

**INVESTIGAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ALGORITMOS GENÉTICOS (AGS)
APLICADOS AO PROBLEMA INVERSO DE OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE
CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA
ABASTECIMENTO**

Fernando das Graças Braga da Silva

Departamento de Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo – EESC
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Cep:13560-250 – São Carlos – S.P., Brasil
fernandos2001@bol.com.br

Luisa Fernanda Ribeiro Reis

Departamento de Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo – EESC
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Cep:13560-250 – São Carlos – S.P., Brasil
fernanda@sc.usp.br

Alexandre Kepler Soares

Departamento de Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo – EESC
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Cep:13560-250 – São Carlos – S.P., Brasil
alexandrekepler@yahoo.com.br

***Resumo.** As técnicas de programação evolucionária vêm ganhando popularidade em diversas aplicações da engenharia em todo o mundo nos últimos anos. Os Algoritmos Genéticos (AGs) são os mais conhecidos algoritmos dessas técnicas e foram desenvolvidos por Rechenberg (1973), na Alemanha, em paralelo com Holland (1975) e seus colaboradores nos E.U.A. Os AGs baseiam-se na seleção natural e genética populacional, onde são observados mecanismos como a sobrevivência e reprodução preferenciais dos indivíduos (soluções do problema em questão) mais aptos da população (conjunto de soluções), na manutenção de uma população com diversos membros, na herança de informação genética dos pais e na mutação ocasional dos genes (característica de uma solução). Os algoritmos genéticos foram aqui utilizados como ferramentas para resolução do problema inverso de calibração de redes de distribuição de água para abastecimento, em um estudo de caso real. Enfoca-se neste trabalho o estudo da eficiência da aplicação dos AGs considerando diferentes formas de implementação do algoritmo ao problema, no que se refere principalmente ao estudo de operadores de AGs mais eficientes.*

***Palavras Chave:** algoritmos genéticos, calibração, redes de distribuição de água reais*

1. INTRODUÇÃO

Os Algoritmos Genéticos, são provavelmente o tipo mais conhecido de programação evolucionária. A evolução natural ocorre nos cromossomos, que são elementos microscópicos das células nucleares os quais transmitem informações hereditárias através dos genes. De acordo com a terminologia dos AGs, um cromossomo (indivíduo), referido como *string*, representa uma possível solução para o problema em mãos. Cada *string* é formado por uma série de caracteres ou traços, análogos aos genes biológicos, representando as variáveis de decisão através de códigos. Assim a população de cromossomos representa um conjunto de possíveis soluções do problema. Os AGs evoluem a partir de uma população inicial de *strings* (soluções) geralmente produzidas aleatoriamente.

A aplicação repetida de operadores genéticos busca soluções eficientes para o problema em estudo, ou seja, aquelas com valores maiores para a função de aptidão são mantidas enquanto as de valores menores são descartadas. As vantagens dos AGs sobre os métodos de busca tradicionais incluem o fato de que eles retêm uma amostra “bem adaptada” da população, durante a busca do ótimo global. Tais algoritmos consideram regras probabilísticas de transição de um conjunto de soluções para outro, e tem a flexibilidade de admitir funções objetivo (ou de aptidão) complexas, descontínuas ou que não possuam derivadas.

Os AGs geralmente compreendem três operadores: reprodução, recombinação ou cruzamento e mutação. A reprodução é o processo através do qual *strings* são copiados na próxima geração de acordo com o valor da função de aptidão correspondente, através de um processo de seleção que privilegia a sobrevivência das melhores soluções. Na sua forma mais simples o cruzamento realiza a troca parcial de segmentos correspondentes entre dois *strings* pais produzindo dois *strings* filhos. A mutação é a degeneração ocasional dos valores, permitindo a introdução de novas características às populações.

A aplicação de AGs envolve a escolha apropriada do código de representação das variáveis de decisão do problema. Apesar das diversas possibilidades de codificação, Goldberg (1989) sugeriu que o desempenho dos AGs é ótimo quando a codificação binária é empregada. Entretanto muitos problemas requerem representações diferentes, incluindo a codificação em números reais para as variáveis de decisão.

Simpson et al. (1994), Mckinney & Lin (1994), Reis et al. (1997) e Ritzel & Eheart (1994) são exemplos de estudos que aplicaram AGs com sucesso para resolver problemas complexos de recursos hídricos. Outros trabalhos seguiram-se a estes e são descritos no item 2.

Destaca-se que a implementação dos AGs pode ser realizada das mais variadas maneiras, assim, o objetivo deste trabalho é a aplicação da sistemática dos AGs para o problema inverso de calibração de redes de distribuição de água para abastecimento discutindo os principais resultados obtidos a partir das diferentes formas de implementação, sendo o modelo de inverso de calibração utilizado foi proposto por Silva (2003).

2. BREVE REVISÃO DE MODELOS DE CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Pode-se dizer que os procedimentos de calibração de redes de distribuição de água podem ser divididos basicamente em 3 categorias: iterativos, explícitos ou diretos e implícitos ou inversos.

O procedimento iterativo geralmente é baseado em tentativa e erro. Os parâmetros de calibração são avaliados a cada iteração usando comparações entre pressões e vazões medidas

e simuladas. Os principais trabalhos que adotaram tal procedimento foram Walski (1983) e (1986) e Bhave (1988).

Os métodos explícitos, também chamados analíticos ou diretos, resolvem um conjunto de equações que descrevem o comportamento hidráulico da rede. Eles foram empregados por autores como Ormsbee & Wood (1986), Boulos & Wood (1990) e Ferreri et al. (1994).

Os procedimentos implícitos, mais conhecidos como métodos inversos, realizam a estimativa de valores para os parâmetros a partir da minimização dos desvios entre os valores simulados hidráulicamente e dados correspondentes observados de pressão e ou vazão.

A Figura 1 ilustra o esquema geral do processo de inverso de calibração, onde se mostra a comparação entre respostas observadas e calculadas pelo modelo. Se as diferenças entre os valores atenderem a critérios previamente estabelecidos, considera-se o modelo calibrado. Em caso contrário, modificam-se os parâmetros e obtêm-se novas respostas calculadas para serem comparadas.

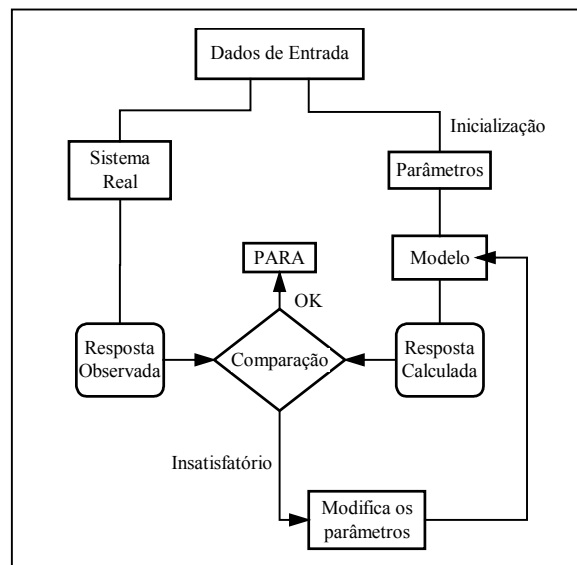


Figura 1 - Esquema geral de calibração via modelos inversos

A calibração de redes de distribuição de água para abastecimento pode ser realizada em termos de parâmetros como diâmetros e comprimentos dos trechos, demandas nos nós, rugosidades, embora a maior parte dos trabalhos reportados na literatura considerem apenas este último parâmetro.

A cada conjunto de parâmetros, o modelo fornece como respostas valores para grandezas que normalmente são vazões nos trechos e pressões nos nós da rede, os quais devem ser aproximados ao máximo das medidas realizadas em campo.

Diversos trabalhos já foram realizados usando o método inverso para calibração, tais como Ormsbee (1989), Ligget & Chen (1994), Vitkovsky & Simpson (1997), Walters et. al (1998), Silva (2003) e Soares (2003), destaca-se que somente em trabalhos mais recentes verifica-se a preocupação com a inclusão de vazamentos.

3. EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA INVERSO DE CALIBRAÇÃO

Conhecidas as leis que regem o fenômeno do escoamento hídrico no interior das redes de distribuição de água para abastecimento pode-se prever o seu comportamento em termos das

pressões e vazões. As finalidades são diversas, dentre as quais a operação racional de tais sistemas visando garantir o atendimento das demandas sob níveis de pressões aceitáveis.

Tais previsões serão, entretanto, tão realísticas quanto forem os valores de parâmetros da rede como: comprimentos, diâmetros, rugosidades dos condutos e demandas, usados pelo modelo matemático de avaliação hidráulica adotado. Dentre os parâmetros já relacionados, as demandas e as rugosidades estão sujeitas a variações ao longo do tempo. As variações de demanda são devidas à variação populacional e, portanto, mais previsíveis. Já as rugosidades só podem ser determinadas através dos modelos de calibração ou testes de campo, sendo estes últimos considerados dispendiosos. O problema inverso de calibração, ou seja, de determinação de parâmetros através da minimização dos desvios entre valores produzidos via simulação hidráulica e dados de pressão e vazão observados em campo, pode ser expresso através maximização da seguinte função objetivo (F.O), no caso a própria função de aptidão:

$$FO = \left\{ \sum_{k=1}^C \left\{ w_H^{(k)} \cdot \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{sim\ i} - P_{obs\ i}}{[\sum_{i=1}^N P_{obs\ i}] / N} \right]^2 + w_Q^{(k)} \cdot \sum_{j=1}^M \left[\frac{Q_{sim\ j} - Q_{obs\ j}}{[\sum_{j=1}^M Q_{obs\ j}] / M} \right]^2 \right\} \right\}^{-1} \quad (1)$$

sendo: P – carga de pressão (m)

Q – vazão (L/s)

N - conjunto de pontos de observação de valores de pressão

M - conjunto de pontos de observação de valores de vazão

C - número de condições de demanda ou dias de observação

w_H, w_Q – pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão

sim, obs - denotam valores simulados e observados, respectivamente

K - padrões de demanda ou dias de observação

Basicamente, a F.O. a ser maximizada constitui o inverso da soma dos quadrados das diferenças adimensionalizadas entre valores de pressões e vazões simulados e observados, multiplicados pelos respectivos pesos atribuídos à cada uma das grandezas, definidos de acordo com a importância dada a respectivo parâmetro a ele atribuído.

A formulação do modelo hidráulico das redes necessária para avaliação dos valores simulados geralmente envolve a equação da continuidade para cada nó da rede e a equação da energia para cada trecho (ligação entre nós consecutivos), cuja solução em termos de vazões e pressões é buscada através de técnicas numéricas tais como linearizações sucessivas. O presente estudo inclui também os vazamentos explicitamente no modelo, cujos detalhes podem ser examinados em Jowitt & Xu (1990).

O problema de calibração foi posto como de determinação das rugosidades dos trechos da rede. Visando reduzir o número de variáveis de decisão do problema, as tubulações foram agrupadas em setores de acordo com as características idade e material que influenciam diretamente as rugosidades. Definindo-se, como variáveis de decisão do problema as rugosidades de cada setor.

Além disso, em acordo com o trabalho original de Silva (2003), permitiu-se que um número pré-determinado de trechos com valores de rugosidades superiores aos dos setores a que pertencem, representando a presença de peças tais como válvulas. Para melhor conduzir a busca dessas peças, foram atribuídas probabilidades de existência de peças nos trechos em conformidade com as informações contidas nos registros da companhia de abastecimento de

água. Tais probabilidades foram utilizadas tanto na geração das populações iniciais de soluções como pelo operador de mutação.

Desta forma, o respectivo problema apresenta como variáveis de decisão rugosidades e localização de trechos dotados de peças.

O problema de calibração seria determinado se fosse possível monitorar a pressão em todos os nós da rede e vazão em diversos trechos. Entretanto, a disponibilidade de equipamentos de medida de pressão e vazão é limitada, no caso de a 8 e 2 unidades respectivamente.

Com o objetivo de reduzir o grau de indeterminação do problema, foi adotada a sistemática de rodízio de pontos de monitoramento, ou seja foram coletados 5 conjuntos de dados de pressão em nós distintos. Embora cada conjunto tivesse sido monitorado durante intervalos de tempo distintos na escala de tempo, admite-se que eles sejam complementares entre si.

4. FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO UTILIZADA: ALGORITMOS GENÉTICOS

4.1 Algoritmos e operadores genéticos

De acordo com Reis & Akutsu(2002) citado por Silva & Reis (2002) pode-se fazer uma sucinta discussão sobre os AGs. Os algoritmos genéticos simples podem ser classificados basicamente em: geracionais, geracionais elitistas e *Steady State*. Para todos os tipos de AGs, uma população inicial de NPOP indivíduos é gerada aleatoriamente. Nos AGs geracionais, uma nova população é construída e avaliada a cada geração substituindo a anterior. Os AGs geracionais elitistas asseguram que um determinado número (IPOP) de melhores indivíduos da geração anterior sejam mantidos na próxima. Nos AGs *Steady State* IPOP constitui parcela pequena da população de indivíduos. Assim, todos os indivíduos são avaliados apenas na primeira geração. A partir da segunda, apenas os indivíduos novos têm seus valores de aptidão avaliados, agilizando bastante o algoritmo, principalmente quando avaliação da função objetivo implica em tempo de processamento computacional elevado, como o caso de avaliação hidráulica de rede de distribuição de água.

Os AGs geralmente compreendem os operadores: seleção, cruzamento ou recombinação e mutação, cuja descrição sucinta é apresentada a seguir:

4.2 Seleção

A seleção é o operador genético que determina os indivíduos a sofrerem cruzamento e mutação a cada geração. Diversos são os mecanismos de seleção reportados na literatura. Um tipo de seleção muito utilizado é a roleta, também conhecido como amostragem estocástica com substituição. Observa-se que dessa maneira indivíduos representantes de valores de baixa aptidão podem ser selecionados. Uma seleção bem conhecida é a roleta proporcional que difere apenas na roleta, pelo fato de a probabilidade do indivíduo ser selecionado definir o número de cópias deste indivíduo para a próxima geração ou iteração de AG.

Outras técnicas são utilizadas como a seleção aleatória uniforme (Uniform Random), em que os indivíduos pais são escolhidos de forma randômica para a reprodução. A seleção tipo torneio faz os indivíduos competirem diretamente com base nos respectivos valores da função de aptidão. Uma maneira simples de implementá-lo é escolher aleatoriamente 2 ou 3

indivíduos e preservar o melhor deles para a próxima geração, repetidamente até que uma nova geração seja formada.

Diversas são as propostas para uma escala dos valores de aptidão na população. Dentre elas destaca-se a escala linear, fazendo que o melhor valor de aptidão assuma um valor a vezes superior à média e o valor menor $1/a$ vezes menor que a média da população. Essa sistemática evita a reprodução excessiva e conseqüente rápida convergência para um eventual grande valor de aptidão das gerações iniciais, quando tais valores podem ser distintos. Ao mesmo tempo, possibilita que as pequenas diferenças nos valores de aptidão sejam acentuadas próximo da convergência para um ótimo local, quando tais diferenças tornam-se muito pequenas (Meier & Barkdoll, 2000).

4.3 Cruzamento ou Recombinação

O cruzamento é o mecanismo através do qual são promovidas transferências de características genéticas dos indivíduos pais, na criação dos novos indivíduos (filhos).

Dentre as sistemáticas mais usuais pode-se citar o cruzamento de um ponto, dois e uniforme.

No cruzamento de 1 ponto, o ponto aleatório 1 é escolhido, deste ponto em diante, o pai 1 troca informações com o pai 2, formando assim os filhos 1 e 2. No cruzamento com dois pontos, define-se 2 pontos de corte entre o casal selecionado para o cruzamento. As informações contidas entre esses pontos de corte são trocadas pelo casal, formando assim os dois novos filhos.

Já o cruzamento uniforme prevê que genes individuais sejam considerados na troca de informações para criação de novos indivíduos, ao invés de blocos de genes.

4.4 Mutação

O operador mutação é responsável pela introdução de material genético novo para a população de soluções através da eventual substituição de genes dos indivíduos. Geralmente é realizada bit por bit (no caso de código binário) ou gene por gene (código real).

De acordo com Wardlaw & Sharif (1999) as duas aproximações básicas para mutação utilizando código real (adotado no trabalho), são mutação uniforme e não uniforme.

A mutação uniforme é realizada de forma que cada elemento ou gene de um *string* possui exatamente a mesma chance de sofrer mutação. A mutação não uniforme é um dos operadores responsáveis pelo refinamento das soluções, através de incrementos controlados nos valores das variáveis de decisão de acordo com a geração.

5. IMPLEMENTAÇÃO DOS AGs

5.1 Fluxograma do algoritmo básico utilizado

Na Figura 2 apresenta-se uma representação do AG geracional básico implementado mostrando os operadores genéticos. A partir deste esquema geral, procederam-se mudanças que resultaram nas discussões apresentadas no item de resultados.

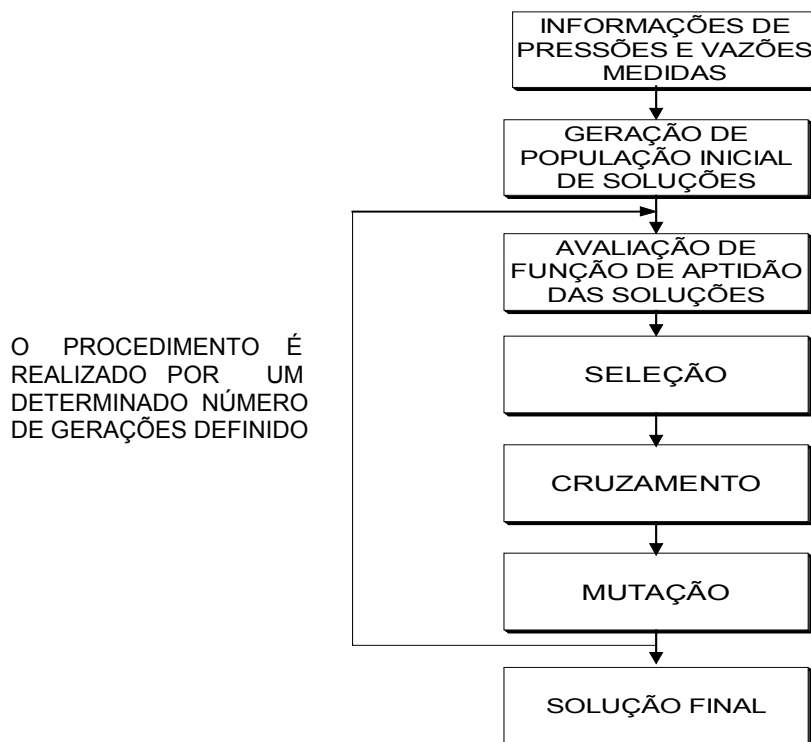


Figura 2 – Algoritmo genético geracional básico implementado

5.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO BÁSICO UTILIZADO

- Algoritmos genéticos:

- Geração da população inicial de soluções: uma população inicial de soluções é gerada aleatoriamente;
- Tipo de AG: Geracional;
- Variáveis de decisão: rugosidades de trechos, as tubulações foram agrupadas em setores de acordo com as características idade e material;
- Seleção: Roleta;
- Recombinação : simples de dois pontos com 95% e Mutação: uniforme por gene com probabilidade de 5%

- Cadeia representativa da solução

A quantidade de acessórios foi definida com base em informações cadastrais fornecidas pelo serviço de água local e restrita a 25 (n=25 Figura 3).

Rugosidade Sctr 1	Rugosidade Sctr 2	Localização Acessório1	Rugosidade Acessório1	Localização Acessório n	Rugosidade Acessório n
-------------------	-------------------	------------------------	-----------------------	-------	-------------------------	------------------------

Figura 3 – Cadeia representativa de solução correspondente ao estudo

Propriedades gerais do modelo:

- Parâmetros ajustados: vazão e pressão;

- Variáveis de decisão: rugosidades de trechos da rede atribuídas a setores e algumas rugosidades de maiores valores atribuídas a elementos hidráulicos ou eventuais obstáculos que provoquem perda de carga localizada.;
- Os vazamentos foram considerados de forma explícita no modelo e
- O modelo busca através de simulações fazer a separação entre consumos e vazamentos.
- **Aplicação**: A aplicação foi realizada para um setor de rede real da Cidade de São Carlos denominado “Monte Carlo”, S.P, composta de 58 nós, 83 trechos e uma estimativa de aproximadamente 5000 habitantes.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da rotina básica implementada, foram investigadas então diversas variantes no sentido de melhorar a eficiência da referida rotina, sendo variada uma característica de cada vez, sendo os principais resultados obtidos mostrados a seguir.

As análises comparativas foram realizadas a partir dos valores das funções de aptidão, pois os valores das diferenças entre pressões e vazões calculadas e medidas são diretamente ligados às aptidões. Os resultados das variáveis de decisão (as rugosidades dos trechos da rede) são também apresentados, entretanto tratando-se de redes existentes, os valores das rugosidades reais não são disponíveis para comparação, sendo necessária principalmente uma comparação dos resultados obtidos através de simulações a partir de populações iniciais aleatórias distintas e análise estatística.

6.1 Implementação do elitismo

A primeira comparação realizada a partir dos foi com relação aos resultados obtidos a partir da implementação do elitismo, que consiste na garantia de que as melhores soluções não se percam durante o processo de busca, permanecendo nas novas iterações de AG. No caso assegurou-se que 5 (IPOP) soluções fossem mantidas na próxima iteração de AG.

A definição do número de melhores soluções IPOP foi determinada a partir de testes com diferentes valores. Foram testados IPOP com valores de 1 e 5 sendo, adotado o último valor, que conduziu as melhores respostas. Ressalta-se ainda que IPOP não deve ter seu valor muito elevado para o problema não assumir uma natureza aleatória.

A evolução do valor da função de aptidão é ilustrada na Figura 4, que mostra o desempenho superior da evolução da função de aptidão com a implementação de elitismo.

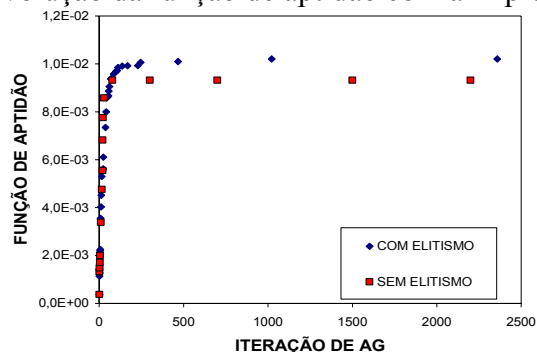


Figura 4 - Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com e sem a implementação do elitismo

6.2 Logaritmos das variáveis de decisão

O uso dos logaritmos (base 10) das variáveis de decisão (rugosidades) tem o objetivo de reduzir o espaço de busca, facilitando a determinação das variáveis de decisão do problema. Uma aplicação de logaritmos nas variáveis de decisão foi realizada por TUCCIARELLI et al. (1999).

A Figura 5 ilustra os testes comparativos realizados entre a implementação com e sem o uso de logaritmo das variáveis de decisão. Nota-se que, para o caso em estudo a utilização de logaritmos não produziu bons resultados. Observando a Figura 5 constata-se que o uso de logaritmos propiciou a convergência prematura produzindo, uma solução de qualidade inferior.

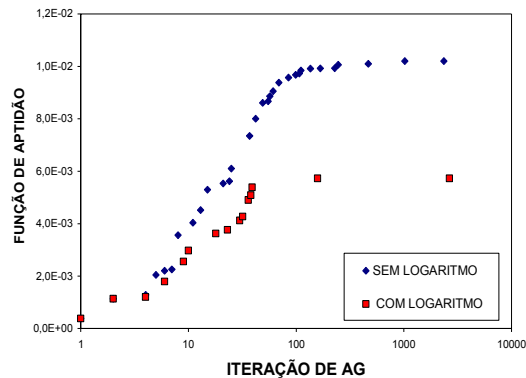


Figura 5 – Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com e sem a introdução de logaritmos as variáveis de decisão

6.3-) Comprimento da cadeia de características a serem trocadas

Cada cadeia representativa de uma solução possui uma quantidade de características de maneira a defini-la completamente.

Investigou-se um operador através do qual um número fixo ou variável e aleatório de características de uma solução sofria recombinação para dar origem a novas soluções, a partir de um ponto escolhido aleatoriamente.

A Figura 6 ilustra a variação da aptidão ao longo das iterações para as formas de implementação trocando-se um número fixo e variável de características das soluções. Observa-se que a alternativa com quantidade fixa leva pequena vantagem sobre a alternativa com quantidade de características variáveis aleatoriamente.

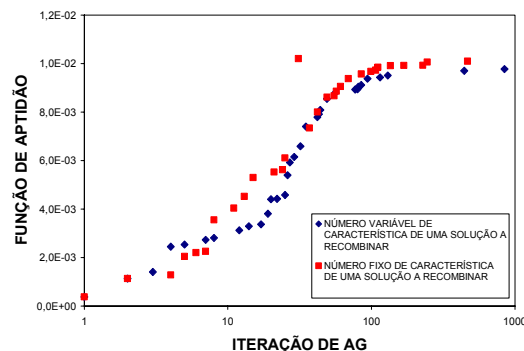


Figura 6 – Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com quantidades de características recombinadas fixas e aleatórias

6.4-) Testes com diferentes técnicas de seleção

A análise dos diversos tipos de seleção implementados para o problema em estudo foi feita basicamente em termos da função de aptidão. As Figuras 7 a 8 ilustram os resultados obtidos para as diferentes implementações do operador de seleção, com e sem elitismo. Observa-se que os valores de aptidões são melhores sempre com a implementação do elitismo, mais discretamente em se tratando de seleção por roleta (Figura 7b) e torneio (Figura 8a) e de forma mais acentuada para seleção aleatória (Figura 7a) e proporcional (Figura 8b).

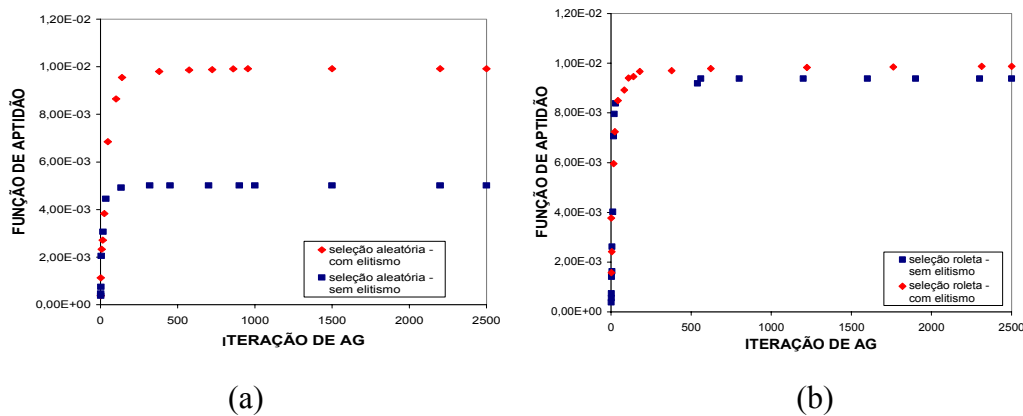


Figura 7 – Evolução da função de aptidão com e sem elitismo (a) seleção aleatória (b) seleção por roleta

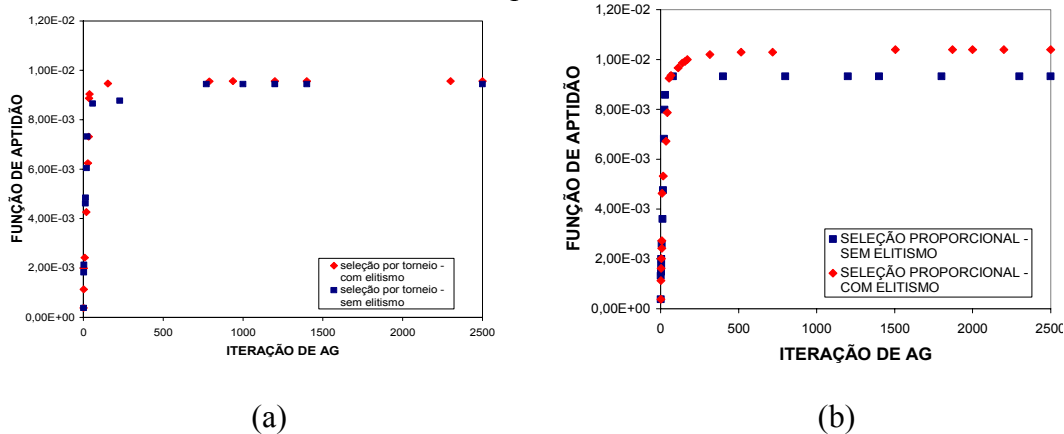


Figura 8 – Evolução da função de aptidão com e sem elitismo (a) seleção por torneio (b) seleção proporcional

A Figura 9 ilustra os resultados da evolução da função de aptidão relativa aos diversos tipos de seleção implementados. A de escolha de melhores soluções apresenta melhores resultados e a seleção aleatória os piores.

Em alguns casos o uso de seleção através da “escolha das melhores soluções” pode não ser conveniente pelo fato de que, ao selecionar sempre as melhores alternativas, pode-se desperdiçar muito “material genético”, ou seja, soluções pobres são descartadas, que

poderiam evoluir para uma boa solução. Entretanto, no caso, funcionou bem e produziu os melhores resultados.

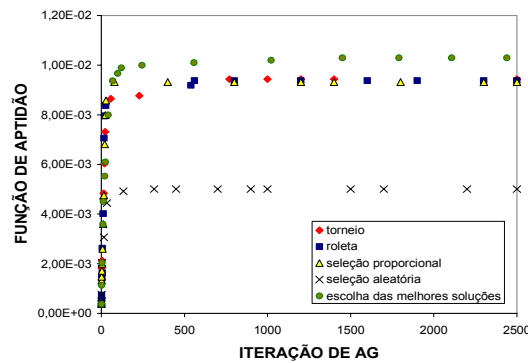


Figura 9 – Comparação da evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs para os diversos tipos de seleção implementados

6.5 Testes com diferentes técnicas de recombinação

Algumas das principais técnicas de recombinação foram implementadas, cujos resultados são mostrados pela Figura 10.

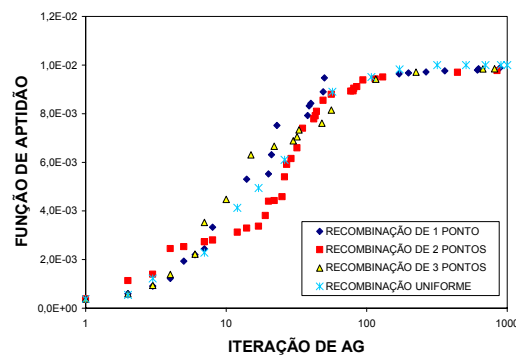


Figura 10 – Comparação da evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs para os diversos tipos de recombinação

Observa-se que para todos os tipos de recombinação analisados a evolução da função de aptidão é bastante parecida. Uma pequena melhoria foi obtida para a recombinação uniforme.

6.6 Testes com diferentes taxas de mutação

As taxas ou porcentagem de mutação (P_m) sugeridas na literatura geralmente são entre 1% e 5% ou proporcional ao número de características de cada solução ou número de genes.

Os testes realizados limitaram-se às probabilidades de mutação de 1% e 5% e 10%. A probabilidade não convencionalmente usada de 10% foi usada para se perceber o comportamento da função de aptidão quando se usa um valor extremo. É conhecido que as probabilidades de mutação elevadas podem fazer com que a busca assuma um caráter aleatório.

Os testes realizados sob diferentes taxas de mutação, conduziram a resultados muito parecidos conforme ilustrado na Figura 11. Observa-se que o comportamento da função de aptidão para as probabilidades de mutação de 10% apresentou um comportamento melhor nas

primeiras 10 iterações de AGs; a partir da iteração 100 o comportamento das funções de aptidão são praticamente coincidentes.

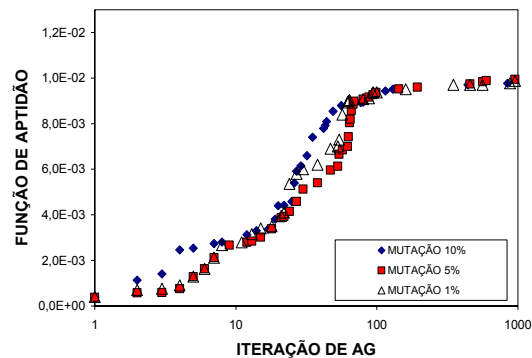


Figura 11 – Testes comparativos para diferentes taxas de mutação

Observa-se que os testes feitos com diferentes taxas de recombinação também conduziram aos mesmos valores de funções de aptidão, sendo desta forma mantido o valor de 95% indicado.

Na Tabela 1 são apresentados alguns resultados representativos dos obtidos relativos aos valores de pressões e vazões medidas e simuladas para os pontos de monitoramento da rede em estudo. Foram utilizadas 3 condições de demanda, nota-se que os maiores erros absolutos entre os valores medidos e simulados de pressão ocorrem para a condição de demanda média e os menores para a condição de demanda máxima.

Para as vazões, constata-se que o maior erro percentual ocorre para a condição de demanda mínima. O comportamento insatisfatório em algumas situações é justificado pelo uso de coeficientes de vazamentos da literatura.

Tabela 1. Resultados dos parâmetros pressão e vazão medidos e simulados

PONTO	CONDIÇÃO DE DEMANDA					
	MÁXIMA		MÉDIA		MÍNIMA	
	PRESSÃO MEDIDA (mH2O)	PRESSÃO SIMULADA (mH2O)	PRESSÃO MEDIDA (mH2O)	PRESSÃO SIMULADA (mH2O)	PRESSÃO MEDIDA (mH2O)	PRESSÃO SIMULADA (mH2O)
7	7,50	7,44	16,20	17,33	26,20	25,98
19	11,00	10,96	17,10	17,77	24,60	24,12
26	11,20	11,07	25,70	27,35	40,80	40,87
38	16,90	16,63	27,60	29,66	40,40	40,74
51	27,00	26,58	42,20	44,86	58,60	59,87
57	23,10	22,79	33,80	34,94	45,60	45,26

PONTO	CONDIÇÃO DE DEMANDA					
	MÁXIMA		MÉDIA		MÍNIMA	
	VAZÃO MEDIDA (L/s)	VAZÃO SIMULADA (L/s)	VAZÃO MEDIDA (L/s)	VAZÃO SIMULADA (L/s)	VAZÃO MEDIDA (L/s)	VAZÃO SIMULADA (L/s)
ENTRADA	17,83	17,82	13,06	13,05	6,79	7,67

Antes da setorização realizada os resultados obtidos para rugosidades para diferentes populações iniciais aleatórias de soluções distintas, eram bastante distintos. A seguir foi mostrados os resultados obtidos para as rugosidades com a introdução de setorização e os AGs *Steady State* foram usados para obtenção de respostas mais rápidas diante do estudo para diversas populações aleatórias. Na Figura 12 indica-se a frequência com que trechos de rugosidades superiores às dos setores a que pertencem foram identificados para diferentes populações aleatórias iniciais, rugosidades estas atribuídas à presença de eventuais acessórios da rede.

O exame da Figura 12 permite constatar que, das 25 peças inicialmente previstas, 19 ocorrem com frequência acima de 50% das populações aleatórias simuladas (pode-se considerar bons os resultados, pois 19 corresponde a 76% do total de 25 peças) e 12 peças com frequência de 70%.

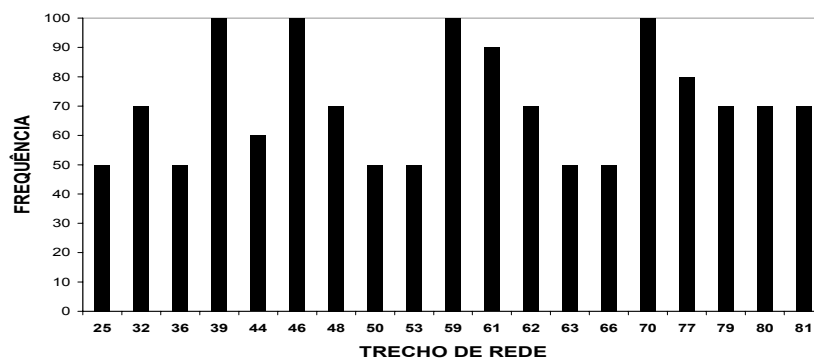


Figura 12 – Frequência de rugosidades com valores acima das atribuídas aos setores – Monte Carlo

Com a divisão da rede em dois setores, foram determinadas as respectivas rugosidades para cada um deles, sendo os resultados apresentados nas Figuras 13 e 14. Para o setor 1 (pvc) observa-se que as rugosidades variam de praticamente entre 0,06 mm e 0,08mm; pois somente duas populações produziram valores fora desta faixa (Figura 13). No setor 2 (ferro fundido) as rugosidades praticamente ficam entre 0,25mm e 0,70 mm; uma variação maior que a obtida para o setor 1, mas ainda considerada razoável (Figura 14).

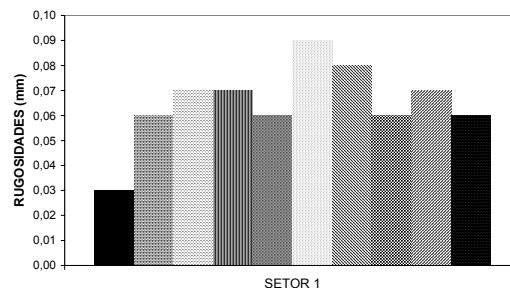


Figura 13 – Rugosidades atribuídas para o setor a partir de 10 populações iniciais aleatórias distintas – Setor 1

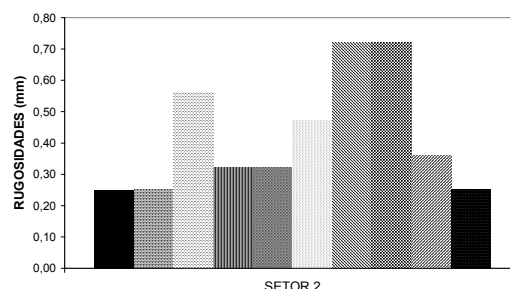


Figura 14 – Rugosidades atribuídas para o setor a partir de 10 populações iniciais aleatórias distintas – Setor 2

7. CONCLUSÕES

O trabalho trata de uma aplicação da modelo inverso de calibração de redes de distribuição de água proposto por Silva (2003), a um setor de rede real da Cidade de São Carlos- S.P. – Brasil; constituída de 58 nós de 83 trechos uma população estimada de 5000 habitantes. Este modelo utiliza como sistemática de otimização dos Algoritmos Genéticos

(AGs), sendo que o principal objetivo aqui proposto é de investigar a melhor forma de implementação do algoritmo de modo a produzir as melhores respostas. Desta forma seguem as conclusões dos principais resultados obtidos.

A utilização da sistemática do elitismo produziu os melhores resultados em todas as simulações realizadas; o uso de logaritmos aplicados as variáveis de decisão não demonstrou melhoria nos resultados, os resultados obtidos considerando-se as características a serem trocadas fixas foram os mesmos com a consideração aleatória de trocas, no estudo da seleção concluiu-se que a melhor opção foi a passagem das melhores soluções, com relação a recombinação ou cruzamento e mutação, ambos os tipos adotados conduziram aos mesmos resultados. Os valores de pressões e vazões observadas e simuladas demonstraram-se próximos para a maioria dos pontos e os valores de rugosidades se repetiram para diversas populações aleatórias distintas simuladas.

AGRADEDIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP como agência financiadora do projeto RECOPE- REHIDRO, em que se insere o presente estudo; ao SAAE - São Carlos e sua equipe pelo apoio logístico no desenvolvimento deste trabalho; à FAPESP e ao CNPq pela concessão de bolsas a autores do trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bhave, P. R., 1988. Calibrating Water Distribution Network Models. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 114, n. 1, pp. 120-136, Feb.
- Boulos, P.F., Wood, D.J., 1990. Explicit Calculation of Pipe- Network Parameters. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, vol.116, n.11, pp.1329-1344.
- Ferreri, G. B., Napoli, E., Tumbiolo, A., 1994. Calibration of Roughness in Water Distribution Networks. In: MILLER, D. S. (ed.): 2nd International Conference on Water Pipeline Systems, BHR Group Conference Series, p. 379-396, Edinburgh, Scotland.
- Goldberg, D.E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA.
- Holland, J.H., 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press. Ann Arbor, Mich.
- Jowitt, P.W., Xu, C., 1990. Optimal Valve Control in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.116, n.4, p.455-472, July.
- Liggett, J.A., Chen, L.C., 1994. Inverse transient analysis in pipe networks. *J.Hydr. Engrg, ASCE*, vol.120, n.8, pp.934-955.
- Mckinney, D.C, Lin, M.D.,1994. Genetic algorithm solution of groundwater management models, *J. Water Resourc*, vol. 30, n.6, pp-1897-1906.
- Meier, R. W.; Barkdoll, B. D. , 2000. Sampling Design for Network Model Calibration Using Genetic Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 4, p. 245-250.
- Ormsbee, L.E. ,1989. Implicit Network Calibration. *J.Water Res. Plng and Mgmt, ASCE*, vol.115, n.2, pp.243-257.
- Ormsbee, L.E., Wood, D.J., 1986. Hydraulic Design Algorithm for Pipe Networks. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, vol.112, n.12, pp.1195-1207.
- Rechenberg, I. 1973. *Evolutionstrategie: Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution*. Fromman-Holzboog, Stuttgart, Germany
- Reis, L.F.R., Porto, R.M., Chaudhry, F.H. (1997). Optimal Location of Valves in Pipe Networks By Genetic Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.123, n.6, p.317-326.

- Reis, L.F.R, Akutsu, J. , 2002. Estratégias operacionais para sistemas de reservatórios via algoritmos genéticos (AGs). Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 7, Número 3.
- Ritzel, B.J., Eheart, W, 1994. Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem. J. Water Resour. vol.30, n.5, pp.1589-1603.
- Silva, F. G. B., Reis, L. F. R. , 2002. Comparative Analysis of Different Schemes for Implementing Genetic Algorithms (GAs) in Calibration of Water Supply Distribution Systems. JOURNAL OF THE BRAZILIAN COMPUTER SOCIETY/Submetido
- Silva, F.G.B, 2003. Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos (AGs). Tese (Doutorado) apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Simpson, A.R., Dandy, G.C, Murphy, L., 1994. Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization. Journal of Water Resources Planning and Management, vol.120, n.4, pp.423-443.
- Soares, A.K., 2003. Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água Para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão. Dissertação (Mestrado) apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Tucciarelli, T.; Criminisi, A.; Termini, D. 1999. Leak Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation. Journal of Hydraulic Engineering, v. 125, n. 3, p. 277-285, Mar.
- Vítkovský, J. P., Simpson, 1997. Calibration and leak detection in pipe networks using inverse transient analysis and genetic algorithms. Research Report, No R157, University of Adelaide, Austrália
- Walski, T.M., 1983. Technique for Calibrating Network Models. J. Water Res. Plng and Mgmt, ASCE, vol. 109, n.4, pp.360-372.
- Walters, G.A., Savic, D.A., Morley, M., Werner, D.S., 1998. Calibration of Water Distribution Network Models Using Genetic Algorithms. University of Exeter. School of Engineering. HYDROSOFT 1998 (Inglaterra).
- Wardlaw, R.; Sharif, M. 1999. Evaluation of genetic Algorithms for Optimal Reservoir System Operation. Journal of Water Resources Planning and Management, v.125, n.1, p.25-33.