor mesclou duas técnicas de otimização utilizando um algoritmo genético combinado com o método simplex. O algoritmo possui dois tipos de algoritmos genéticos disponíveis: o geracional elitista e o *steady-state*.

Savic e Walters (1997) desenvolveram o GANET como ferramenta auxiliar no dimensionamento da rede que apresenta um menor custo de implantação. O simulador hidráulico utilizado foi o EPANET. A preocupação dos autores foi determinar um conjunto de tubos que apresentassem menor diâmetro e comprimento, reduzindo os custos de implantação da rede analisada.

O *Engineering and Physical Sciences Research Council* (2002) aplicou um processo de calibração para análise da rede de abastecimento de água. Esse estudo foi uma parceria entre a

Universidade de Exeter e o Imperial College. A calibração possuía dois objetivos principais: maximizar a precisão da calibração pela minimização das incertezas do modelo e minimizar os custos totais com a coleta de dados de campo. A técnica de calibração foi com função objetivo simples e algoritmo genético (SOAG).

Greco e Giudice (1999) calibram os dados da rede pela técnica de programação não linear a partir de dados de pressão.

Neves (2007), desenvolveu um algoritmo de calibração utilizando o processo inverso e o AG como técnica de otimização. O modelo de simulação utilizado é o PAMREDE, desenvolvido por Wanderley (1997), que calcula uma rede de distribuição em regime permanente. O algoritmo genético utilizado foi desenvolvido por Carroll (2001). A função objetivo visa maximizar o inverso da diferença entre as pressões calculadas e observadas. Nesse algoritmo, o tipo de seleção é o torneio, os tipos de cruzamento adotados foram os por simples ponto e o uniforme, os tipos de mutação são *creep* e *jump*. As taxas de cruzamento e mutação são arbitradas pelos usuários.

Como pode-se verificar pelos exemplos citados, o AG tem sido uma técnica muito utilizada na calibração de redes de abastecimento de água. Entretanto, pouco se tem explorado acerca dos AGs. Segundo Lacerda e Carvalho (1999), a otimização consiste em tentar várias soluções possíveis e utilizar a informação obtida neste processo de forma a encontrar soluções cada vez melhores em termos de função objetivo, explorando a melhor ou pior aptidão da solução.

A teoria dos AGs é baseada no conceito de evolução natural e na maior competitividade dos indivíduos mais bem sucedidos propagando suas boas características, favorecendo a produção de indivíduos mais aptos. A utilização das idéias de evolução natural na resolução de problemas de otimização foi apresentada por Holland e colaboradores recebendo o nome de algoritmos genéticos.

De forma inicialmente aleatória, o AG busca a solução do problema de maneira direcionada explorando informações anteriores para encontrar novos e melhores pontos de busca, dentro de um espaço amostral, empregando-se uma estrutura de busca paralela e estruturada, porém, estocástico, reforçando a busca de pontos de “alta aptidão” por meio de processos iterativos, em que cada iteração é chamada de geração.

O valor da aptidão de um indivíduo pode ser definida por diferentes maneiras, sendo a mais simples igual ao valor da função objetivo (F.O.).

A estrutura básica utilizada do AG é o cromossomo, que pode ser representado computacionalmente por *strings* binários, vetores de números reais, dentre outros. As representações mais utilizadas são a binária e a real, apresentando cada uma delas peculiaridades que devem ser analisadas no momento da escolha do tipo de representação. Por meio do operador seleção são escolhidos os cromossomos com melhor aptidão que sofrerão ação dos operadores genéticos, mutação e cruzamento.

Os algoritmos genéticos dependem da definição de algumas variáveis para o seu funcionamento. A eficiência dessa ferramenta está intimamente ligada aos valores atribuídos a esses parâmetros. Carroll (2001), sugere algumas diretrizes para escolher os valores da taxa de cruzamento e mutação para uma dada população. A primeira deve apresentar um valor que varie entre 60% e 90 %, recomendando como tipo de cruzamento, o uniforme. Um baixo grau de cruzamento levaria a uma convergência tardia, sem a introdução satisfatória de novos indivíduos na população. Por outro lado, uma taxa de cruzamento muito elevada retiraria muito rapidamente da população indivíduos com alta aptidão. Já para valores de probabilidade de mutação, os valores recomendados são inversamente proporcionais ao número de indivíduos da população, recomendando o uso de mutação tipo *creep*.

No cruzamento uniforme é gerada uma máscara aleatória de bits que é verificada para a geração dos indivíduos filhos. Quando o bit for ativo, ou seja, igual a 1, o filho 1 recebe a característica que o pai 1 possui naquele bit, caso contrário, o indivíduo filho recebe a característica do pai 2. O filho 2, quando existe, é formado de maneira análoga. Esse tipo de cruzamento garante que um indivíduo possa ter características genéticas só de um pai ou de ambos, não definindo uma ordem geral que deve ser seguida por todos os indivíduos.

A mutação do tipo *jump*, ocorre pela geração de um número aleatório que é comparado com a taxa de mutação. Quando esse número é menor que a taxa de mutação o indivíduo sofre mutação no bit avaliado, mudando o seu valor. Na mutação tipo *creep*, o bit selecionado para mutação recebe o acréscimo, ou decréscimo, de um incremento ou unidade usada na calibração. A mutação garante que características inexistentes numa população possam aparecer em outras gerações, garantindo assim, a diversidade na população.

O espaço de busca, geralmente escolhido pelo usuário, pode conter diversos ótimos, porém, nem sempre o ótimo global está inserido nesse intervalo. Por isso, o desempenho do AG está intimamente ligado às variáveis de entrada do problema e a definição da população inicial. Para cobrir melhor o espaço solução, deve-se optar por uma população numerosa já que chance incluir o ótimo global se torna maior. Essa característica é muito importante ao se analisar qualquer problema utilizando AGs como ferramenta de busca (Neves, 2007).

Como observado no parágrafo anterior, a diversidade é favorecida pelo grande número de indivíduos que compõe a população. O tamanho da população tem grande influência na eficiência dos AGs. Com uma população pequena o desempenho do algoritmo pode cair, pois, desse modo, a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais.

Uma característica que pode aumentar a vantagem competitiva do AG é o elitismo. O elitismo consiste em manter na próxima geração os n melhores indivíduos pais, ou seja, aqueles que possuem maiores aptidões. Isso favorece a convergência do AG já que não permite que os n melhores indivíduos sejam perdidos, entretanto, se o número de indivíduos conservados para a próxima geração for elevado, o AG pode convergir prematuramente para uma solução subótima.

Outro ponto que deve ser analisado é o número de pontos de controle de pressão. É necessário definir um número de pontos de controle de pressão satisfatório que seja capaz de levar à calibração da rede de distribuição de água com certo grau de confiança. Um número reduzido de pontos de observação pode conduzir a resultados muito diferentes dos reais, porém, um número elevado de observações pode tornar inviável a execução do procedimento de calibração em um sistema real.

### 3 –METODOLOGIA

Para analisar a influência do número de pontos de observação na qualidade dos resultados obtidos por processo de calibração foi usado o programa CALIBRA desenvolvido por Neves (2007). Esse programa utiliza um modelo de cálculo de rede em regime permanente, procedimento de calibração inverso e AG como técnica de calibração. O fluxograma simplificado do modelo de calibração proposto por Neves (2007) está apresentado na figura 1.

O tipo de seleção usado para essa análise foi o torneio. Essa seleção consiste em avaliar dois indivíduos, escolhidos aleatoriamente, escolhendo aquele que apresentar melhor aptidão. O cruzamento escolhido neste trabalho foi o uniforme utilizando dois tipos de mutação: *jump* e *creep*, tal como recomendado por Carroll (2001). A taxa de cruzamento utilizada foi de 70% e a de mutação, para cada tipo de mutação, é a metade do inverso do número de indivíduos adotados para a população.

Testaram-se dois tamanhos diferentes de população: 5 e 50 indivíduos; e 7 diferentes números de pontos de controle (1, 2, 3, 5, 6, 9 e 18). O critério de convergência utilizado está mostrado na tabela 1.

Tabela 1- Critérios de Convergência Utilizados para Calibração da Rede proposta por Tucciarelli *et al.* (1999).

<b>CRITÉRIOS PARA PRESSÃO</b>
(1) 85% das medidas de campo devem estar dentro do intervalo de +/- 0,2 m.
(2) 95% das medidas de campo devem estar dentro do intervalo de +/-0,3 m.
(3) 100% das medidas de campo devem estar dentro do intervalo de +/- 0,5 m.

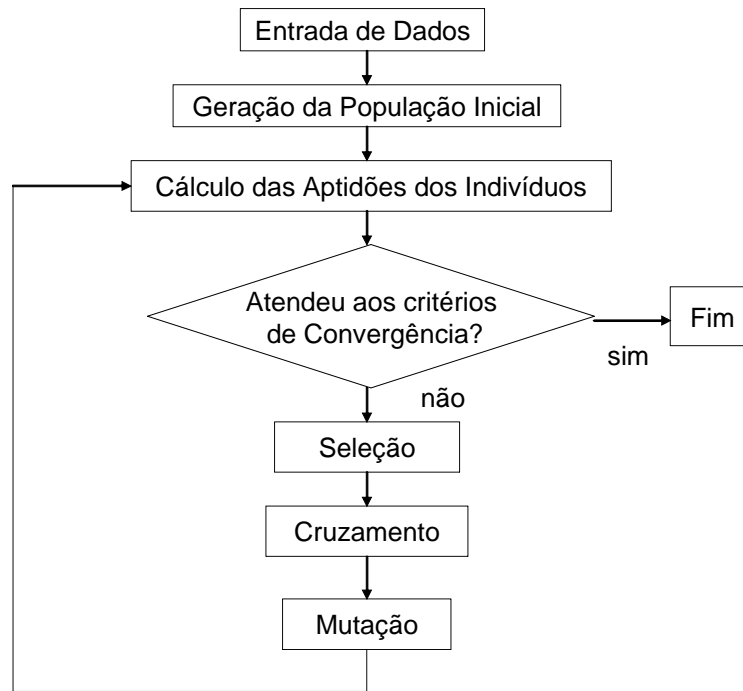


Figura 1 – Fluxograma Simplificado do Modelo de Calibração propostos por Neves (2007).

Os parâmetros calibrados foram a resistência em cada tubulação. Essa variável foi utilizada por incorporar o fator de atrito e o diâmetro. Para cada variável foram adotadas 16 possibilidades diferentes de valores, definidos entre o mínimo e o máximo para cada trecho. Esses limites são definidos para cada trecho e dependem além do fator de atrito, dos valores do diâmetro de cada tubulação. Para estimar esses limites máximos e mínimos, considerou-se como possível uma redução de até 5% no diâmetro  $D$  por envelhecimento e incrustações e escolheu-se como limites máximos e mínimos do fator de atrito  $f$  os valores 0,08 e 0,01. Utilizando-se a equação 1 e considerando os valores de fator de atrito citados, temos a resistência mínima quando o fator de atrito for 0,01 e diâmetro máximo, e a resistência máxima, quando o fator de atrito for 0,08 e o diâmetro for mínimo.

$$R = \frac{8f}{\pi^2 g D^5} \quad (1)$$

Onde:  $R$  = resistência do trecho;  
 $g$  = gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>).

O valor da aptidão de cada indivíduo no programa CALIBRA é igualada ao valor da função objetivo cuja formulação é mostrada na equação 2.

$$F.O. = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\xi + |P_{i-medido} - P_{i-calculado}|} \quad (2)$$

Onde:  $P_{i-medido}$  = Pressão medida no ponto de controle  $i$ ;

$P_{i-calculado}$  = Pressão calculada no ponto de controle  $i$ ;

$\xi = 0$ , se a diferença entre  $P_{i-medido}$  e  $P_{i-calculado}$  for diferente de zero, e igual a um valor “pequeno” (0,0000000001), se a diferença entre  $P_{i-medido}$  e  $P_{i-calculado}$  for igual a zero.

A rede de distribuição de água utilizada para analisar esses parâmetros do AG foi a proposta por Tucciarelli *et al.* (1999) e representada pela figura 2. Ela é composta por 18 nós e 25 trechos e os dados dos trechos e dos nós estão contidos nas tabelas 2 e 3.

Depois de calibrada a rede com todas as variações de semente, número de pontos de controle e número de indivíduos por geração, foram calculados os erros médios e verificado o erro máximo para cada resultado em relação aos dados de pressão. Para os resultados de resistência, optou-se pelo cálculo da correlação e da porcentagem de variação entre os valores de resistência calculados e “reais”.

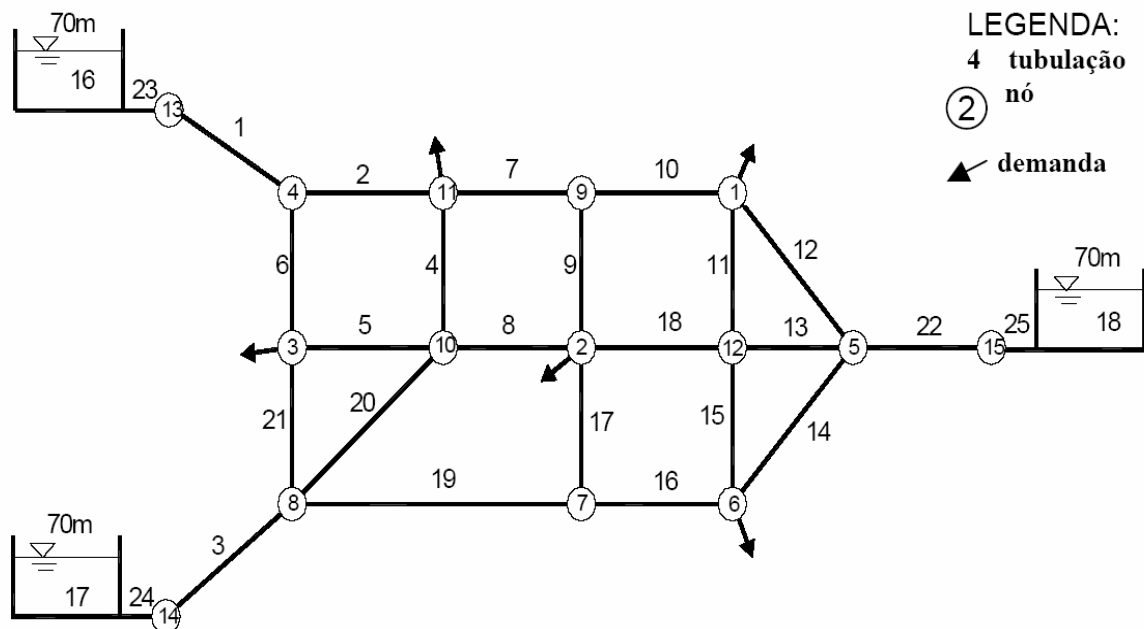


Figura 2 - Rede hipotética utilizada para verificação do algoritmo (Tucciarelli *et al.*, 1999).



Tabela 2 - Dados das tubulações.

Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)
1	500	1000
2	250	500
3	500	1000
4	150	500
5	150	500
6	250	500
7	250	500
8	150	500
9	150	500
10	250	500
11	150	500
12	250	560
13	250	250
14	250	560
15	150	500
16	250	500
17	150	500
18	150	500
19	250	500
20	150	700
21	250	500
22	500	500
23	500	1
24	500	1
25	500	1

Tabela 3 - Cota geométrica e consumo/abastecimento nos nós.

Nó	Cota do Terreno (m)	Consumo (l/s)
1	25	-30
2	20	-40
3	22	-25
4	27	0
5	30	0
6	27	-60
7	22	0
8	25	0
9	25	0
10	20	0
11	22	-35
12	27	0
13	25	0
14	25	0
15	30	0
16	25	0
17	25	0
18	30	0

A tabela 4 mostra quais os pontos de controle adotados para cada caso.

Tabela 4 – Identificação dos Pontos de Controle para cada Simulação.

<b>Número dos Pontos de Controle</b>	<b>Identificação dos Pontos de Controle</b>
1	3
2	3, 5
3	3, 5, 7
5	1, 3, 5, 7, 11
6	1, 3, 5, 7, 9, 11
9	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17
18	todos

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apesar de ter-se simulado vários valores de semente, optou-se por apresentar neste trabalho só os resultados obtidos para a semente de valor -1000, como exposto pela tabela 5. Entretanto, é importante registrar que se observou variações entre os resultados obtidos para várias sementes, mesmo quando o problema apresentava o mesmo número de pontos de controle, conforme apresentado em Neves *et al.* (2007).

A tabela 5 apresentam os valores de aptidão média da última população gerada pelo programa CALIBRA, a aptidão do melhor indivíduo, aptidão do indivíduo escolhido (solução), o número de gerações necessárias até encontrar uma solução para o problema, o número de cálculos completos feitos pelo programa, o erro médio obtidos para os dados de pressão, em metros, analisada a solução escolhida, o máximo erro obtido para os dados de pressão, em metros, analisando a solução escolhida, a correlação entre os valores de resistência reais e calculadas e a porcentagem de variação das resistências reais e aquelas obtidas pela solução final. Essas duas tabelas se diferenciam apenas pelo número de indivíduos em cada geração, sendo 5 para os dados da tabela 5 e 50 para a tabela 6.

Quanto ao tamanho da população, é importante observar que o número de cálculos necessários para atingir uma solução possível pode não ser necessariamente maior quando o tamanho da população é maior, isso porque o número de gerações para populações menores é maior que para a população menor. Isso indica que há necessidade de realizar uma análise prévia para definir o número de indivíduos que levará à otimização do algoritmo quanto ao número de cálculos realizados.

Percebe-se pelos dados da tabela 6 que, de modo geral, o erro médio diminui com o aumento dos pontos de controle. Isso indica que a redução do erro é dependente além do número de pontos de controle, da escolha dos pontos controle. Apesar do aumento de precisão com relação à pressão nos nós não foi observada uma boa correlação entre as resistências reais e calculados, verificando até uma diminuição dos valores de correlação entre esses parâmetros. Esses resultados podem ser

uma indicação de que a forte não linearidade do problema pode levar à múltiplas soluções viáveis, o que leva a problemas quanto à unicidade da resposta.

Tabela 5 – Tabela Resumo das Simulações para População com 5 Indivíduos.

Número de Indivíduos	Variáveis	Número de Pontos de Controle						
		1	2	3	5	6	9	18
5 Indivíduos	Aptidão Média	2.96	6.12	19.93	76.15	883.28	10000086101.48	30000024478.72
	Aptidão do Melhor Indivíduo	10.41	12.46	38.31	154.76	4077.98	10000156549.30	30000036559.66
	Aptidão do Indivíduo Escolhido	10.41	12.46	32.31	26.27	140.51	10000112686.47	30000020951.18
	Número de gerações	1	1	4	8	33	31	18
	Número de cálculos	5	5	20	40	165	155	90
	Erro Médio (Pressão-m)	0.94	1.42	0.56	0.47	0.19	0.47	0.13
	Erro Máximo (Pressão-m)	3.33	5.94	2.52	2.91	0.55	4.85	0.45
	r	0.23	0.23	0.47	0.56	0.49	0.54	0.19
Variação (%)	5.22	5.22	21.74	30.96	24.39	29.10	3.72	
50 Indivíduos	Aptidão Média	4.59	13.90	15.87	149.04	162.03	10000060076.00	29404152256.86
	Aptidão do Melhor Indivíduo	43.32	63.13	63.84	1895.01	1909.00	10000329659.16	30173371154.52
	Aptidão do Indivíduo Escolhido	43.32	63.13	32.97	104.77	65.99	10000094941.12	30000401492.03
	Número de gerações	1	1	1	4	5	7	12
	Número de cálculos	50	50	50	200	250	350	600
	Erro Médio (Pressão-m)	0.79	0.50	0.38	0.20	0.27	0.31	0.20
	Erro Máximo (Pressão-m)	2.98	4.68	1.36	0.74	1.61	1.72	2.46
	r	0.49	0.67	0.56	0.17	0.18	0.21	0.56
Variação (%)	24.13	44.89	31.76	2.80	3.11	4.51	31.33	

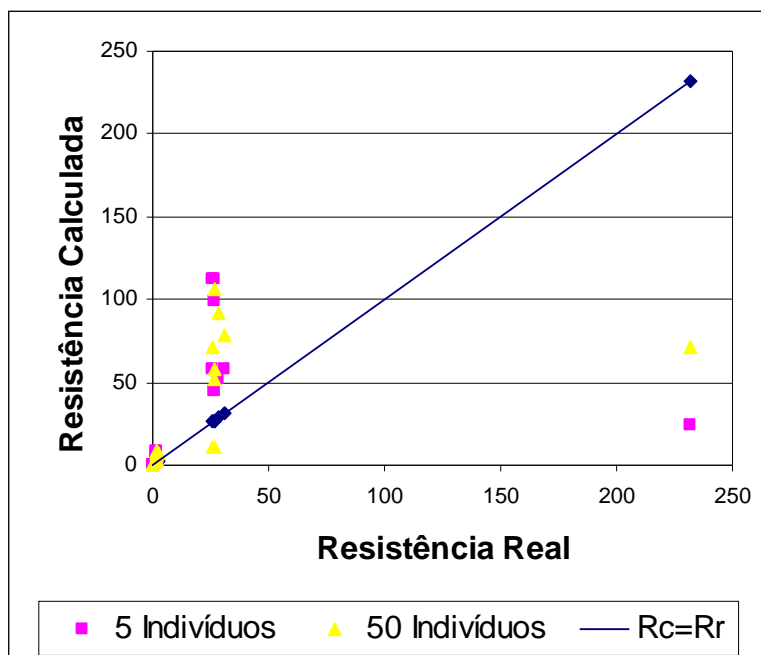


Figura 3 - Visualização Gráfica da Correlação entre os Dados de Resistência Real e Calculadas para Simulação com 1 ponto de Controle.

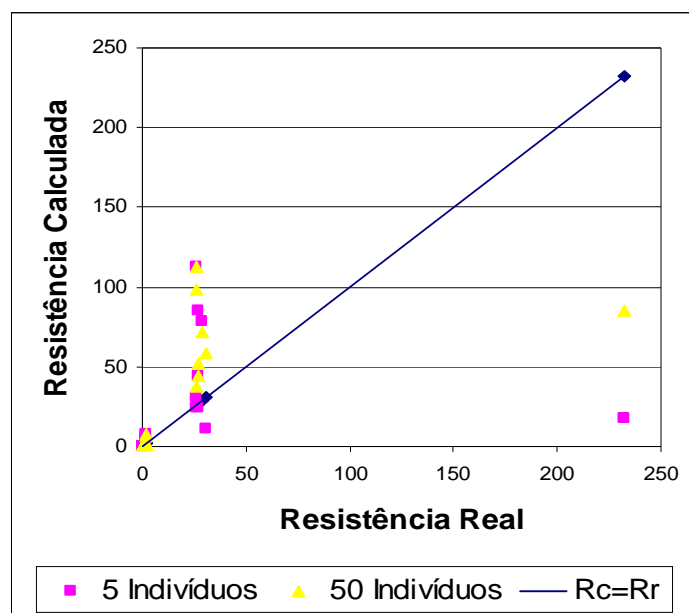


Figura 4 - Visualização Gráfica da Correlação entre os Dados de Resistência Real e Calculadas para Simulação com 18 pontos de Controle.

Os gráficos das figuras 3 e 4 ilustram a falta de equivalência entre os valores de resistência reais e calculadas. Se os valores fossem coincidentes, os pontos plotados nos gráficos coincidiriam com a reta a 45° nos gráficos.

## 5 – CONCLUSÕES

A escolha de diferentes parâmetros dos algoritmos genéticos leva a simulações mais ou menos eficientes, indicando que se deve ter um cuidado ao se definir os valores dos parâmetros genéticos.

O aumento nos pontos de controle não necessariamente conduz a um resultado melhor, podendo a qualidade da calibração estar relacionada com a localização dos pontos de controle e de outros fatores não identificados neste trabalho. O problema de identificação de parâmetros de uma rede de abastecimento de água da forma realizada não possui uma solução única, em função da característica de um problema fortemente não linear.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ pela bolsa de mestrado.

## BIBLIOGRAFIA

CARROLL, D.L. (2001). Programa ga170.

COVAS, D. E RAMOS, H. (2001). “Hydraulic Transients used for Leakage Detection in Water Distribution System”. *4th International Conference on WATER PIPELINE SYSTEMS*, BHR group, Managing Pipeline Assets in an Evolving Market York. Publicação com referência internacional.

UK: 28-30 March 2001. Disponível em <[www.civil.ist.utl.pt/~hr/BHR01-03-28\\_DC-HR\\_.pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~hr/BHR01-03-28_DC-HR_.pdf)>. Acessado em 17/abr. de 2006.

ENGINEERING AND PHYSICAL SCIENCE RESEARCH COUNCIL (2001). “inverse Transient Analyses in Pipe Network for Leakage Detection, Quantification and Roughness Calibration”. Final Report. University of Exeter.

GRECO, M. E GIUSEPPE, D.G. (1999). “New Approach to Water Distribution Network Calibration”. *Journal hydraulic Engineering*, 125 (8), 849-854.

LACERDA, E.G.M. E CARVALHO, A.C.P.L.F. (1999). “Introdução aos Algoritmos Genéticos”. In: GALVÃO, C. DE O. E VALENÇA, M.J.S. (orgs). *Sistemas Inteligentes*. ABRH, Porto Alegre, Brasil, 99-150.

MOURA, A.N.; ANDRADE, J.G.P. DE E LUVIZOTTO JUNIOR, E. (2001). “Compartilhamento de Dados entre Sistema de Informação Geográfica e Modelos de Simulação Hidráulica”. *Anais do III Encuentro de Las Águas*, Santiago - Chile, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2001. Disponível em <[http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos\\_rojo/TC-102.htm](http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_rojo/TC-102.htm)>. Acessado em 17/mar. de 2006.

NEVES, C.L.; KOIDE, S.; VASCONCELOS NETO, J.G. (2007). Calibração Automática de redes de Distribuição de Água. *Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Belo Horizonte-MG, Brasil, 8p, em impressão.

NEVES, C. L. (2007). *Calibração de Parâmetros de Modelos de Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água para Estudos de Operação de Rede*. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental: Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, em impressão.

SAVIC, D.A. E WALTERS, G.A. (1997). “Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123 (2), 67-76.

SOARES, A.K. (2003). *Calibração de modelos de Sistemas de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 153p.

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A. E TERMINI, D. (1999). Leak Analyses in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 277-285, Mar.

WALSKI, T.M.; CHASE, D.V. E SAVIC, D.A. (2001). *Water Distribution Modeling*. Haestad Methods, 1ª Edição, Waterbury, Connecticut, EUA, 441p.

WANDERLEY, R.M. (1997). *Localização Ótima de Pontos de Amostragem em Redes de Distribuição de Água*. Projeto Final de Estágio Supervisionado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 62p.