

# DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FUGAS

## EM

### REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Dídia COVAS<sup>(1)</sup>; A. Betâmio de ALMEIDA<sup>(2)</sup>; Helena RAMOS<sup>(3)</sup>

#### RESUMO

As entidades responsáveis pela distribuição de água têm como uma das principais preocupações actuais o controlo e a detecção de fugas existentes no sistema. Em geral, não é possível quantificar com rigor as fugas existentes, podendo estas variar entre 10 e 40% da água total distribuída. O investimento em medidas para a redução e o controlo das fugas pode ser o modo mais eficiente para responder aos crescentes consumos e à necessidade de um desenvolvimento sustentável.

Neste trabalho, procede-se à descrição e aplicação de um método de detecção e localização de fugas em redes de distribuição de água, introduzido por LIGGETT e CHEN (1995). Este método tem por base a medição da pressão (ou do caudal) em diversos pontos da rede, e na previsão da localização e dimensão das fugas ou roturas existentes mediante a comparação dos valores medidos com os calculados por simulação computacional. A solução do problema corresponde à situação para a qual o erro quadrático médio entre os valores medidos e os calculados é mínimo. É um processo determinístico e iterativo, que recorre ao método de Levenberg-Maquardt para efectuar a minimização.

A eficiência do método exige que se conheçam com rigor as características de resistência ao escoamento das condutas, ou que estas sejam estimadas em simultâneo com a localização das fugas. Este método pode ser aplicado recorrendo a modelos elásticos ou modelos estáticos, sendo os primeiros os mais aconselháveis uma vez que permitem efectuar a localização de fugas e a calibração do sistema em simultâneo, não exigem grande volume de medições, permitem detectar roturas súbitas através do regime transitório gerado, além de se adequarem melhor à monitorização contínua das redes. São apresentados alguns exemplos de aplicação da referida técnica a sistemas hidráulicos para a detecção de fugas.

**Palavras chave:** fugas, detecção, localização, redes, método de detecção dinâmica

---

<sup>(1)</sup> Assistente Estagiária do IST, UTL, Lisboa, Portugal

<sup>(2)</sup> Prof. Catedrático do IST, UTL, Lisboa, Portugal

<sup>(3)</sup> Prof. Auxiliar do IST, UTL, Lisboa, Portugal

# 1 - INTRODUÇÃO

Diversos autores propuseram métodos para a detecção de fugas ou roturas em condutas recorrendo a medições de caudal e de pressão, diferindo, os métodos, na técnica utilizada para a detecção-localização.

BILLMANN *et al.*(1987) e BISHOP (1994) recorrem a bases de dados do sistema, pré-construídas com base em medições e/ou simulações do sistema. A localização das fugas é efectuada por comparação das medições com os dados existentes. São conhecidos por métodos de redes neurais artificiais (*Artificial Neural Networks Methods*), pela sua técnica ter sido inspirada na transmissão de impulsos entre os neurónios do sistema nervoso central (Figura 1). LIGGETT *et al.* (1994 e 1995) propôs uma técnica que recorre a medições pontuais de pressão e/ou de caudal sendo a localização-deteção de fugas efectuada por comparação destes valores com os resultados da simulação do sistema (Figura 1).

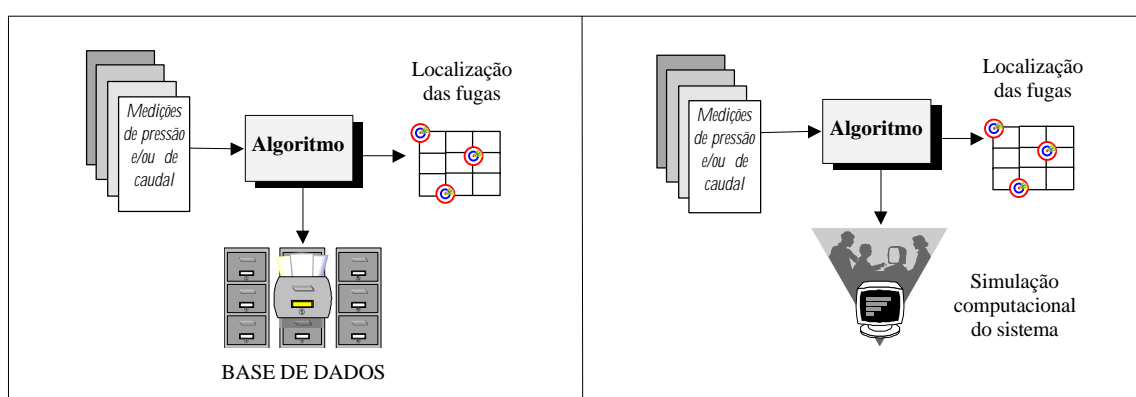


Figura 1 - Métodos de redes neurais artificiais (à esquerda). Métodos de simulação do sistema (à direita)

Muitos destes autores não desenvolveram os estudos directamente direccionados para as redes de distribuição de água, mas sim para redes da indústria química, em que as fugas dos fluidos, líquidos ou gasosos, podem provocar graves problemas para o ambiente. No entanto, as conclusões adequam-se igualmente ao sector da água.

## 2 - TÉCNICA DE DETECÇÃO DE FUGAS

### 2.1 - Introdução

A técnica a seguir apresentada é um método, desenvolvido para regime variável, apresentado por LIGGETT e CHEN (1995). Segundo este autor, a análise das redes de distribuição usando modelos de regime permanente é uma técnica teoricamente eficiente e precisa, mas tem a desvantagem de ser necessário conhecer com rigor as características do sistema, nomeadamente os factores de resistência ao escoamento, para se ter alguma confiança nos resultados obtidos. No entanto, a calibração do sistema não é fácil, em especial nos sistemas mais antigos e mais sujeitos a fugas. Muitas vezes, a calibração do sistema requer mais do que um regime estacionário. Por outro lado, se a monitorização do sistema é contínua, a análise em regime permanente não é a mais adequada, uma vez que as condições de funcionamento do sistema são variáveis.

De acordo com LIGGETT e CHEN (1995), a análise através de modelos elásticos permite efectuar a calibração do sistema e a detecção de fugas em simultâneo. Por outro lado, porque funciona em regime variável, adequa-se melhor à monitorização normal das redes. Com efeito, ao efectuar, contínua ou periodicamente, uma calibração do sistema permite aferir o estado geral de conservação da rede e antever problemas que possam ocorrer. Uma outra vantagem é permitir a rápida localização de roturas súbitas pela análise do regime transitório induzido.

## 2.2 - Método de detecção dinâmica

No método de detecção dinâmica, algumas variáveis do sistema não são conhecidas, como sejam os valores e a localização das fugas e/ou a rugosidade absoluta das condutas, mas é utilizada informação adicional referente a medições de pressão ou de caudal em determinados pontos da rede. No presente estudo, utilizam-se apenas medições de pressão uma vez que são mais fáceis de efectuar do que as de caudal, bastando, para o efeito, utilizar bocas de incêndio. Por seu turno, os transdutores de pressão permitem efectuar o registo de uma forma quase contínua, enquanto que os medidores de caudal não reagem instantaneamente às variações caudal, assim como à respectiva inversão de sentido.

Admita-se que se pretendem detectar as fugas existentes numa dada zona de uma rede de distribuição de água, para a qual se conseguem controlar todas as entradas e saídas de caudal, assim como, as pressões nos pontos de ligação com a restante rede.

Colocam-se transdutores de pressão em  $N$  secções da rede e efectua-se o registo da pressão durante um determinado período de tempo. Dispõem-se, assim, de  $M$  valores de medição correspondentes a  $N$  nós da rede e a  $T$  instantes de tempo ( $M=N \cdot T$ ).

Considere-se, ainda, que se admite-se a presença de fugas em toda, ou em parte, da zona em estudo, mais concretamente, na área de influência<sup>(1)</sup> de  $L$  nós<sup>(2)</sup> da rede. As incógnitas do problema são as áreas efectivas de fuga<sup>(3)</sup>,  $A_F$ , em cada um destes nós e, caso se pretenda calibrar<sup>(4)</sup> em simultâneo o sistema hidráulico, incluem-se também, nas incógnitas, a rugosidade absoluta de cada uma das condutas.

A técnica apresentada tem por base a minimização da soma dos erros quadráticos entre os valores de pressão medidos e os calculados por simulação computacional, em cada um dos nós com medição, ao longo de todo o período de registo, expressa através da seguinte função de erro:

$$c = \sum_{i=1}^M (H_i^m - H_i)^2 \quad (1)$$

---

<sup>(1)</sup> Área de influência de um nó é a zona da rede circundante ou na vizinhança do nó.

<sup>(2)</sup> Nó de uma rede é um ponto de confluência de várias condutas, uma secção de mudança de características da conduta ou um ponto onde existe um órgão hidráulico qualquer.

<sup>(3)</sup> Área efectiva de fuga,  $A_F$ , é o produto do coeficiente de vazão,  $C_V$ , pela área real da fuga,  $A$ .

<sup>(4)</sup> Calibração de um sistema hidráulico corresponde à determinação das características resistentes de todas as suas condutas, traduzidas pela rugosidade absoluta  $k$ .

sendo  $H_i^m$  e  $H_i$ , os valores das cotas piezométricas medida e calculada, respectivamente, num determinado nó e num dado instante;  $M$ , o número total de medições efectuadas.

O valor mínimo de  $c$  corresponderá ao ponto em que a sua derivada em ordem a cada uma das incógnitas  $a_i$  (áreas de fuga e/ou rugosidade das condutas) seja nula. No presente estudo, admitiu-se que a rede se encontrava bem calibrada sendo as únicas incógnitas as áreas de fuga.

Tratando-se de um problema de determinação de raízes de uma equação, pode recorrer-se ao método de Levenberg-Maquardt para a sua resolução, sendo a solução dada iterativamente por:

$$\{a\}^{n+1} = \{a\}^n - [H^* + II]^{-1} [G] \quad (2)$$

onde  $n$ , representa o número da iteração;  $a$ , o vector das incógnitas  $a_i$  (áreas de fugas);  $I$ , uma constante de relaxação para acelerar o processo de convergência;  $I$  é a matriz identidade ( $I_{ii}=1$ ;  $I_{ij}=0$  com  $i \neq j$ );  $G$ , a matriz Gradiente e  $H^*$ , a matriz Hessiana definidas, respectivamente, por:

$$G_i = \frac{\partial c}{\partial a_i} = -2 \sum_{j=1}^M (H_j^m - H_j) \frac{\partial H_j}{\partial a_i} \quad (3)$$

$$H_{jk}^* = \frac{\partial^2 c}{\partial a_j \partial a_k} = 2 \sum_{i=1}^M \left[ \frac{\partial H_i}{\partial a_j} \frac{\partial H_i}{\partial a_k} - (H_i^m - H_i) \frac{\partial^2 H_i}{\partial a_j \partial a_k} \right] \quad (4)$$

O segundo termo da equação (4) pode ser desprezado uma vez que, próximo da solução, o termo  $(H_i^m - H_i)$  é muito pequeno. Exprimindo as matrizes Gradiente e Hessiana em termos da matriz Jacobiana  $J$ , tal que  $G = -2J^T \{H^m - H\}$  e  $H^* = 2J^T J$ , a equação (2) toma a seguinte forma:

$$\underbrace{\{a\}^{n+1}}_{(L \times 1)} = \underbrace{\{a\}^n}_{(L \times 1)} - \underbrace{[J^T J + II]^{-1}}_{(L \times L)} \underbrace{J^T}_{(L \times M)} \underbrace{\{H^m - H\}}_{(M \times 1)} \quad (5)$$

sendo  $J$ , a matriz jacobiana, definida por:

$$J = \left[ \begin{array}{cccc} \frac{\partial H_1}{\partial a_1} & \frac{\partial H_1}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial H_1}{\partial a_L} \\ \frac{\partial H_2}{\partial a_1} & \frac{\partial H_2}{\partial a_2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial H_M}{\partial a_1} & \dots & \dots & \frac{\partial H_M}{\partial a_L} \end{array} \right] \quad \left. \vphantom{\begin{array}{c} \frac{\partial H_1}{\partial a_1} \\ \frac{\partial H_2}{\partial a_1} \\ \dots \\ \frac{\partial H_M}{\partial a_1} \end{array}} \right\} \text{número de medições, } M=N \cdot T \quad (6)$$

número de fugas possíveis,  $L$

As derivadas são calculadas numericamente, por diferenças finitas, através da simulação sistemática do sistema hidráulico  $L+1$  vezes (sendo  $L$  o número de nós com possíveis fugas),

mantendo as áreas de fuga iguais às da iteração  $n$ , e introduzindo, em cada simulação, uma pequena perturbação na área de fuga para a qual se pretende calcular a derivada. A primeira simulação computacional permite a determinação dos valores das cotas piezométricas nos nós com medição, para os valores das áreas de fuga relativas à iteração  $n$ , organizadas no vector  $\mathbf{H}\{a\}^n$ . Cada uma das  $L$  simulações seguintes tem como objectivo a determinação da resposta do sistema (em termos de cota piezométrica), a uma pequena perturbação  $\mathbf{D}a_i$ , introduzida no nó  $i$  -vector  $\mathbf{H}_i(\{a\}^n + \Delta a_i)$ .

Conhecidos os valores das cotas piezométricas sem e com as perturbações  $\mathbf{D}a_i$ , calculam-se numericamente as derivadas pela diferença entre o vector  $\mathbf{H}_i(\{a\}^n + \Delta a_i)$  e  $\mathbf{H}\{a\}^n$ :

$$\frac{\partial H_i}{\partial a_j} \approx \frac{H_i(\{a\}^n + \mathbf{D}a_j) - H_i(\{a\}^n)}{\mathbf{D}a_j} \quad (7)$$

O valor de  $\Delta a_j$  deverá ser relativamente pequeno por forma a não conduzir a grandes afastamentos da solução analítica, por outro lado, não deverá ser demasiado pequeno para não se confundir com os erros de aproximação do compilador.

Todas as derivadas são reunidas na matriz Jacobiana e os valores das áreas de fuga relativas a esta iteração  $n+1$  são calculadas utilizando a equação (5). Esta equação deverá ser resolvida iterativamente, alterando, em cada passo de cálculo, os valores dos parâmetros - as áreas das fugas e/ou a rugosidade absoluta das condutas - por forma a tornar os valores das medições tão próximos quanto possível dos calculados. O processo iterativo terminará logo que as alterações nos parâmetros,  $a_i$ , sejam desprezáveis.

### 2.2.1 - Programa de cálculo

Desenvolveram-se dois modelos matemáticos: programa LEAKSEEK, que permite detectar sistematicamente a localização de fugas num sistema hidráulico, desde que sejam conhecidas todas as condições de fronteira do sistema e sejam fornecidas medições em alguns dos nós, e o programa REDE que permite simular o funcionamento do sistema em regime variável. Os modelos funcionam indiferentemente para condições de regime permanente e de regime variável.

A aplicação do método de Levenberg-Maquardt (programa LEAKSEEK), ao caso em estudo, pode resumir-se nos seguintes passos.

- (i) Arbitrio de um valor inicial para as possíveis áreas de fuga  $\{a\}$ , por exemplo todas as áreas de fuga iguais a zero.
- (ii) Simulação computacional do sistema recorrendo ao programa REDE e cálculo do valor da função  $\mathbf{c}\{a\}$  por (1).
- (iii) Escolha de um valor relativamente pequeno para  $I$ , por forma a não instabilizar o sistema.

- (iv) Cálculo da matriz jacobiana,  $\mathbf{J}$ , recorrendo à simulação sistemática do sistema hidráulico  $L$  vezes, através do programa REDE.
- (v) Cálculo do valor de  $\{a\}^{n+1}$ .
- (vi) Cálculo do valor da função  $c(\{a\}^{n+1})$ .
- (vii) Se  $c(\{a\}^{n+1}) \geq c(\{a\}^n)$  então aumenta-se  $I$ , mantém-se a solução  $\{a\}^n$  igual à da iteração anterior e retorna-se ao passo (iv).

Se  $c(\{a\}^{n+1}) < c(\{a\}^n)$  então diminui-se  $I$ , actualiza-se a solução  $\{a\}^n$  com  $\{a\}^{n+1}$ , e retorna-se ao passo (iv).

A condição de paragem é dada pela iteração em que  $c$  diminui de um valor inferior a um erro previamente estipulado, ou quando é muito próximo de zero. Nunca se deve parar as iterações, numa situação em que  $c$  aumente, porque isso só mostra que a solução ainda não convergiu.

O programa LEAKSEEK apresenta como resultados, a quantificação da área do orifício da fuga em cada um dos nós indicados à partida, como tendo possíveis fugas. Este resultado não indica com rigor a localização de uma fuga, mas uma zona com maior probabilidade de esta se encontrar. Para a localização exacta das fugas, deverão ser criados nós auxiliares de cálculo, na vizinhança dos nós com probabilidade de a terem, e o processo deverá ser repetido, utilizando os mesmos valores de medição.

### 3 - APLICAÇÕES NUMÉRICAS

Aplicou-se a técnica atrás descrita a dois sistemas hidráulicos. Os valores das medições de pressão foram gerados através da simulação computacional do sistema hidráulico com fugas. Foi adicionado um erro aleatório às medições de cerca de 2-4% por forma a ter em conta os erros cometidos pelos aparelhos de medição. A técnica foi aplicada utilizando registos de pressão para situações de regime permanente e de regime variável.

#### 3.1 - Detecção de fugas num sistema simples - Sistema 1

O Sistema 1 é constituído por uma conduta de características uniformes ( $D=0.2$  m;  $c=250$  m/s;  $k=0.0009$  m,  $L=160$  m), com um reservatório (RES), a montante, e uma estrutura de controlo de caudal com saída para a atmosfera (ECA), a jusante. Foram estudados dois sistemas hidráulicos (Figura 2): Sistema 1A - caracterizado pela existência de três fugas nos nós 2, 3 e 4, cuja área efectiva  $A_F$  é 0.00001, 0.0001 e 0.00001 m<sup>2</sup>, respectivamente, às quais correspondem caudais relativos de fuga  $Q_F/Q$  de 0.55%, 5.50% e 0.55%; Sistema 1B - caracterizado por uma fuga isolada no trecho 4, à distância  $X$  do nó 3, com uma área efectiva  $A_F$  de 0.00001 ( $Q_F/Q$  de 0.55%).

Admite-se que as fugas se encontram em qualquer dos nós 2, 3 e 4. São efectuadas medições, apenas, no nó 5, durante um período de 5 s, com um intervalo de aquisição  $\Delta t$  de 0.1 s, em duas situações respectivamente: em regime permanente e durante a ocorrência de um

regime transitório provocado por uma manobra linear de fechamento da ECA com uma duração de 2 s. Os resultados são expressos em termos da evolução da área relativa de fuga  $A_{Fi}/A_F$  (sendo  $A_{Fi}$ , a área de fuga correspondente à iteração  $i$  e  $A_F$ , a área real de fuga) ao longo das várias iterações  $i$ .

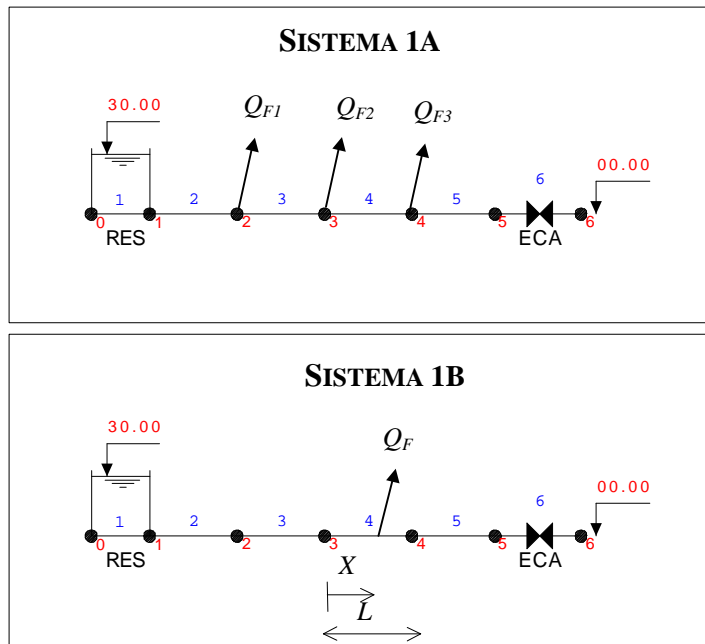


Figura 2 – Topologia dos SISTEMAS 1A e 1B

### Análise do SISTEMA 1A

No que se refere, ao registo de medições no nó 5, em regime variável ou permanente, verifica-se que no caso de análise em regime variável, o processo de convergência é bastante mais rápido (Figura 3). O que se justifica pelo facto de um regime variável ser equivalente a uma sucessão de regimes permanentes correlacionados entre si, transportando muito mais informação sobre o sistema. Nas mesmas figuras, apresenta-se a evolução da função de erro  $c$  e da constante de Levenberg-Maquardt  $\lambda$ , durante o processo iterativo. Próximo da solução, estes tendem para valores muito pequenos, o que prova a convergência do método.

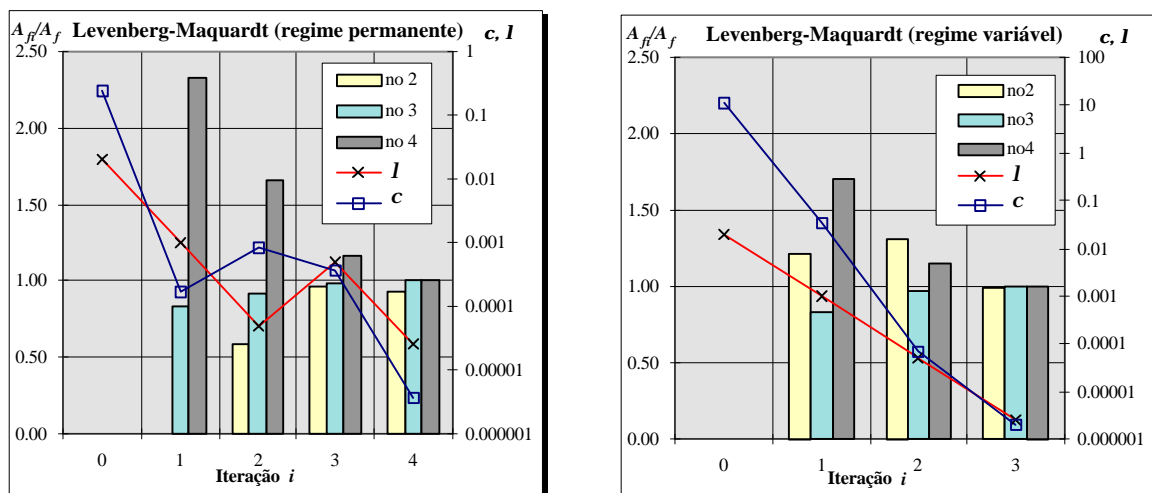


Figura 3 - Convergência das áreas relativas de fuga, utilizando medições de regime permanente e regime variável no nó 5

## Análise do SISTEMA 1B

Analisaram-se três localizações de fuga não coincidentes com os nós: a fuga localizada a uma distância relativa  $X/L$  do nó 3 de 25%, 50% e 75%. Admitiu-se que a área de influência da fuga estaria associada aos nós 2, 3 e 4, não existindo nenhum nó na secção da fuga. Os resultados apresentam-se na Figura 4.

Se a fuga se localizar mais próximo de um dos nós de extremidade do trecho, o método aponta para esse nó como o correspondente à área de influência da fuga, embora, atribua ao nó da outra extremidade, uma contribuição com uma parcela relativamente pequena para a área de fuga. Por exemplo, para  $X/L=25%$ , a área de fuga correspondente ao nó 3 é cerca de 95% da real e no nó 4 é 5%; para  $X/L=75%$ , a área de fuga correspondente ao nó 3 é cerca de 10% da real e no nó 4 é 90%.

Se a fuga se localizar exactamente a meio do trecho, o método aponta os dois nós de extremidades como correspondendo à área de influência da fuga, mas com pesos diferentes. Para  $X/L=50%$ , a área de fuga correspondente ao nó 3 é cerca de 70% da real e no nó 4 é 30%. Isto deve-se ao facto de a cota piezométrica no nó se montante ser superior à do nó de jusante. A determinação da localização exacta da fuga pressupõe que o trecho 4 seja discretizado em mais nós e que o processo seja repetido.

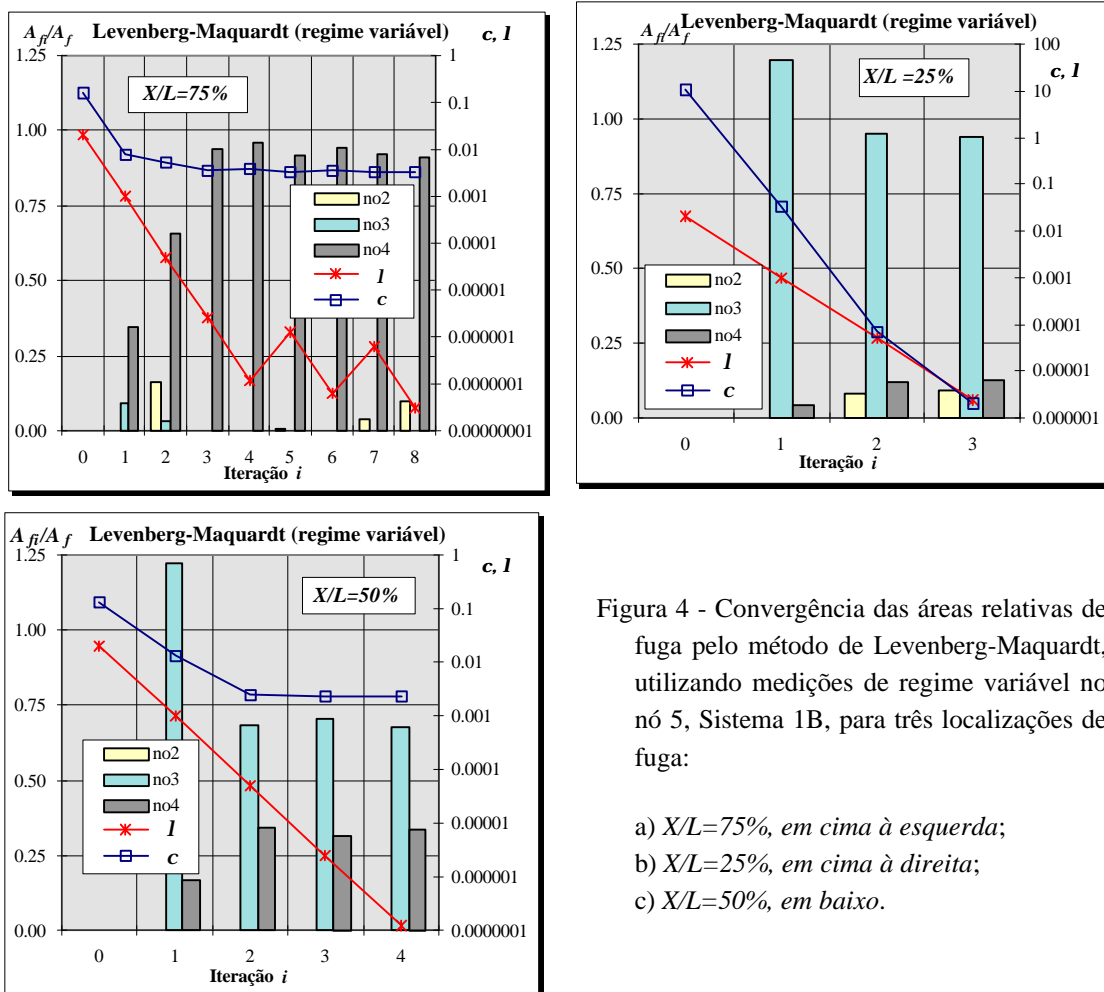


Figura 4 - Convergência das áreas relativas de fuga pelo método de Levenberg-Maquardt, utilizando medições de regime variável no nó 5, Sistema 1B, para três localizações de fuga:

- a)  $X/L=75%$ , em cima à esquerda;
- b)  $X/L=25%$ , em cima à direita;
- c)  $X/L=50%$ , em baixo.

### 3.2 - Detecção de fugas numa rede - Sistema 2

O SISTEMA 2 é constituído por uma rede de condutas de características uniformes ( $D=0.2$  m;  $c=1000$  m/s;  $k=0.0009$  m;  $L=100$  m), com um reservatório (RES), a montante, e uma estrutura de controlo em reservatório (ECR), a jusante (Figura 5). Foram estudados dois sistemas (Figura 5): SISTEMA 2A - caracterizado pela existência de três fugas nos nós 3, 6 e 8, cuja área efectiva  $A_F$  é 0.00002, 0.00001 e 0.00003 m<sup>2</sup>, respectivamente, às quais correspondem caudais relativos de fuga,  $Q_F/Q$ , de 2%, 3.5% e 2.5%; SISTEMA 2B - caracterizado por uma fuga isolada no trecho 9, à distância  $X_6$  do nó 6 e  $X_7$  do nó 7, com uma área efectiva  $A_F$  de 0.00001 ( $Q_F/Q$  de 1%).

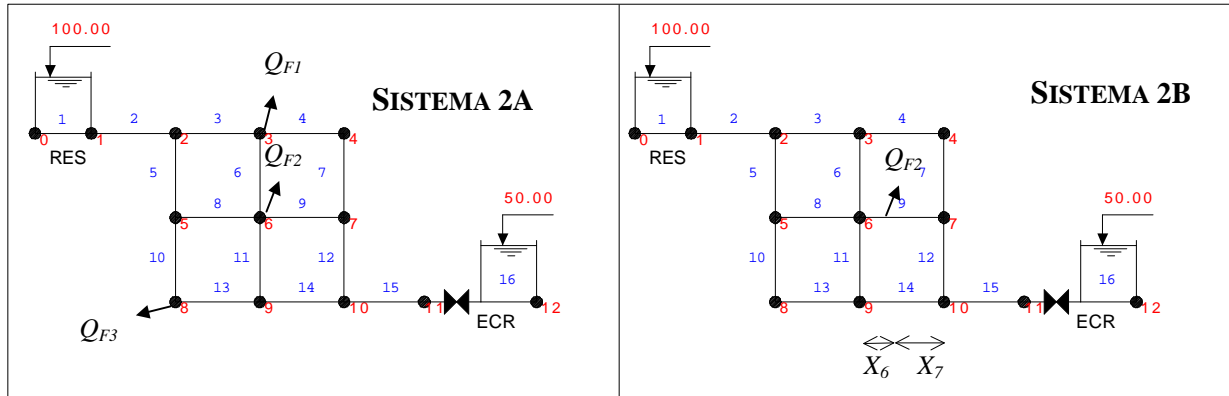


Figura 5 – Topologia da rede - SISTEMAS 2A e 2B

Nos dois sistemas admite-se que as fugas se encontram em qualquer dos nós entre 2 e 10. São efectuadas medições de pressão, nos nós 4, 8 e 11, durante um período de 5 s, com um intervalo de aquisição  $\Delta t$  de 0.1 s, para as situações de regime permanente e durante a ocorrência de um regime transitório (provocado por uma manobra linear de fechamento da ECR com uma duração de 2 s). Os resultados são apresentados em termos de área efectiva  $A_F$  de fuga.

#### *Análise do SISTEMA 2A*

Apresenta-se na Figura 6, a evolução das áreas de fugas nos diversos nós com base em medições efectuadas em regime variável. Para os dados de regime variável, na 1ª iteração, o método aponta imediatamente para os nós com fugas estimando a dimensão destas ainda que com um erro de 10 a 20%. A convergência para a solução ocorre no final de 4 iterações, conduzindo a estimativas de áreas de fuga com erros inferiores a 3%.

#### *Análise do SISTEMA 2B*

Analisaram-se três localizações de uma fuga não coincidente com nenhum nó do sistema: a fuga localizada no trecho 9, a distância relativas  $X_6/(X_6+X_7)$  do nó 6 de 25%, 50 % e 75 %. Admitiu-se que a área de influência da fuga estaria localizada entre os nós 2 e 10. Utilizaram-se as medições relativas ao regime transitório nos nós 4, 8 e 11. Os resultados apresentam-se na Figura 7.

Analogamente ao SISTEMA 1B, o método aponta para as áreas de influência da fuga correspondentes aos nós de extremidade do trecho onde esta se encontra, nó 6 e 7.

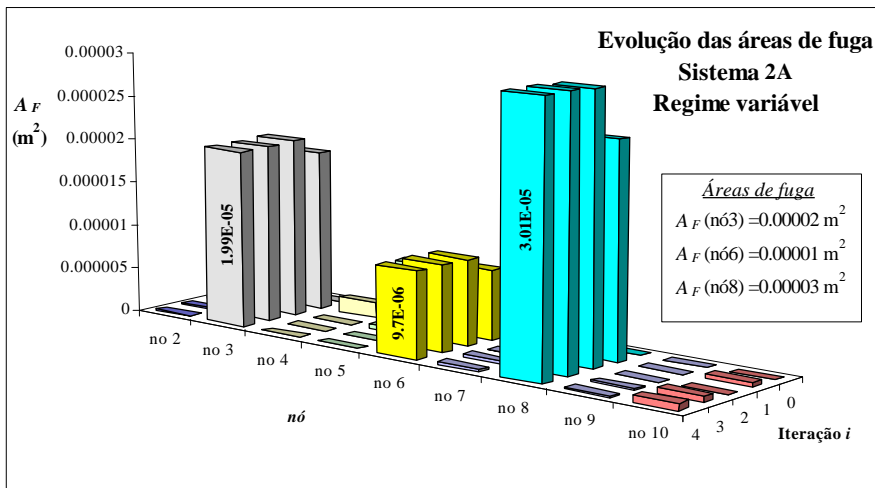


Figura 6 - Convergência das áreas relativas de fuga, utilizando medições de regime variável nos nós 4, 8 e 11

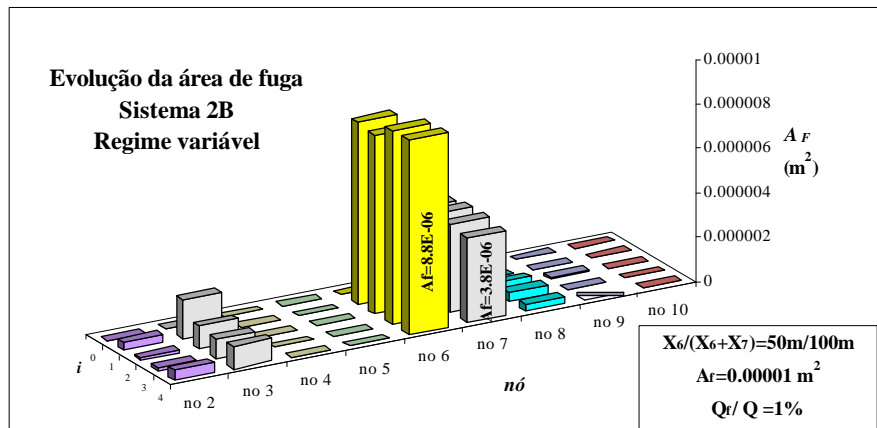
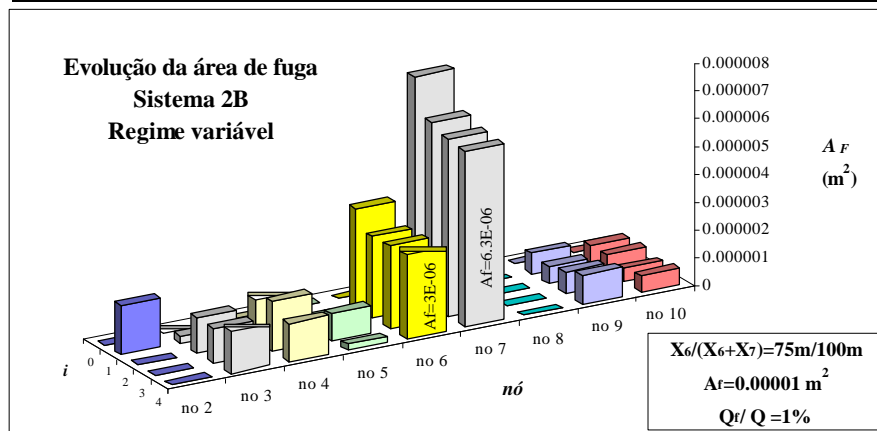
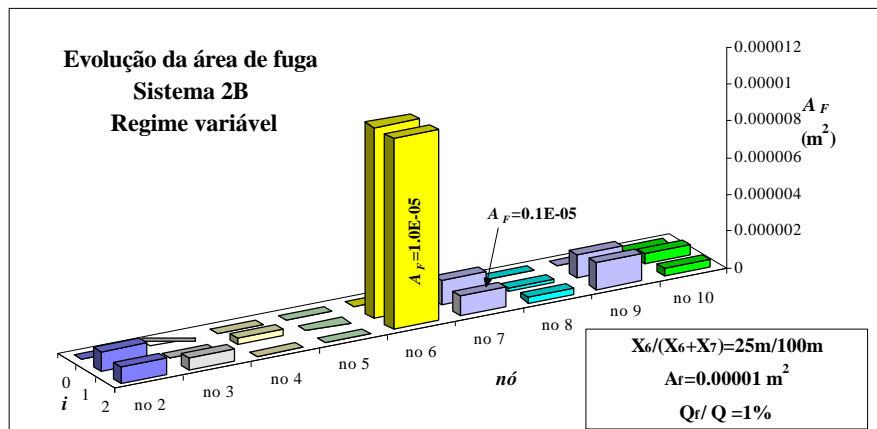


Figura 7 - Convergência das áreas relativas de fuga, utilizando medições de regime variável nos nós 4, 8 e 11

No entanto, porque se trata de uma rede de distribuição, sistema hidráulico mais complexo do que o SISTEMA 1, o facto da estimativa da área de fuga ser superior num dos nós de extremidade, não significa necessariamente que a fuga se encontre mais próximo deste nó. Repare-se, por exemplo, na situação  $X_6/(X_6+X_7)=50\text{m}/50\text{m}$ , em que a área de fuga do nó 6 é muito superior à do nó 7 -  $A_F(\text{nó6})=0.0000088\text{m}^2$  e  $A_F(\text{nó7})=0.0000038\text{m}^2$  - indiciando uma maior proximidade desta ao primeiro, o que é falso.

Se a fuga estiver localizada mais próxima de um dos nós de extremidade do trecho, o método aponta para esse nó como o correspondente à área de influência da fuga, embora atribua ao nó da outra extremidade, uma área de fuga. Por exemplo, para  $X_6/(X_6+X_7)=75\text{m}/25\text{m}$ , a área estimada de fuga correspondente ao nó 6 é cerca de 30% da real e no nó 7 é 65%.

No entanto, para qualquer dos casos estudados, não há dúvida que a fuga se localiza no trecho 9 entre os nós 6 e 7, uma vez que são aqueles para os quais a área de fuga é maior. A localização da fuga seria determinada com rigor, discretizando o trecho 9 em mais nós de cálculo e repetindo o processo até que a distância entre dois nós sucessivos com fuga seja suficientemente pequena.

### 3.2.1 Conclusões gerais e dificuldades práticas de aplicação

A técnica utilizada indica efectivamente as zonas com maior probabilidade de sofrerem de fugas. O processo é bastante eficaz quando os nós de cálculo coincidem com as secções das fugas; caso contrário, aponta para os nós adjacentes à mesma com ponderações diferentes da área de fuga. Estas ponderações podem, ou não, ser indicadores de uma maior proximidade da fuga a um dado nó de cálculo, no entanto, são mais sensíveis à pressão nos nós, atribuindo, normalmente, uma maior área de fuga ao nó de extremidade do trecho com fuga com maior pressão.

No presente estudo, verificou-se que a utilização de medições efectuadas em regime variável é mais vantajoso do que as de regime permanente uma vez que estas transportam muito mais informação correspondente a uma sucessão de diversos regimes permanentes. Embora o processo de convergência seja mais rápido utilizando os dados de medição de regime variável, nem por isso o tempo de cálculo é menor, uma vez que o volume de dados envolvidos, decorrentes dos diversos instantes de tempo, é maior. Por outro lado, de acordo com LIGGETT e CHEN (1995), este tipo de análise não é tão sensível aos factores de resistência ao escoamento sobressaindo o efeito das fugas. Porque utiliza um grande volume de dados permite efectuar a calibração do sistema em simultâneo com a detecção de fugas embora o processo de convergência para os factores de resistência ao escoamento seja muito mais lento. Permite, ainda, efectuar a monitorização contínua do sistema.

Porque a técnica apresentada pressupõe o cálculo sistemático das derivadas em cada iteração para todos os nós com medição e durante todo o período de cálculo, pode tornar-se moroso para um sistema com muitos nós com possíveis fugas.

Coloca-se, também, o problema de qual a relação entre o número de nós com medição necessários para a detecção de fugas e o número de nós da rede. Empiricamente, os resultados mostraram que a relação é de 1 para 3, sendo os nós da rede, não o número total de nós de

cálculo mas o número de nós principais (confluência de várias condutas ou secções com outros órgãos). No entanto, a optar por uma técnica desta natureza para casos reais exige que seja efectuada uma análise de sensibilidade mais detalhada com ensaios experimentais e testes em campo.

#### **4 - MONITORIZAÇÃO E CONTROLO PERMANENTE DE REDES**

Face às técnicas e aos métodos existentes para a detecção e localização de fugas, e ao apresentado neste trabalho, sugere-se uma nova metodologia com base na monitorização contínua de redes de distribuição de água.

A ideia base seria associar a técnica apresentada, a um sistema SCADA<sup>(1)</sup> ou de telegestão com medições de pressão e de caudal em pontos estratégicos da rede, permitindo, assim, o controlo permanente do estado da rede em termos de fugas e roturas, evolução dos consumos, estado de conservação das condutas e controlo do funcionamento de outros órgãos. Sempre que se detectasse uma anomalia com carácter de fuga ou de rotura numa dada zona, ou se instalavam mais pontos de medição, ou se recorreria a uma das técnicas existentes de detecção de fugas.

Todos os dados seriam reunidos numa estação central onde estaria instalado um computador que compilaria toda a informação e a trataria com base no modelo matemático, LEAKSEEK. A implementação deste sistema teria de ser efectuada em três fases. Na primeira fase, seriam recolhidos todos os dados, analisada a rede e definidos os pontos de medição, de preferência em pontos de fácil acesso, por exemplo caixas de válvulas. Estes dados seriam provenientes de Sistemas de Informação Geográfica e Bases de Dados de Clientes (consumidores). Numa segunda fase, seria instalado todo o equipamento de medição e calibrado o modelo matemático desenvolvido para a detecção de fugas, ou seja, seriam automaticamente determinados os factores de resistência ao escoamento e as fugas existentes. Na terceira fase, seria posta em prática a técnica de monitorização contínua do sistema utilizando o modelo desenvolvido.

Poderiam ser utilizados dois tipos de dados: os resultantes de grandes choques hidráulicos na zona provocados por manobras de válvulas, bombas e eventualmente roturas; e os relativos ao regime permanente nocturno. Os dados seriam analisados em conjunto e as conclusões resultariam da análise das duas situações. Os dados seriam recolhidos em simultâneo em todos os pontos de medição e analisados por períodos compatíveis com a frequência de aquisição dos aparelhos de medição de pressão e de caudal e com a capacidade do computador.

Antes de prosseguir com outra técnica mais apurada para a detecção e localização de fugas, teriam de se analisados os consumos nocturnos, as ligações clandestinas e as não contabilizadas (por exemplo, lavagem de ruas e rega de jardins). Se nada justificasse os

---

<sup>(1)</sup> *Supervisory Control and Data Acquisition* ou SCADA é um sistema de terminais de recolha de dados da instrumentação existente numa dada zona, em comunicação com uma unidade central, permitindo controlar o funcionamento da rede e alertar para eventuais problemas que possam ocorrer.

consumos e as quedas de pressão localizadas, então seriam possivelmente fugas ou roturas. Nessas zonas, teriam de ser aplicados outros métodos como sejam o *Step-testing* ou o subzonamento e, posteriormente a técnicas para a localização em pormenor (por exemplo, métodos acústicos).

A técnica de detecção e localização apresentada associada a um sistema de telegestão que transmita para uma unidade central, via telefone ou via rádio, as medições de pressão (ou de caudal) efectuadas e, associada a sistemas de informação geográfica e bases de dados diversas, que permitam caracterizar física e hidráulicamente a rede, permitirá um controlo eficiente do funcionamento hidráulico da rede em simultâneo com a detecção e localização de fugas (Figura 8).

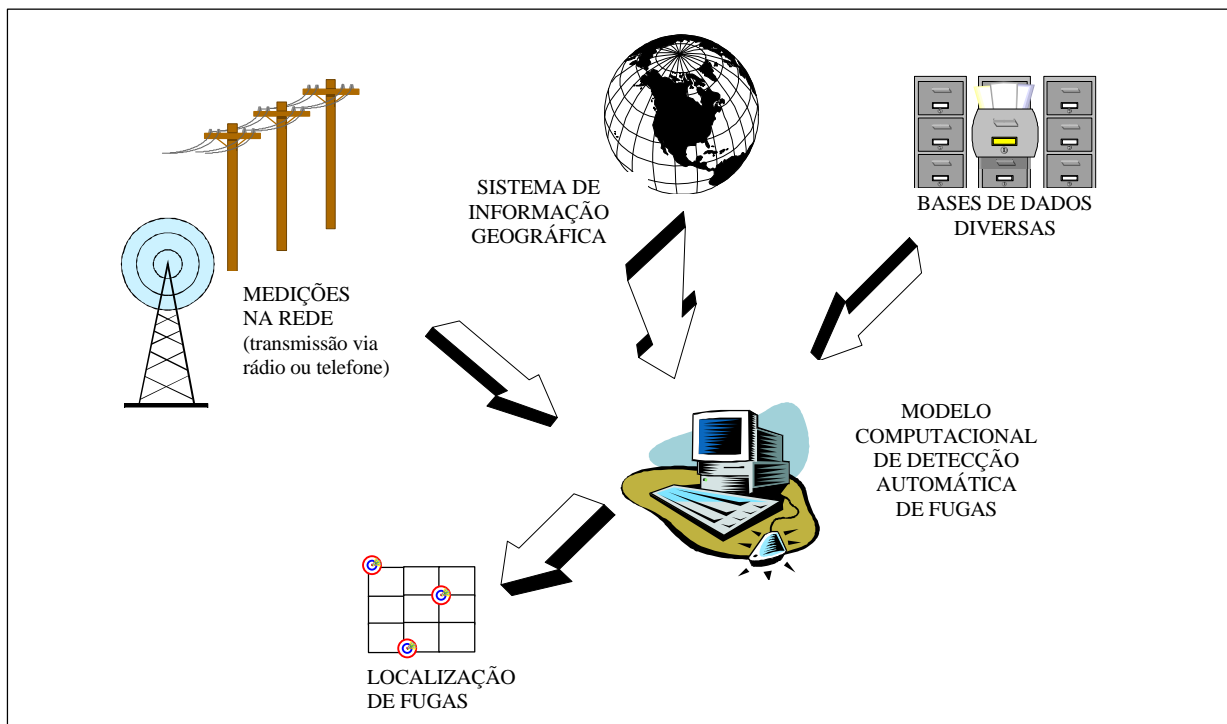


Figura 8 - Sistema integrado de detecção e localização de fugas

## SIMBOLOGIA

$A_F$	: Área efectiva de fuga	[L <sup>2</sup> ]
$a_i$	: Parâmetro desconhecido (área de fuga ou coeficiente de resistência ao escoam.)	[-]
$c$	: Celeridade das ondas elásticas	[LT <sup>-1</sup> ]
$D$	: Diâmetro interno da conduta	[L]
$G$	: Matriz gradiente	[-]
$H_i$	: Cota piezométrica calculada no nó	[L]
$H_i^m$	: Cota piezométrica medida no nó	[L]
$H^*$	: Matriz Hessiana	[-]
$J$	: Matriz Jacobiana	[-]
$k$	: Rugosidade absoluta da conduta	[L]

$L$	: Comprimento da conduta	[L]
$M$	: Número de medições	[-]
$N$	: Número de nós	[-]
$Q$	: Caudal	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$Q_F$	: Caudal de fuga	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$T$	: Número de instantes de tempo	[-]
$X$	: Distância da fuga a uma secção de referência (por ex. a válvula)	[L]
$\underline{c}$	: Função de erro	[L <sup>2</sup> ]
$Da_i$	: Acréscimo de área de fuga	[L <sup>2</sup> ]
$I$	: Constante de relaxação	[-]

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. B.; KOELLE, E. - *Fluid Transients in Pipe Networks*. Southampton (Inglaterra), Elsevier Applied Science, 1992.
- APESB - VII ENaSB - *Encontro Nacional de Saneamento Básico*. DEC/FCTUC. Coimbra, 14-16 de Fevereiro 1996.
- BELSITO, S.; BANERJEE, S. - *Artificial Neural Networks for leak detection in pipelines - Advances in Safety & Reliability*. Volume 1. Editor: C. Guedes Soares. Pergamon, 1997.
- BISHOP, CHRIS M. - *Neural Networks and their applications*. Rev. Science Instrum., Vol 65, No. 6, June 1994 (pag. 1803-1832)
- BILLMAN, L.; ISERMANN, R.. - *Leak Detection Methods for Pipelines*. Automatica, Vol 23, No. 3, 1987 (pag. 381-385)
- CHAUDHRY, M. H. - *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand (2nd Edition), 1987.
- COULBECK, BRYAN - *Integrated Computer Applications in Water Supply - Volume I - Methods and procedures for systems simulation and control*. Research Studies Press, 1993.
- FOX, J.A. - *Hydraulic Analysis of Unsteady Flow in Pipe Networks*. London (Inglaterra), MacMillan, 1977.
- LIGGETT, J.A.; PUDAR, R.S. - *Leaks in pipe networks*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 118, No. 7, August 1994 (pg. 934-955)
- LIGGETT, J.A.; CHEN, LI CHUNG - *Monitoring water distribution systems - The inverse method as a tool for calibration and leak detection*. Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems. E. Cabrera and A. Vela, editors. Water Science and Technology Library, 1995.
- LNEC - *Caracterização das Origens de Fugas e Outras Perdas na Rede de Distribuição de Água*. Departamento de Hidráulica do LNEC. Lisboa, Agosto 1994.
- RAMOS, H. - *Simulação e Controlo de Transitórios Hidráulicos em Pequenos Aproveitamentos Hidroeléctricos*, Tese de Doutoramento. Lisboa, 1995
- WYLIE, E. B.; STREETER, V.L. - *Fluid Transients*. New York, McGraw-Hill, 1978.