

METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE PONTOS DE MONITORAMENTO DE PRESSÃO NA CALIBRAÇÃO DE REDES HIDRÁULICAS

Henrique da Silva Pizzo¹ e Edevar Luvizotto Júnior²

Resumo - O processo de aferição dos dados de entrada em um modelo é denominado de calibração do modelo. O presente trabalho aborda a calibração de modelos de redes de distribuição de água, e o parâmetro a calibrar é o coeficiente de rugosidade das tubulações. Para tal, são tomadas medidas de pressão em alguns pontos da rede, a fim de serem comparadas com os resultados do modelo. Todavia, é sabido que a quantidade e o posicionamento desses pontos escolhidos para o monitoramento pode influenciar bastante na qualidade dos resultados da calibração. Nesse sentido, é proposto um método para identificação desses pontos. O método é aplicado a duas redes bastante distintas, apresentando resultados muito satisfatórios.

Abstract - The process of guarantee that a model input data are the real ones is known as model calibration. This paper deal with water distribution networks model calibration, and the parameter to be calibrated is the pipe roughness coefficient. For that, some measurements of pressure are taken in points of network, in order to be compared with model results. However, it's known that the number and the location of these points, choosen to be monitored, can influence a lot in the quality of calibration results. In that way, a method for identifying those points is proposed. The method is applied to two different networks, and the results are very satisfactory.

Palavras-chave: abastecimento de água, calibração de modelos, estações de monitoramento, redes hidráulicas, otimização.

¹ Professor da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo – Laboratório de Saneamento Ambiental, Prédio G1, CAMPUS I - Km 171 - BR 285, Bairro São José, Caixa Postal 611 - CEP 99001-970 Passo Fundo/RS, (54) 316-8424 / 327-4550, hpizzo@upf.br

² Professor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Recursos Hídricos, (19) 3788-2354, edevar@fec.unicamp.br

INTRODUÇÃO

Os **modelos matemáticos** de simulação de sistemas hidráulicos de abastecimento são ferramentas cujo objetivo é reproduzir, através de um computador, com a maior exatidão possível, o comportamento real do sistema físico que representa. Porém, não é necessário que o modelo reproduza todos os componentes físicos do sistema, mas talvez somente aqueles mais significativos, dependendo da confiabilidade exigida e do uso a que se destina o modelo. García-Serra (1988) define o modelo matemático de uma rede como uma abstração do sistema físico real, que pretende, mediante uma formulação com maior ou menor grau de complexidade, simular a resposta do sistema para as situações pretendidas. Na prática, a modelação de uma rede se reduz ao estudo de um esquema simplificado da mesma, a cujas tubulações se associam os parâmetros adequados para reproduzir, o mais fielmente possível, seu comportamento efetivo. As tubulações do modelo podem corresponder a tubulações reais ou a uma determinada associação das mesmas, de maneira que certas grandezas (por exemplo, rugosidade dos condutos) que aparecem no modelo não têm, necessariamente, que coincidir com as reais (são modelados curvas, tês, válvulas, etc., existentes no conjunto das tubulações). Também são representados elementos de regulação, estações de bombeamento, etc. Por outro lado, os NÓS, definidos pelas interseções de linhas dos tubos no modelo, podem corresponder a uma confluência de tubulações mais ou menos próximas, a um consumo aplicado em substituição a uma ramificação pouco importante, a um consumo pontual grande, etc.

Segundo Walski (1985), um modelo computacional de um sistema de distribuição de água é composto por um conjunto de equações, e prevê as pressões e vazões nesse sistema. Todavia, os resultados de um modelos são somente tão precisos quanto os dados que lhes deram origem. Embora seja possível identificar com exatidão o comprimento e o diâmetro das tubulações, outras variáveis necessárias ao programa, como a distribuição de vazões e os coeficientes de rugosidade dos tubos, não são bem conhecidas para o sistema como um todo, definindo o que se denomina de **calibração** do modelo. As possibilidades são:

- Assumir os coeficientes de rugosidade dos tubos e a distribuição de vazões como corretos e ajustar as cotas piezométricas;
- Assumir as cotas piezométricas e a rugosidade como corretas e ajustar a estimativa de distribuição de vazão;
- Assumir a distribuição de vazão e estimativas das cotas piezométricas como corretas e ajustar os coeficientes de rugosidade.

Por mais preciso e melhor elaborado que seja o modelo simulador, esse não será eficaz em fornecer resultados de pressões e/ou vazões condizentes com os verdadeiros, se os dados de entrada nesse modelo não forem os reais. É nesse ponto que se insere a necessidade de uma efetiva calibração, a fim de aferir os dados de entrada, antes que se dê seguimento à etapa de simulação, de fato.

A abordagem estática é empregada nas metodologias denominadas clássicas, em que a caracterização do escoamento do fluido, considerado incompressível, é feita com base nas equações de conservação de massa e de energia e em uma lei de resistência ao escoamento. Não são considerados efeitos de inércia e de elasticidade. A solução numérica dos métodos que se utilizam da abordagem estática, na maioria dos casos, recai na linearização e solução do sistema de equações resultante. Koelle e outros (1992), citados por Luvizotto Júnior, observam que o processo de soluções de equações lineares na sua forma matricial geral $[A].[x] = [B]$ é comum a várias atividades da engenharia [...]. É de conhecimento na literatura técnica que, em alguns casos, dependendo dos valores dos elementos componentes da matriz $[A]$, ocorrem imprecisões na determinação dos valores das incógnitas que compõem a matriz $[x]$. Em determinado estudo de caso de uma instalação hidráulica real, observam que, embora não houvesse problemas de convergência

com o método da teoria linear utilizado na solução do problema, os resultados eram errôneos e, somente por investigação dos mesmos, podia-se verificar o fato do mau condicionamento da matriz que compunha o sistema de equações representativo do escoamento na instalação.

A abordagem elástica baseia-se no emprego das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento, generalizadas de tal forma a caracterizar os escoamentos, em regime permanente e em regime variável (transitório ou oscilatório). Embora as bases do emprego dessa técnica na análise do regime permanente tenham já sido propostas há alguns anos, só recentemente, em função de novas pesquisas e dos avanços computacionais, passou a ser considerada como uma ferramenta extremamente poderosa para esse tipo de análise.

O “time marching approach” – TMA, a ser empregado neste trabalho, tem a vantagem de ser um método que apresenta uma convergência “física” (supostamente “real”) no tempo, através de um transitório hipotético, alcançando o regime permanente final. Esse não é o caso de outros métodos largamente empregados em redes de água, como os métodos de Cross, Newton-Raphson, Linear, Gradiente, e outros, que contemplam uma aproximação simplesmente numérica.

Uma outra vantagem do TMA é que ele já trabalha com as equações do transitório hidráulico, estando, então, pronto para ser empregado em casos de calibração executados em regime transiente.

Segundo Solomatine (1998), apesar dos algoritmos genéticos serem os preferidos para problemas relacionados a recursos hídricos, outros algoritmos globais (ou multi-extremo) são também utilizados (DUAN et al., 1993; KUCZERA, 1997). Solomatine aponta que muitos usuários estão desinformados da existência desses outros algoritmos, que podem se apresentar mais eficientes e efetivos que os genéticos. Ele compara nove desses algoritmos em termos de efetividade (precisão), eficiência (número necessário de avaliações da função - relativo ao tempo de computação), e confiabilidade (porcentagem de “acertos” do algoritmo). Dois dos algoritmos pesquisados (ACCO e CRS4) apresentaram melhor comportamento que o genético. Outros experimentos (ABEBE; SOLOMATINE, 1998) mostram que para certas classes de problema com variáveis altamente discretas, por exemplo, na otimização das redes de distribuição de água, o algoritmo genético, devido à sua natureza discreta, pode realmente ser mais preciso que outros algoritmos desenvolvidos para variáveis contínuas. Ainda assim, praticamente em todos os problemas com variáveis contínuas onde atuou o genético, outros algoritmos de otimização global podem também ser utilizados.

Segundo Wright (1996), ao longo da última década tem havido uma retomada do interesse em métodos de otimização não derivativos, principalmente para problemas em que avaliações da função são muito dispendiosas ou complexas, não permitindo que as derivadas exatas ou aproximadas sejam calculadas a custo razoável. Aponta uma crescente necessidade de pesquisas na área, visto que tais métodos de busca direta, principalmente o Nelder-Mead e suas variações, têm sido amplamente utilizados, apesar de sérias deficiências na teoria e desempenho.

As dificuldades inerentes ao processo de calibração, já detectadas na necessidade de várias equipes de campo e aparelhos medidores, e outras de caráter mais teórico, apresentam mais um importante desafio a ser enfrentado.

Assim sendo, com relação ao número de pontos a se monitorar, no caso aqui adotado, o valor da pressão (estações de monitoramento), é conveniente que se tenha o mínimo possível de estações, desde que suficientes para garantir uma boa calibração. Nesse caso seriam evitados: gastos com deslocamento de diversas equipes de campo, necessidade de vários aparelhos registradores de pressão (visto que é ideal que as medições sejam simultâneas) e outras dificuldades operacionais que poderiam, inclusive, inviabilizar o processo.

Todavia, é sabido que a quantidade e o posicionamento desses pontos escolhidos para o monitoramento pode influenciar bastante na qualidade dos resultados da calibração. Nesse sentido, é proposto um método para identificação desses pontos. O método é aplicado a duas redes bastante distintas, apresentando resultados muito satisfatórios. O processo a ser empregado no procedimento de calibração é um método inverso, constituído pelo acoplamento de um simulador hidráulico baseado no TMA com o algoritmo otimizador de Nelder-Mead, conhecido por Modelo Híbrido.

MODELO HIDRÁULICO TMA

As equações gerais que regem o escoamento líquido em condutos forçados são equações diferenciais parciais hiperbólicas, sem solução analítica, que sejam respectivamente, a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento:

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f Q |Q|}{2 D A} = 0 \quad (2)$$

onde H é a carga hidráulica, t é o tempo, a é a celeridade, g é a aceleração da gravidade, A é a área da seção transversal do tubo, Q é a vazão, x é o espaço, f é o fator de atrito, e D é o diâmetro do tubo.

Segundo Chaudhry (apud LUVIZOTTO JÚNIOR, 1999) várias técnicas numéricas e gráficas de solução para este sistema de equações já foram propostas, sendo o método das características a técnica mais empregada, por uma série de vantagens.

A abordagem elástica é tradicional na análise de regimes transitórios, entretanto, devido ao caráter geral de suas equações, permite também a análise de escoamentos em regime permanente.

O TMA (time marching approach) é uma técnica de determinação do regime permanente real como resultado de uma situação transitória hipotética, criada pelo modelador. A técnica foi bastante explorada por Shimada (1988) e Luvizotto Jr. (1995), dentre outros, o qual cita ser fato que a convergência para o regime permanente através do transitório pode ser bastante lenta, o que tem motivado alguns pesquisadores a buscarem procedimentos para acelerá-la. Shimada aponta que, embora necessitando de maior esforço computacional que os métodos mais diretos, o TMA é, por vezes, preferido por realizar análise em regime permanente ou transiente da mesma forma e por ser capaz de produzir diferentes regimes permanentes unicamente alterando as condições de contorno. Já Luvizotto Jr. (1995) apresenta aplicações do método também para período extensivo, e aponta que a principal vantagem em relação a outros métodos de cálculo de redes, como o da teoria linear e o de Newton-Raphson, é a sua “convergência física”, ao acompanhar a evolução transitória, em detrimento ao processo iterativo numérico dos outros métodos, sem contar o fato desses serem matriciais, resultando numa seqüência de soluções de sistemas de equações, que possuem particularidades para resolução que devam sempre ser observadas. Outra vantagem do TMA é que o método pode ser aplicado também a situações de regime não-permanente, visto que as equações componentes são as do transitório hidráulico.

OTIMIZADOR DE NELDER-MEAD

A fim de desenvolver um modelo de calibração, é interessante que seja acoplado ao simulador hidráulico um algoritmo de busca de pontos extremos de funções, com o objetivo de garantir o processo de convergência entre o modelo hidráulico e a realidade física. O resultado desse acoplamento é chamado de Modelo Híbrido. A equação a ser utilizada, conhecida por função objetivo ou função de mérito, trabalha com a diferença entre valores medidos e valores simulados, diferença essa que deve ser minimizada para que se tenha os valores dados pelo modelo o mais próximo possível dos reais. O esquema apresenta-se da seguinte maneira:

$$\min \chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(V_i^* - V_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (3)$$

onde:

χ^2 – função objetivo

V_i^* – valor da grandeza medido;

V_i – valor da grandeza simulado;

N – número de pontos monitorado;

σ – desvio padrão

Taba (1997) apud Luvizotto Jr. et al. (2000), sugere que, em teoria, o processo de busca pode ser tratado através de dois conjuntos de métodos distintos:

- Método de busca direta: só utilizam no processo de busca de valores da função objetivo. São empregados quando a função é descontínua e não diferenciável, quando as derivadas são difíceis de se calcular, ou para aproximações prévias.
- Métodos diferenciais: utilizam-se do valor da função objetivo e de suas derivadas parciais, de primeira e segunda ordem, no processo de busca.

Wright (1996) cita que os métodos de busca direta foram sugeridos inicialmente na década de 50, e continuaram sendo propostos durante a década seguinte, em quantidade razoável. Tais métodos eram tipicamente apresentados e justificados mais pela sua intuição geométrica do que propriamente pela teoria matemática. Assim, foi motivado o aparecimento de novos algoritmos, na tentativa de superar certas ineficiências dos métodos anteriores.

Ela cita que o método de busca direta mais famoso, baseado em um simplex³, foi proposto por Nelder e Mead, em 1965. O método de Nelder-Mead é baseado na criação de um simplex dinâmico, modificado continuamente por regras estabelecidas, a fim de que se adapte da melhor maneira à configuração local.

Spendley et al. (apud NELDER; MEAD, 1965) foram introdutores de engenhosa idéia para busca de condições ótimas de operação avaliando-se os valores de saída de um sistema em uma série de pontos formando um simplex na região factível de pesquisa, e continuamente formando novos simplex, através da reflexão de um ponto no espaço das remanescentes. Essa idéia é claramente aplicável a problemas matemáticos de minimização de funções de várias variáveis. Todavia, pela concepção de Spendley et al., os passos a serem dados para a variação dos fatores em jogo eram já conhecidos e determinados, o que tornava a estratégia um pouco rígida para o uso em geral.

Já no método de Nelder-Mead, que leva o nome dos autores, o simplex adapta-se por si próprio à configuração local, alongando-se em regiões de pesquisa onde são formados longos planos inclinados, mudando de direção em regiões angulosas, e contraindo-se nas proximidades de um ponto de mínimo. Não há necessidade de se fazer suposições sobre a superfície de busca, exceto que ela seja contínua e tenha um único mínimo na área de pesquisa. Uma importante propriedade do método é que ele converge mesmo quando o simplex inicial encontra-se entre dois ou mais “vales” da direção de busca, propriedade que não é comum a alguns outros métodos.

Luvizotto Jr. (1998) utiliza o procedimento de Nelder-Mead para detecção de fugas em sistemas de distribuição de água, com resultados bastante expressivos, valendo-se do simulador hidráulico SPERTS, gerando um modelo híbrido. Rardin descreve o procedimento como a seguir (apud LUVIZOTTO JÚNIOR, 1998):

³ Figura geométrica de N dimensões, consistindo de $N + 1$ vértices e de todos os segmentos de reta que os interconectam, as faces poligonais, etc., conhecido por poliedro convexo.

Em uma otimização sobre N variáveis de decisão, o algoritmo de Nelder-Mead constrói e mantém um conjunto de N+1 vetores de variáveis de busca ordenados, $\mathbf{a}^1, \dots, \mathbf{a}^{N+1}$, com soluções distintas, $\chi^{2(1)}, \dots, \chi^{2(N+1)}$, com $\chi^{2(1)}$ apresentando o melhor valor da função objetivo, $\chi^{2(2)}$ o segundo melhor valor e assim por diante. Cada iteração durante a pesquisa tenta substituir a solução mais inadequada $\chi^{2(N+1)}$, por uma melhor.

Figura 1 – Método de Nelder-Mead (1)

I - DIREÇÃO DE BUSCA

Na iteração t, o algoritmo de Nelder-Mead emprega a direção de pesquisa:

$$\Delta \mathbf{x} \cong \mathbf{x}^{(t)} - \mathbf{a}^{(N+1)} \quad (4)$$

que move a pior das soluções correntes, produzida por $\mathbf{a}^{(N+1)}$, em direção ao centróide das N melhores soluções, dado por:

$$\mathbf{x}^{(t)} \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{a}^{(i)} \quad (5)$$

A idéia é mover a pior solução do conjunto, para uma direção construída a partir das restantes.

Figura 2 – Método de Nelder-Mead (2)

II - LIMITAÇÃO DO TAMANHO DO PASSO

O algoritmo de Nelder-Mead explora novos conjuntos $\mathbf{x}^{(t)} + \lambda \Delta \mathbf{x}$, primeiro refletindo sobre o centróide, com $\lambda = 1$. Ao substituir-se o valor de $\mathbf{a}^{(N+1)}$, com o obtido através deste novo conjunto, se poderá obter um melhor ou pior conjunto, que será adotado no processo. Se o ponto de reflexão é o “novo melhor” vetor [$\chi^2(\mathbf{x}^{(t)}) > \chi^2(\mathbf{a}^{(1)})$], o algoritmo **expande** tentando $\lambda = 2$. Se o novo ponto for pior que o melhor ponto anterior, o procedimento **contraí**, tentando outro valor de λ , $\lambda = +1/2$ ou $\lambda = -1/2$.

Figura 3 – Método de Nelder-Mead (3)

III-ENCURTAMENTO

Quando a reflexão e a subsequente contração falham na melhora do conjunto de vetores do algoritmo de Nelder-Mead, aplica o procedimento de encurtamento de todo o conjunto de vetores através do vetor melhor adequado $\mathbf{a}^{(1)}$, onde:

$$\mathbf{a}^{(i)} \leftarrow \frac{1}{2} (\mathbf{a}^{(1)} + \mathbf{a}^{(i)}) \text{ para todo } i=2, \dots, n+1 \quad (6)$$

Figura 4 – Método de Nelder-Mead (4)

IV - CRITÉRIO DE PARADA

A pesquisa do procedimento de Nelder-Mead se encerra, quando os valores da função objetivo para o conjunto de pontos tornam-se essencialmente iguais. Esta condição pode ser estabelecida quando:

$$\sqrt{\frac{1}{N+1} \sum_{i=1}^{N+1} [\chi^2(\mathbf{a}^{(i)}) - \chi^2(\mathbf{x}^{(t)})]^2} \leq \varepsilon \quad (7)$$

Figura 5 – Método de Nelder-Mead (5)

Com o esquema indicado se processa a convergência dos N+1 vetores de variáveis de busca para o ótimo, segundo o critério de parada estabelecido.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Dentro da idéia de se ter um número limitado de estações de monitoramento, torna-se importante saber qual a representatividade que a adoção de uma rugosidade errada, para cada um dos tubos, terá nas pressões resultantes, ou de outra maneira, saber qual(is) o(s) tubo(s) influencia(m) mais o(s) NÓ(s). É a chamada Análise de Sensibilidade.

Para isso é interessante se tomar valores de dh/dC (variação da pressão nodal em relação a uma variação unitária do coeficiente de rugosidade, aqui adotado como sendo o da fórmula de Hazen-Williams). Assim, tais derivadas são calculadas numericamente, através de um pequeno incremento em C . O sistema é simulado e verificadas as alterações de pressão nos NÓs de interesse. À estrutura formada pelos valores de dh/dC , referentes a cada NÓ e a cada tubo, dá-se o nome de Matriz de Sensibilidade.

A fim de exemplificar a situação, sem maiores preocupações com geometria da rede, unidades, etc., apresenta-se a seguir uma tabela com valores de dh/dC de uma situação hipotética:

Tabela 1 – Valores de dh/dC para uma situação hipotética

TUBOS	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	Σ
Tubo I	3	12	8	23
Tubo II	7	15	14	36
Tubo III	4	3	5	12

Os somatórios para cada linha (cada tubo) são de 23, 36 e 12, indicando que, pelo método proposto, os tubos mais influentes, ou seja, os que devem ter a preferência para calibração são, em ordem, o tubo II, depois o tubo I e, finalmente, o tubo III.

PROPOSIÇÃO

Adotados os tubos para participarem do processo de calibração, resta escolher quais os NÓs que devem ser monitorados. Para tal sugere-se que, devido à estreita relação que um determinado tubo apresenta com o seu NÓ de jusante, os NÓs a serem monitorados sejam exatamente aqueles situados imediatamente após cada tubo a ser calibrado. Esse será definido como método do NÓ de jusante.

ESTUDOS DE CASO

O método descrito foi aplicado a duas redes hidráulicas, a fim de verificar a sua efetividade. Para tal, considera-se que o método terá sido eficiente se, quando da convergência do Modelo Híbrido, ou seja, igualdade entre pressões monitoradas e pressões calculadas, os valores de coeficiente de rugosidade C estimados (que levaram à tal convergência), tenham se aproximado o máximo possível dos coeficientes de rugosidade reais. As redes estão esquematizadas a seguir:

Tabela 3 – Cinco tubos calibrados (rede L)

NÓ	3*	4*	5*	6	7	8*	9	10*	11	12
TUBOS	5		3		4		9		13	
C real	100		100		100		100		120	
C: NÓ jus	100,0		100,0		100,0		100,1		120,0	

Tabela 4 – Quatro tubos calibrados (rede L)

NÓ	3*	4*	5*	6	7	8*	9	10	11	12
TUBOS	5		3		4		9		13	
C real	100		100		100		100		–	
C: NÓ jus	100,0		100,0		100,0		100,1		–	

Tabela 5 – Três tubos calibrados (rede L)

NÓ	3*	4*	5*	6	7	8	9	10	11	12
TUBOS	5		3		4		9		13	
C real	100		100		100		–		–	
C: NÓ jus	100,0		100,0		100,0		–		–	

Tabela 6 – Dois tubos calibrados (rede L)

NÓ	3*	4	5*	6	7	8	9	10	11	12
TUBOS	5		3		4		9		13	
C real	100		100		–		–		–	
C: NÓ jus	100,0		100,0		–		–		–	

Tabela 7 – Sete NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2*	3*	4	5	6*	7*	8	9*	10	11*	12	13	14	15	16*	17
TUBOS	1		35			34		4			2		$\sum [C_i - C_{real}]$			
C real	80		70			70		80			80		0			
C: NÓ jus	80,0		69,9			70,1		80,3			79,6		0,9			

Tabela 8 – Seis NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2*	3	4	5	6*	7*	8	9*	10	11*	12	13	14	15	16*	17
TUBOS	1		35			34		4			2		$\sum [C_i - C_{real}]$			
C real	80		70			70		80			80		0			
C: NÓ jus	80,0		69,9			70,1		80,2			79,7		0,7			

Tabela 9 – Cinco NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2*	3	4	5	6*	7*	8	9	10	11*	12	13	14	15	16*	17
TUBOS	1		35			34		4			2		$\sum [C_i - C_{real}]$			
C real	80		70			70		80			80		0			
C: NÓ jus	80,0		69,9			70,1		80,3			79,7		0,8			

Tabela 10 – Quatro NÓs monitorados (rede F)

Quadro N°05 monitoradas (rede F)																
NÓ	2*	3	4	5	6*	7	8	9	10	11*	12	13	14	15	16*	17
TUBOS			1		35		34		4		2		Σ [Ci – Creal]			
C real			80		70		70		80		80		0			
C: NÓ jus			80,5		69,8		69,8		80,0		82,0		2,9			

Tabela 11 – Três NÓs monitorados (rede F)

Tabla 11. Res NCS no ponderadas (Red 1)																
NÓ	2*	3	4	5	6*	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16*	17
TUBOS			1		35		34		4		2		Σ Ci – Creal			
C real			80		70		70		80		80		0			
C: NÓ jus			79,5		70,5		69,9		76,5		81,1		5,7			

Tabela 12 – dois NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2*	3	4	5	6*	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
TUBOS			1		35		34		4		2		Σ [Ci – Creal]			
C real			80		70		70		80		80		0			
C: NÓ jus			77,2		72,8		70,1		79,1		73,3		13,3			

CONCLUSÕES

O método do NÓ de jusante, associado à análise de sensibilidade, mostrou-se bastante eficiente na seleção das estações de monitoramento de pressões, para a calibração de redes hidráulicas pelo modelo híbrido.

REFERÊNCIAS

- FERRERI, G. B.; NAPOLI, E.; TUMBILOLO, A. Calibration of roughness in water distribution networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER PIPELINE SYSTEMS, 2., 1994, Edimburgo. **Proceedings...** p.379-396.
- GARCÍA-SERRA, J. **Estudio y mejora de las técnicas de calibración de modelos de redes hidráulicas**. 1988. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Universidade Politécnica de Valência, Valência, 1988.
- KOELLE, E. **Transientes Hidráulicos**. São Paulo: [198?]. Trabalho não publicado.
- LUVIZOTTO Jr., E. **Controle operacional de redes de abastecimento de água auxiliado por computador**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- _____. Programa de Pós-Doutoramento no Exterior: Relatório final. Valência: 1998. 204 p.
- _____. **Análise de redes hidráulicas a condutos forçados em regime permanente através do método elástico**. Campinas: 1999. 63 p. Trabalho não publicado.
- LUVIZOTTO Jr., E.; SOLIANI, R.; PIZZO, H. S.; JAQUIÊ, L. Análise de técnicas de busca para um modelo de detecção de fugas. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 19., 2000, Córdoba. **Anais...** p.309-318.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The Computer Journal**, v.7, p.308-313, 1965.

- PIZZO, H. S. **Calibração de modelos de distribuição de água através do acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder-Mead**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- SHIMADA, M. Time-marching approach for pipe steady flows. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.114, n.11, p.1301-1320, nov.1988.
- SOLOMATINE, D. P. Genetic and other global optimization algorithms – comparison and use in calibration problems. In: INTERNAL CONFERENCE ON HYDROINFORMATICS, 1998, Rotterdam. **Proceedings...**
- WALSKI, T.M. Assuring accurate model calibration. **Journal of AWWA: management and operations**, p.38-41, dec.1985.
- WRIGHT, M. H. Direct search methods: once scorned, now respectable. In: DUNDEE BIENNIAL CONFERENCE IN NUMERICAL ANALYSIS, 1995, Dundee. **Proceedings...** Harlow, UK: 1996. p. 191-208.