

APLICAÇÃO DE MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA REDE DE AMOSTRAGEM ÓTIMA PARA CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS (AGs)

Fernando das Graças Braga da Silva¹; Luisa Fernanda Ribeiro Reis²; Rodrigo de Oliveira Caliman³; Rodrigo de Melo Porto⁴; Fazal Hussain Chaudhry⁵

Resumo - A seleção de locais para coleta de dados de campo, com o propósito de calibração de modelos de redes de distribuição de água, é freqüentemente feita de forma subjetiva. Reconhece-se, entretanto, a necessidade de estabelecer a rede de amostragem de maneira mais racional (*Optimal Sampling Design*), face à sua importância para o processo de calibração.

A literatura apresenta alguns métodos que permitem determinar os pontos de monitoramento a compor a rede de amostragem de forma objetiva. O trabalho recentemente apresentado por Schaetzen et al. (2000), merece destaque por empregar conceitos claros e aparentemente robustos além de sua facilidade de implementação, merecendo ser investigado. Tal método é utilizado aqui para realizar aplicações a uma rede hipotética e a um setor da rede de distribuição de água para abastecimento da Cidade de São Carlos – S.P. Os resultados obtidos para a rede teórica mostraram-se consistentes, mesmo partindo de estimativas distintas para os coeficientes de rugosidade a serem determinados pela calibração. Para a rede real obteve-se resultados coerentes com os apresentados no trabalho original.

¹ Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP; Rua 6 de Fevereiro, 10, Vila Santa Clara, CEP: 13590-000, São Carlos, SP; fone:(016)245-1122; fax: (016)273-9550; ferbraga@sc.usp.br

² Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP; Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, CEP: 13560-250, Caixa Postal 359, São Carlos, SP; fone:(016)273-9534; fax: (016)273-9550; fernanda@sc.usp.br

³ Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP; Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, CEP: 13560-250, Caixa Postal 359, São Carlos, SP; fone:(016)273-9534; fax: (016)273-9550; rocal@sc.usp.br

⁴ Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP; Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, CEP: 13560-250, Caixa Postal 359, São Carlos, SP; fone:(016)273-9534; fax: (016)273-9550; rodrigo@sc.usp.br

⁵ Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP; Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, CEP: 13560-250, Caixa Postal 359, São Carlos, SP; fone:(016)273-9534; fax: (016)273-9550; fazal@sc.usp.br

Abstract - The selection of monitoring points in field for the purpose of water supply network calibration is almost always made by *feeling*. It has to be recognized however that, due to its importance for the calibration process, the sampling networks have to be designed in a rational way. The literature presents some alternative methods that permit the monitoring points to compound the sampling network in a more objective form. The method recently proposed by Schaetzen et al. (2000) has to be considered due to characteristics such as relatively simple concepts involved and easy implementation. Such a method is applied to a hypothetical network and an existing network in São Carlos City, SP.

The results obtained for the hypothetical network revealed consistent even for different prior estimative of the roughness coefficients to be determined by calibration.

For the real network obtained coherent results with the exposed of the original paper.

Palavras Chave- Redes de distribuição de água, Rede de amostragem, Algoritmos genéticos.

INTRODUÇÃO

Os modelos matemáticos de simulação hidráulica constituem atualmente ferramentas imprescindíveis à análise de redes de distribuição de água para abastecimento, permitindo que elas sejam examinadas sob uma variedade de condições operacionais atuais e futuras. Assim, a calibração de tais redes é fundamental, no sentido de possibilitar que tais modelos realizem previsões de comportamento realísticas.

A calibração geralmente requer observações de campo, de parâmetros tais como pressão e vazão, com o intuito de comparação com seus respectivos valores simulados, na determinação de características da rede como: rugosidades, diâmetros, demandas etc..

Em se tratando de redes já existentes, a aquisição de dados geralmente torna-se muito dispendiosa, havendo a necessidade de uma equipe de trabalho e dispositivos especiais para realização de medidas, além de harmonia com o órgão responsável pelo abastecimento municipal, para que eventuais interferências não prejudiquem o abastecimento hídrico local.

Diante de tais dificuldades, a rede de monitoramento de pressão e vazão geralmente é constituída de um número reduzido de pontos de observação. Eles devem, portanto, ser escolhidos de maneira a fornecer o máximo de informação possível.

Alguns autores tentaram estabelecer uma sistemática de identificação da rede de monitoramento ótima e, embora não se tenha chegado a um consenso, grande parte das pesquisas já

realizadas (Pudar e Liggett, 1992; Ferreri et al., 1994; Liggett e Chen, 1994, Bush e Uber, 1998; Ahmed, 1999) admitem a sensibilidade como uma medida de eficiência na resolução do problema.

Recentemente, Schaetzen et al. (2000) apresentaram um método de avaliação da rede de amostragem baseado na matriz de sensibilidades e no princípio da máxima entropia de Shannon, utilizando os Algoritmos Genéticos (AGs) como ferramenta de otimização, na busca ótima.

A revisão da literatura mostra que, apesar das diversas tentativas no sentido de estabelecer a rede de amostragem ótima para medidas de pressão e vazão, com propósitos de calibração, existe ainda uma lacuna a ser preenchida. Entretanto o método apresentado por Schaetzen et al. (2000) mostrou-se promissor por empregar conceitos claros e aparentemente robustos e também pela sua facilidade de implementação.

O presente trabalho tem como objetivo a aplicação desse método para uma rede hipotética extraída da literatura e também uma rede real, com o propósito de estabelecer a rede de monitoramento ótima para ambas. O texto foi organizado de maneira a fornecer os conceitos básicos de AGs e entropia máxima empregados, expor a maneira como a técnica de AGs foi implementada para o problema em questão, descrever e, finalmente, mostrar os resultados obtidos para os estudos de caso realizados.

ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AGs), são provavelmente o tipo mais conhecido de programação evolucionária, definida como métodos de busca de evolução artificial baseados na seleção natural e mecanismos de genética populacional. Eles imitam as efetivas técnicas de otimização da natureza na evolução que são baseadas na sobrevivência e reprodução preferenciais dos indivíduos mais aptos da população, na manutenção de uma população com diversos membros, na herança de informação genética dos pais e na mutação ocasional dos genes. O resultado é um algoritmo eficiente com a flexibilidade para buscar espaços de soluções complexos, cujos conceitos podem ser examinados em profundidade em trabalhos como Goldberg (1989) e Michalewicz (1992).

Os AGs são também referidos como técnicas de otimização estocástica devido ao espaço da solução ser examinado gerando-se soluções candidatas com o auxílio de números aleatórios. Devido a sua natureza estocástica não há garantia de que o ótimo global seja encontrado usando AGs, embora as aplicações sugiram uma boa taxa de sucesso em identificar boas soluções para sistemas complexos onde métodos tradicionais de otimização falham.

Um modelo de algoritmo da evolução Darwiniana é estabelecido pela criação de um conjunto de soluções chamado de população inicial. Cada indivíduo numa população é representado por um conjunto de valores ou códigos (binários, reais) para os parâmetros que definem completamente

uma solução. A codificação das soluções candidatas é feita via “strings”, que são conjuntos análogos aos cromossomos encontrados no DNA, de maneira que contém características genéticas dos indivíduos.

A população é usualmente produzida aleatoriamente. Existem muitas formas de AGs, todas elas compreendendo três operadores: reprodução, cruzamento e mutação. Reprodução é um processo de seleção por sobrevivência do mais capazes. Cruzamento é a troca parcial de segmentos correspondentes de características entre filas pais, para produzir filas proles. Mutação é a ocasional mudança de valores de bit para evitar a perda de um traço genético potencialmente útil. Tais operadores são implementados de maneira a refletir as respectivas probabilidades de ocorrência na natureza. Assim, por exemplo, a mutação ocorre com probabilidade reduzida, quando comparada às probabilidades de ocorrência dos operadores de reprodução e cruzamento.

Aos cromossomos é permitido de evoluir ao longo das gerações. A probabilidade de que uma solução da população original seja selecionada para produzir uma nova geração é dependente de seu valor de aptidão (uma medida de quão bem um cromossomo otimiza a função objetivo). Devido a essa pressão seletiva aplicada através de gerações, a tendência global é para manter soluções de aptidão maior. O AGs sucessivamente avaliam e regeneram a coleção de soluções testes da população, criando novas populações a partir das antigas populações.

A literatura reporta uma variedade de aplicações recentes da técnica de AGs aos sistemas hídricos, e em especial na otimização de projeto, reabilitação e operação de sistemas de água para abastecimento.

IMPLEMENTAÇÃO DOS AGS PARA O PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DA REDE DE AMOSTRAGEM ÓTIMA

O problema de determinação da rede de amostragem ótima com propósito de calibração foi colocado como um modelo de otimização a ser resolvido através da sistemática de busca dos AGs, através de um programa codificado em Fortran, tendo como variáveis de decisão os locais para coleta de dados de pressão. Assim, conhecido o número de pontos a compor a rede de amostragem, as possíveis soluções do problema podem ser representadas através de números inteiros, representativos dos nós de observação.

O algoritmo codificado em Fortran foi estruturado de maneira a desenvolver operadores genéticos simples, constando basicamente das etapas de geração da população inicial de soluções do problema, avaliação das soluções, seleção cruzamento e mutação.

A população inicial é gerada aleatoriamente, mediante o sorteio de um número pré-estabelecido de nós da rede de distribuição em estudo e as soluções avaliadas através da função

objetivo explicitada no item seguinte do trabalho, por razões didáticas.

Os membros a compor a geração seguinte são determinados por um esquema de seleção através de sistemática elitista, segundo a qual um determinado número dos melhores indivíduos pré-estabelecido é reproduzido para compor a próxima geração, em função de possuírem maiores aptidões. As demais soluções a compor a nova população de alternativas, cujo número se mantém fixo, são selecionadas com base na roleta.

O operador de cruzamento foi estabelecido através da troca parcial de características entre duas soluções escolhidas aleatoriamente para formar duas novas soluções a compor a geração seguinte. Considerando-se uma probabilidade de cruzamento de $\rho_c = 0,95$; o ponto de cruzamento é escolhido aleatoriamente.

A mutação, assegurando a introdução de material genético novo, foi realizada com uma probabilidade $\rho_m = 0,05$; por característica ou elemento de cada *string*.

FUNÇÃO DE APTIDÃO

De acordo com Schaetzen et al. (2000), o problema de determinação da rede de amostragem ótima pode ser expresso como um problema de otimização, segundo o qual os pontos a serem determinados devem atender ao critério de maximização da sensibilidade das pressões às rugosidades dos condutos e ao princípio da entropia máxima de *Shannon*, através das funções explicitadas a seguir.

CRITÉRIO DA SENSIBILIDADE (F_1)

Definindo-se sensibilidade como uma medida de quanto a carga hidráulica no nó i varia devido à perturbação no valor do coeficiente de rugosidade no conduto j , a matriz correspondente é de ordem $n \times m$, onde n representa o número de nós e m indica o número de condutos e cada elemento dessa matriz pode ser aproximado por diferenças finitas baseado no valor C de rugosidade, como:

$$\left| \frac{\partial H_i}{\partial C_j} \right| \cong \left| \frac{H_i(C_j) - H_i(C_j^*)}{C_j - C_j^*} \right| \quad \forall i \in [1, n], \forall j \in [1, m] \quad (1)$$

onde: $H_i(C_j)$ = carga calculada do nó i assumindo a rugosidade C_j do tubo j ; $H_i(C_j^*)$ = carga calculada do nó i alterando a rugosidade C_j do tubo j para C_j^* .

No estudo $C_j^* = C_j + I$ é utilizado para todos os condutos (Liggett and Chen (1995)).

As derivadas parciais representadas pela equação 1 expressam numericamente a variação da carga do nó i para dada variação da rugosidade do nó j , ou seja a sensibilidade de H_i com o respectivo C_j . O número de simulações hidráulicas requerida para produzir a matriz de sensibilidade é $m+1$, sendo m o número total de condutos.

Assim, a primeira função a ser maximizada é definida como:

$$F_1(x) = \sum_n^m a_j \quad \text{onde} \quad a_j = \text{Max}_{i \in X_k} \left| \frac{\partial H_i}{\partial C_j} \right| \quad \forall j \in [1, m] \quad (2)$$

O limite superior de F_1 , definido como F_{1max} , é deduzido da matriz de sensibilidade pela relaxação, sendo definido por $k=n$; onde k é o número de pontos a serem monitorados. O limite inferior, definido como F_{1min} é assumido como 0.

CRITÉRIO DA ENTROPIA MÁXIMA(F_2)

Shannon (1948) foi quem primeiro usou entropia como uma medida da incerteza relacionada à termodinâmica. De acordo com Schaetzen et al. (2000), no mesmo ano Shannon introduziu entropia como uma medida probabilística da incerteza, quando desenvolveu um novo meio de medir os níveis de informação ou incerteza relativos a diferentes distribuições probabilísticas. Ele encontrou que a única função matemática que poderia ser usada como uma medida geral de incerteza era:

$$S(p) = - \sum_{j=1}^m p_j \ln p_j \quad (3)$$

Onde $S(p)$ é a função de entropia e $p=(p_1, p_2, \dots, p_m)$ é uma distribuição de probabilidade tal que:

$$1 \geq p_j \geq 0 \quad \forall j \in [1, m] \quad \text{e}$$

$$\sum_{j=1}^M p_j = 1 \quad (4)$$

Recentemente a aplicação de entropia para problemas de otimização em engenharia tem ganho popularidade.

Assim, o critério da entropia máxima pode ser posto através da equação 5.

$$F_2(x) = -\sum_{j=1}^m p_j \ln p_j \quad \text{onde} \quad p_j = \frac{a_j}{\sum_{j=1}^m a_j} \quad \forall j \in [1, m] \quad (5)$$

O limite superior de F_2 , definido como $F_{2\max}$, é igual a $\ln(m)$, o limite inferior, definido como $F_{2\min}$ é assumido como 0.

FUNÇÃO DE APTIDÃO (F)

Uma vez que as equações F_1 e F_2 constituem objetivos conflitantes, elas podem ser combinadas para produzir uma solução de compromisso, definida como a solução mais próxima da ideal($F_{1\max}$, $F_{2\max}$), na forma:

$$F(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^2 w_i \left(\frac{F_i(x) - F_{i\max}}{F_{i\min} - F_{i\max}} \right)^2} \quad (6)$$

onde w_i é o coeficiente de peso da função i , $F_i(x)$ o valor da função i e $F_{i\min}$ e $F_{i\max}$ os limites inferior e superior da função i , respectivamente.

A rotina de avaliação da função de aptidão inicialmente realiza a simulação hidráulica da rede obtendo-se a carga hidráulica em cada nó utilizando as rugosidades esperadas para uma rede em estudo, sem alterações. Então à rugosidade de cada trecho da rede sofre uma perturbação unitária no seu valor original. A cada alteração da rugosidade original (tendo as rugosidades dos demais trechos os seus valores mantidos) é realizada uma simulação hidráulica, determinando-se as cargas hidráulicas para cada nó da rede. De posse de tais valores, a matriz de sensibilidades tem seus valores calculados, bem como nas equações 2, 5 e 6 já explicitadas.

APLICAÇÕES DO MÉTODO

- Rede teórica

O método foi aplicado inicialmente para a rede de distribuição hipotética esquematizada na Figura 1, cujos dados constam das Tabelas 1,2 e 3.

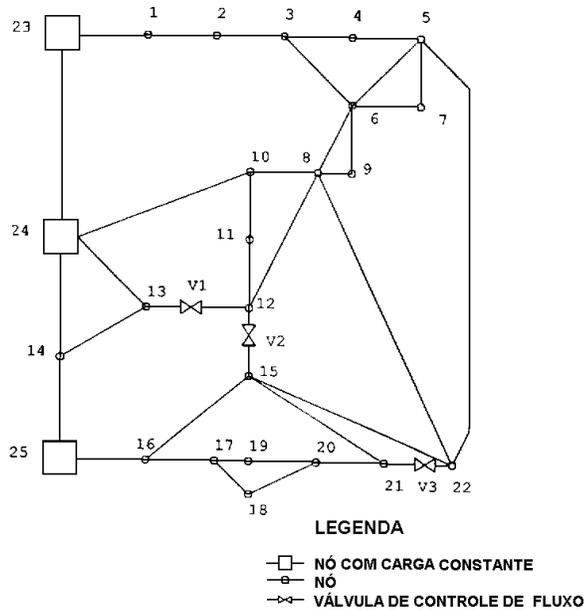


Figura 1 – Rede teórica estudada, (JOWITT & XU (1990))

Tabela 1 – Valores de topografia e demanda dos nós

INFORMAÇÕES DO NÓS

NÓ	NÍVEL DO TERRENO (m)	DEMANDA (l/s)
1	18,0	5
2	18,0	10
3	14,0	0
4	12,0	5
5	14,0	30
6	15,0	10
7	14,5	0
8	14,0	20
9	14,0	0
10	15,0	5
11	12,0	10
12	15,0	0
13	23,0	0
14	20,0	5
15	8,0	20
16	10,0	0
17	7,0	0
18	8,0	5
19	10,0	5
20	7,0	0
21	10,0	0
22	15,0	20

Tabela 2 – Valores de comprimento, diâmetros e rugosidades

INFORMAÇÕES DOS TRECHOS DA REDE

TRECHO	COMPRIENTO (m)	DIÂMETRO (m)	COEFICIENTE DE HAZEN-WillIAN (mm)
23-1	606	0,457	110
23-24	454	0,457	110
24-14	2782	0,229	105
25-14	304	0,381	135
10-24	3382	0,305	100
13-24	1767	0,475	110
14-13	1014	0,381	135
16-25	1097	0,381	6
2-1	1930	0,457	110
3-2	5150	0,305	10
12-13	762	0,457	110
15-16	914	0,229	125
17-16	822	0,305	140
18-17	411	0,152	100
20-16	701	0,229	110
19-17	1072	0,229	135
20-19	864	0,152	90
21-20	711	0,152	90
21-15	832	0,152	90
22-15	23334	0,229	100
12-15	19996	0,229	95
11-12	777	0,229	90
10-11	542	0,229	90
8-12	1600	0,457	110
8-10	249	0,305	105
9-8	443	0,229	90
6-8	743	0,381	110
22-8	921	0,229	125
22-21	2689	0,152	100
4-3	326	0,152	100
5-4	844	0,229	110
6-3	1274	0,152	100
5-6	1115	0,229	90
7-6	615	0,381	110
5-22	1408	0,152	100
5-7	500	0,381	110
6-9	300	0,229	90

Tabela 3 –Valores de níveis dos reservatórios para os nós

INFORMAÇÕES DOS NÓS-RESERVATÓRIOS

NÓ	NIVEL MÁXIMO DO RESERVATÓRIO	NIVEL MÁXIMO DO RESERVATÓRIO	NIVEL MÁXIMO DO RESERVATÓRIO
	(m)	(m)	(m)
23	56,0	54,66	54,5
24	55,0	54,60	54,5
25	55,5	54,50	54,0

Definindo-se uma rede de amostragem de 8 pontos para coleta de dados de pressão, foram realizadas simulações partindo de 3 sementes aleatórias, sendo a população de soluções adotadas de tamanho de 30 e o número de gerações analisadas foi 1000. Os resultados em termos de evolução do valor da função de aptidão ao longo das gerações de AGs são apresentados na Figura 2. A análise desta figura mostra uma oscilação no valor máximo atingido para a função de aptidão ao longo das gerações iniciais, convergindo para o mesmo valor da função de aptidão (*fitness*).

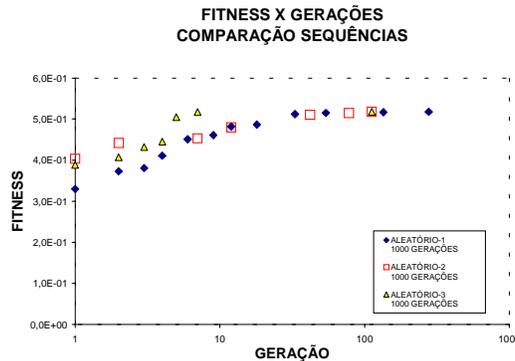


Figura 2 – Rede teórica – valores de *fitness* ao longo da gerações

Os locais de monitoramento determinados foram os mesmos (nós: 8, 10, 11, 12, 13, 23, 24, 25) para as três sementes aleatórias utilizadas, dando consistência à resposta obtida.

Os resultados mostram-se coerentes, pois observa-se que na rede teórica o abastecimento da rede é feito através de 3 fontes (reservatórios); correspondentes aos nós 23, 24 e 25, que figuram como resposta do problema. Este fato é positivo, pois existe uma unanimidade em muitas obras consultadas em que saídas de reservatório são bons pontos para aquisição de dados para calibração, podendo até, se desejado, excluir estes pontos da análise, incorporando-os automaticamente.

A inspeção visual da rede de monitoramento ótima obtidas por Schaetzen et al. (2000), reproduzida na Figura 3, mostra que os pontos de observação estão localizados em geral mais no interior da rede

e próximos às adutoras principais ou de maiores diâmetros. O mesmo ocorre com os resultados aqui obtidos.

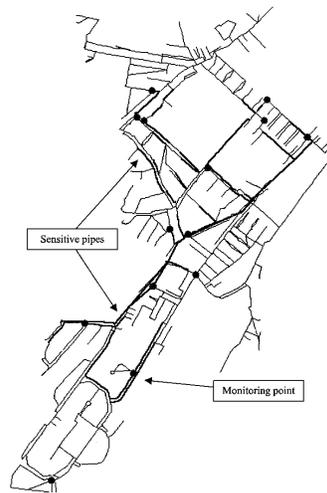


Figura 3 - Resultados do método aplicado em rede do artigo (Schaetzen et al. (2000))

Entretanto, a maior crítica que se pode fazer quanto aos métodos que se baseiam na matriz de sensibilidades aplicados à calibração de redes de distribuição de água, é que boas respostas dependem de uma razoável estimativa dos valores rugosidades nos trechos da rede. Na prática, tais estimativas podem ser valores muito distintos dos reais. Assim, o método deve ser aplicado repetidamente a partir de diversos valores possíveis para os coeficientes de rugosidade, dentro da faixa estabelecida para a calibração (geralmente, 50% a 150% do valor esperado para condutos de material e idade conhecidos), para que se possa estabelecer a rede de monitoramento com maior confiança.

Tal procedimento foi adotado como teste para a rede teórica. Os 3 conjuntos de rugosidades constantes da Tabela 4 foram gerados aleatoriamente, dentro da faixa de variação esperada para tais valores, e tomados como pré-estimativas, na determinação da rede de amostragem de 8 pontos, através da metodologia descrita. Os resultados obtidos foram os mesmos para os 3 conjuntos de rugosidades, concordantes com aqueles já obtidos para as rugosidades reais hipotéticas.

Tabela 4 –Valores das rugosidades utilizadas na simulação da rede hipotética
 rugosidades reais e 3 conjuntos

REDE HIPOTÉTICA				
trecho	rugosidades reais (mm)	conjunto 1 de rugosidades (mm)	conjunto 2 de rugosidades (mm)	conjunto 3 de rugosidades (mm)
1	0,200	0,100	0,117	0,220
2	0,200	0,278	0,294	0,138
3	0,250	0,254	0,225	0,191
4	0,100	0,124	0,059	0,106
5	0,300	0,325	0,393	0,328
6	0,200	0,202	0,275	0,299
7	0,100	0,123	0,147	0,080
8	10,000	9,261	13,995	11,530
9	0,200	0,280	0,292	0,133
10	3,000	4,074	4,221	2,382
11	0,200	0,287	0,183	0,162
12	0,150	0,152	0,134	0,194
13	0,050	0,060	0,052	0,055
14	0,300	0,178	0,333	0,280
15	0,200	0,220	0,269	0,199
16	0,100	0,127	0,057	0,069
17	0,400	0,289	0,512	0,234
18	0,400	0,273	0,447	0,432
19	0,400	0,496	0,326	0,376
20	0,300	0,274	0,423	0,448
21	0,350	0,377	0,232	0,420
22	0,400	0,334	0,382	0,231
23	0,400	0,252	0,270	0,377
24	0,200	0,108	0,201	0,194
25	0,250	0,270	0,294	0,148
26	0,400	0,227	0,533	0,356
27	0,200	0,138	0,133	0,292
28	0,150	0,224	0,092	0,206
29	0,300	0,337	0,352	0,334
30	0,300	0,326	0,195	0,227
31	0,200	0,260	0,219	0,279
32	0,300	0,232	0,209	0,231
33	0,400	0,359	0,238	0,459
34	0,200	0,227	0,125	0,130
35	0,300	0,177	0,435	0,312
36	0,200	0,109	0,210	0,247
37	0,400	0,394	0,386	0,203

- Rede Real

Da mesma forma como foi feito com a rede teórica, o método foi aplicado ao setor da rede real de 144 nós e 191 condutos, existente na cidade de São Carlos, SP. A rede é constituída de um setor isolado abastecido por um reservatório por gravidade, apresenta uma extensão aproximada de 23060 m, com tubulação em sua maior parte de P.V.C. As cotas topográficas variam de 836,5 a 873,00 m com um total de 2052 ligações (Dezembro de 2000) e uma estimativa de população de 10000 habitantes. Com o objetivo de selecionar 35 pontos para compor a rede de amostragem ótima, foram realizadas simulações computacionais, empregando 2 sementes aleatórias, mantendo-se o tamanho da população em 30 indivíduos e a análise feita para 4000 gerações. Os resultados em termos de evolução de valor da função de aptidão ao longo da gerações de AGs são apresentados a seguir na Figura 4.

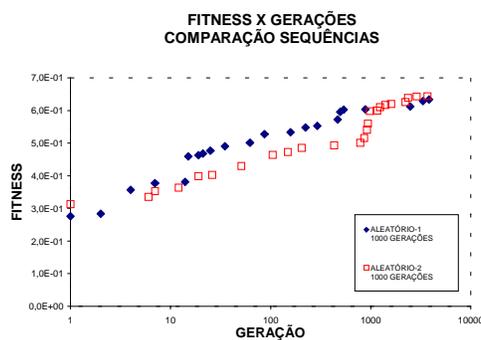


Figura 4 – Rede real – valores de *fitness* ao longo das gerações

As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados obtidos em termos da rede de pontos de observação para cada semente aleatória, onde as células assinaladas correspondem aos nós indicados como pontos de observação por ambas as simulações.

Tabela 5– Localizações de pontos obtidas com a primeira semente aleatória (rede real)

PONTOS				
7	25	38	92	118
9	27	39	93	128
10	28	40	94	129
20	29	41	104	130
21	30	42	105	131
22	31	43	115	141
23	37	44	117	142

Tabela 6– Localizações de pontos obtidas com a segunda semente aleatória (rede real)

PONTOS				
9	25	40	104	127
10	26	41	105	128
12	27	43	106	129
21	28	44	114	130
22	30	93	115	131
23	38	94	117	141
24	39	95	118	142

Observa-se que, dos 35 pontos selecionados, 27 são comuns nas simulações realizadas com sementes aleatórias diferentes. Existe uma tendência da aproximação dos valores da função de aptidão para as duas sementes aleatórias, o que sugere que após n gerações a tendência é de os pontos selecionados serem os mesmos.

Para se tentar fazer uma analogia com o resultado obtido na aplicação do artigo (Figura 3), foi feita uma simulação para a rede real com a localização de 45 pontos dos 144 nós. Na Figura 5, estes 45 pontos são indicados na rede para se ter uma idéia da abrangência do método, onde os trechos de redes com diâmetros maiores são mostrados em amarelo.

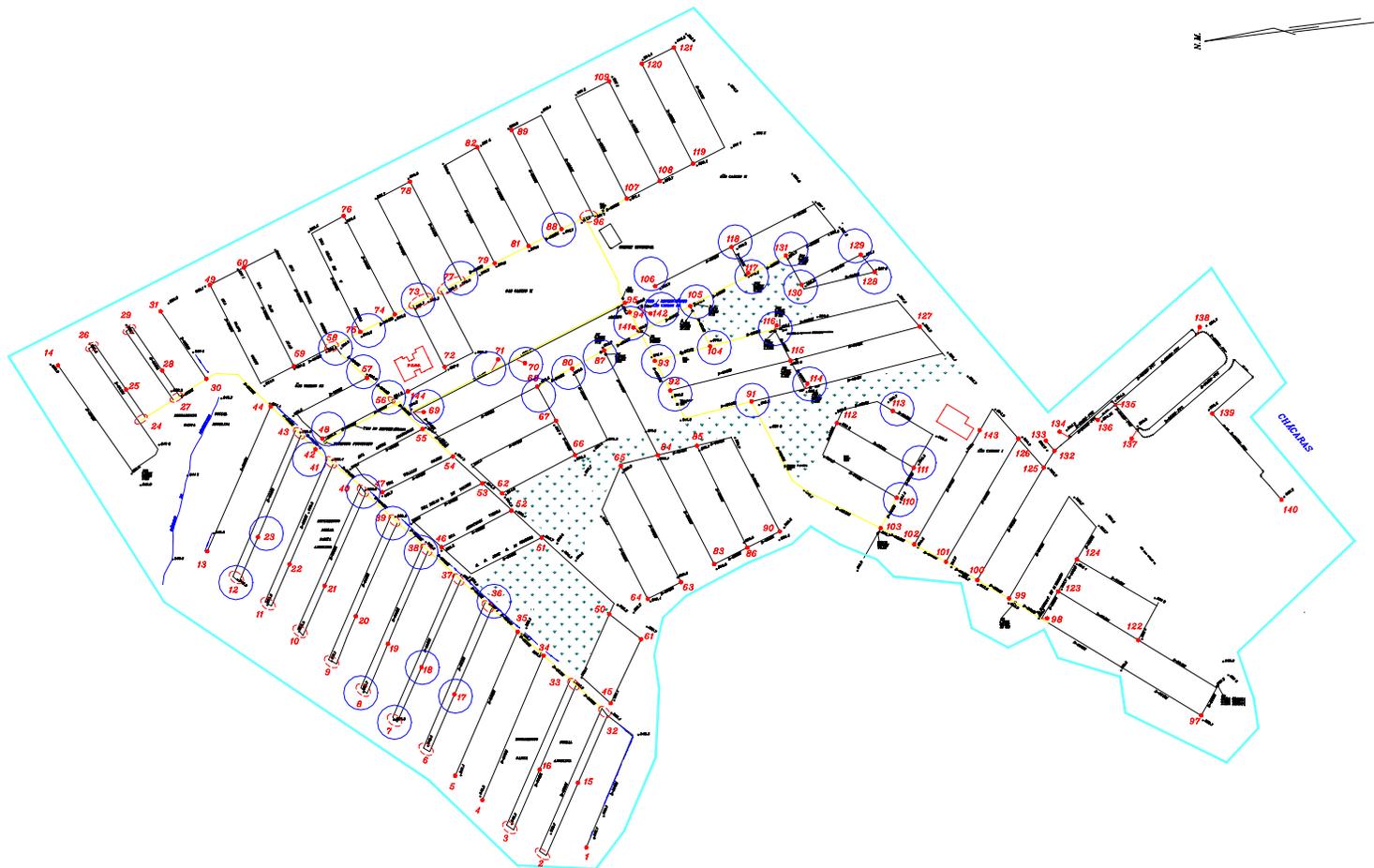


Figura 5 – Esquema do Setor da Cidade de São Carlos – S.P –Locação de pontos selecionados através do método – S/ Escala

Os resultados mostram-se coerentes, pois comparando as Figuras 3 e 5, ou seja, resultado da aplicação do artigo original e da rede real em estudo, observa-se que ambas têm em comum o fato de a maior parte dos pontos se localizarem no interior da rede e poucos nas extremidades, além de próximos aos trechos de redes de diâmetros grandes.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dentre os métodos de determinação da rede de amostragem (*Sampling Design*), abordou-se o trabalho de Schaetzen et. al. (2000) por ter fundamento em conceitos relativamente simples e também pela sua facilidade de implementação.

Aplicações foram realizadas para duas redes, uma rede teórica e a outra real.

Os resultados obtidos para a rede teórica mostraram-se consistentes, tendo sido verificada a repetição dos pontos a compor a rede de amostragem para diversas pré-estimativas dos valores de rugosidades a serem determinados por calibração. Apesar das respostas obtidas para a rede real apresentarem certa semelhança com aquela estabelecida no trabalho original, recomenda-se que o procedimento de simulações repetidas a partir de diversos conjuntos de rugosidades pré-estimadas seja utilizado, para estabelecer a respectiva rede de amostragem com maior confiabilidade.

AGRADECIMENTOS

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 BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, I ; LANSEY, K. ; ARAÚJO, J. (1999). Data Collection For Water Distribution Network Calibration. *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, v. 1, p. 271-277, Research Studies Press, DS.
- BUSH, C. A.; UBER, J. G. (1998). Sampling design methods for water distribution model calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.124, n.6, p.334-343.

- FERRERI, G.; NAPOLI, E.; TUMBIOLO, A. (1994). Calibration of roughness in water distribution networks. In: Second International Conference on Water Pipeline Systems, edited by D.S. Miller, BHR Group Conference Series, Publication No.10.
- GOLDBERG, D.E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA.
- 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, v.120, n.8, p.934-955.
- LIGGETT, J.A.; CHEN, L.C. (1995). Monitoring water distribution system: the inverse model as a tool for calibration and leak detection. Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems, E. Cabrera and A.F.Vela (eds.), p.107-132.
- MICHALEWICZ, Z. (1992). Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutionary Programs. Springer, Germany.
- PUDAR, R.S.; LIGGETT, J.A. (1992). Leaks in Pipe Network . J. Hydr. Engrg., ASCE, v.118. n.7, p.1031-1046.
- SCHAETZEN, W.B.F.; WALTERS, G.A.; SAVIC, D.A. (2000). Optimal Sampling Design For Model Calibration Using Shortest Path, Genetic and Entropy Algorithms”, to appear in Urban Water, Nov. 2000.