

ANÁLISE DA INCERTEZA ASSOCIADA À LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES TRANSPORTANDO BATELADAS

Carlos Augusto Pereira¹

Laboratory of Theoretical and Applied Mechanics
Department of Mechanical Engineering
Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156
24.210-240 Niterói, RJ - Brazil
E-mail: carlosa@mec.uff.br

Felipe Bastos de Freitas Rachid

Laboratory of Theoretical and Applied Mechanics
Department of Mechanical Engineering
Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156
24.210-240 Niterói, RJ - Brazil
E-mail: rachid@mec.uff.br

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise de incerteza associada à localização de vazamentos em linhas com batelada, prevista por sistemas de detecção de vazamento cujo algoritmo de localização se baseia na equação da perda de carga em regime permanente. Sob a hipótese de escoamento isotérmico, a análise conduzida revela que a incerteza associada à localização do vazamento independe de sua natureza, sendo função da qualidade da instrumentação da linha, da magnitude do vazamento e de sua localização, da posição da metade convencional da mistura e sua incerteza, entre outros fatores. Estudos paramétricos, levando-se em consideração a variação desses fatores, foram realizados para bateladas em que diesel e gasolina se alternam como fluidos deslocadores. Mostra-se que a incerteza da localização do vazamento é altamente dependente da qualidade da instrumentação, em especial daquela de vazão. Além disso, a incerteza associada à localização pode admitir valores extremamente elevados, se o vazamento ocorrer na região do duto ocupado pela gasolina quando a metade convencional se situa nas proximidades da entrada ou da saída do segmento de duto monitorado.

Palavras-chave: localização de vazamentos, polidutos, bateladas, incertezas.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de detecção de vazamento (SDV) desempenham um papel crucial na tarefa associada ao transporte de fluidos em dutos e, cada vez mais, estão se tornando um requisito operacional na indústria do petróleo. De uma forma geral, um SDV deve, no menor intervalo de tempo possível, não apenas detectar a existência de vazamento na linha como também ser capaz de quantificar a quantidade de produto vazada e estimar sua localização, sob condições adversas de regime de operação permanente e transiente. Os SDV podem ser classificados em dois grandes grupos de acordo com a metodologia empregada ser baseada em hardware ou software (Lucas, 2003). Sistemas que operam em tempo real cujo princípio de operação depende fundamentalmente de software são mais amplamente utilizados e se baseiam em dados de pressão e/ou vazão (e também temperatura e densidade dependendo do método) nas extremidades de segmentos da linha para, a partir de algoritmos, inferir a ocorrência de vazamentos. De uma forma bastante simplificada, um SDV pode ser decomposto em dois módulos de aquisição e validação de dados, dois algoritmos associados à detecção e à localização de vazamento e um módulo responsável pelo processamento

¹ Aluno de pós-graduação.

de sintonia. O módulo de aquisição de dados é responsável pelo monitoramento contínuo das medidas de vazão e pressão (e também temperatura e densidade no caso de escoamentos não isotérmicos através de polidutos com transferência de bateladas), na entrada e na saída do duto, em intervalos de tempo da ordem de 2 a 60 segundos. Antes de disponibilizá-los para o algoritmo de detecção, os dados de vazão e pressão são validados de forma a eliminar a ocorrência de falsos alarmes decorrentes de inconsistências físicas e eventuais falhas ou panes nos instrumentos de medição ou no sistema de transmissão de dados.

Com base em dados confiáveis, compete ao algoritmo de detecção inferir a existência de vazamentos com, preferencialmente, confiabilidade, sensibilidade, robustez e precisão. Se a ocorrência de um vazamento é identificada, então o algoritmo de detecção estima a magnitude do vazamento, a quantidade de produto vazada e, em seguida, aciona o algoritmo de localização o qual deverá estimar sua provável posição no duto. Nesta situação, o sistema emite um alarme e informa as características do vazamento. Se não há vazamento, inicia-se o processo de sintonia, que tem por finalidade identificar o regime de escoamento (permanente, transiente suave, transiente severo), a condição operacional da linha (parada, fechada, ativa) e calcular/atualizar, continuamente, alguns parâmetros característicos do escoamento que são utilizados como input nos algoritmos de detecção e localização.

Se as tarefas associadas a detectar e localizar vazamentos em linhas dedicadas ao transporte de um único produto são complexas, o nível de complexidade aumenta nos casos em que são transportados pela tubulação dois ou mais produtos dissimilares. Este tipo de operação é denominado na literatura técnica de transporte em bateladas, e pode ser conduzida com ou sem o auxílio de separadores físicos (tais como *pigs* ou *scrapers*) na interface dos produtos (Freitas Rachid et al., 2000 e 2002). Se por um lado a utilização de separadores físicos previne ou atenua a formação de uma zona de mistura entre os produtos, requer, por outro, o emprego de equipamentos (lançadores e recebedores de *pigs*) especiais, de mão-de-obra qualificada e o dispêndio de tempo extra para sua adequada operação, principalmente quando existem estações intermediárias de bombeio na linha. Estes requisitos oneram substancialmente o custo deste tipo de operação, fazendo com que sua prática não seja um procedimento comum no Brasil.

Para melhor caracterizar o problema da formação da zona de mistura em transferências sem separadores, considere o transporte em batelada de dois produtos rotulados como “B” e “A”, sendo o fluido “B” o produto deslocador e o “A” o produto deslocado. Sejam t e x o tempo e a coordenada espacial longitudinal da linha que tem início na estação de bombeio ($x=0$) e término no ponto de recebimento ($x=l$), com $l \geq L$, sendo L o comprimento do segmento de linha monitorado pelo SDV. Seja $C_i(x,t) \in [0,1]$, com $i \in \{A, B\}$, a concentração em massa média do fluido i na mistura na seção reta da tubulação caracterizada pela posição x no instante t . Como a mistura é constituída apenas pelos dois fluidos, então $C_A(x,t) + C_B(x,t) = 1$, para todo e qualquer instante de tempo e posição espacial.

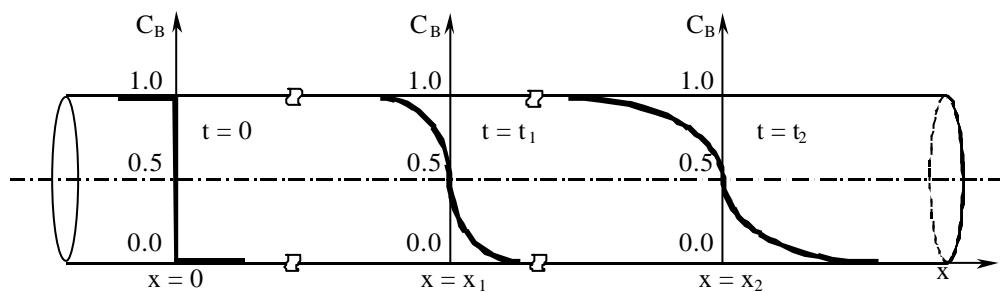


Figura 1 – Evolução da zona de mistura numa transferência em batelada.

No início da transferência, o perfil de concentração pode ser representado por um salto (descontinuidade) em $x=0$. Por exemplo, se opta-se por trabalhar com a concentração do fluido

“B”, então $C_B(x,t)$ salta para baixo em $x=0$ e $t=0$, conforme ilustrado na Figura 1. Durante o deslocamento dos produtos pela linha uma zona de mistura é formada na interface dos produtos, a qual tende a aumentar em extensão à medida que os produtos vão sendo deslocados pela linha [4,5,7]. Este fenômeno, fundamentalmente devido ao processo de dispersão de massa, é representado na Figura 1 em instantes de tempo subseqüentes $t=t_1$ e $t=t_2$ nas posições espaciais $x=x_1$ e $x=x_2$. Embora existam modelos mecânicos que possibilitem estimar com acurácia o comprimento da zona de mistura (Freitas Rachid et al., 2002), e referências contidas, ainda que sob determinadas condições operacionais (mais especificamente, em transferências contínuas, isto é, sem paradas de bombeio), as tarefas de detecção e a localização de vazamentos tornam-se mais complexas por conta não apenas da existência da zona de mistura mas, principalmente, pela presença de mais de um fluido na linha.

Independentemente, do tipo de algoritmo empregado para detectar vazamentos, a grande maioria dos softwares comerciais utiliza no algoritmo de localização uma metodologia simples que se fundamenta na equação da perda de carga em regime permanente, principalmente no caso de linhas que transportam um único produto.

Estender a aplicação deste método a linhas transportando bateladas e, paralelamente, avaliar *a priori* seu desempenho sob diversas condições operacionais, sem a necessidade de implementação em um SDV, constituem os objetivos gerais do presente trabalho. Para atingi-los, lança-se mão de um estudo de análise de incerteza associado à localização de vazamento fundamentado nessa metodologia para um sistema de detecção genérico. De posse da expressão analítica da localização do vazamento numa linha transportando batelada, determina-se sua incerteza em função das variáveis operacionais do sistema e em termos das incertezas das medidas de vazão e diferencial de pressão nas extremidades da linha. A identificação das situações operacionais em que o modelo pode (ou não!) vir a apresentar desempenho satisfatório é crucial no auxílio à tomada de decisão referente à especificação e ou aquisição de sistemas de detecção e localização de vazamentos.

2. ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTO

Independentemente da natureza do algoritmo de detecção, a localização do vazamento é, na grande maioria dos SDV, determinada a partir da equação da perda de carga em escoamento desenvolvido e permanente. Para um único fluido (incompressível) escoando na linha na ausência de vazamentos e considerando-se desprezível a as perdas de carga localizadas ao longo da tubulação, a equação da perda de carga correlaciona a vazão com a diferença de altura piezométrica nas extremidades de um segmento da linha.

$$\Delta\bar{H} = KL\bar{Q}^2 \quad (1)$$

na qual K denota a resistência hidráulica do fluido ($K = \frac{8f}{gp^2D^5}$, sendo f o fator de fricção de Darcy-Weisbach - que é função do número de Reynolds do escoamento - e D o diâmetro do duto), L é o comprimento do segmento da linha, $\Delta\bar{H}$ diferença de altura piezométrica nas extremidades da linha e \bar{Q} a vazão na ausência de vazamento durante regimes de operação estabilizada (regimes permanentes). Com $\Delta\bar{H}$ e \bar{Q} determinados a partir da instrumentação instalada na linha, a equação (1) pode ser utilizada para estimar a resistência hidráulica do fluido. É justamente essa uma das tarefas do processo de sintonia, a qual somente é executada na ausência de vazamentos e durante regimes de operação estabilizada (regime permanente). Na prática, o escoamento num duto é considerado permanente quando o desvio padrão de um determinado número de medidas de vazão à entrada e à saída do duto é inferior a 0,2% da vazão nominal na linha (Luopa, 1992). Em função disto, \bar{Q} em (1) é, em geral, calculado como sendo uma média das medidas de vazão na entrada e na saída do duto. O processo de sintonia é continuamente realizado de forma a permanentemente atualizar o valor de K . Quando um vazamento ocorre o algoritmo de localização é acionado e uma estimativa da localização do vazamento é fornecida após o restabelecimento do regime permanente

na linha. Nesta situação, a representação espacial da vazão e da altura piezométrica ao longo do duto assumem configurações distintas daquelas observadas na situação sem vazamento. A existência de um vazamento na linha induz uma descontinuidade no gráfico da vazão, sendo a diferença entre os valores à esquerda Q_i e à direita Q_o a medida da magnitude do vazamento.

Admitindo-se não haver zona de mistura na interface dos fluidos, a presença de batelada na linha impõe, apenas, uma variação do gradiente hidráulico na linha decorrente da diferença de resistência hidráulica dos fluidos (diferença de viscosidade). Com base nisso, a localização do vazamento deve ser conduzida considerando-se duas possibilidades distintas: quando a vazamento se situa à montante ($x_L < x_m$) e à jusante ($x_L > x_m$) da metade convencional da mistura. A presença da interface na linha gera, devido à mudança de resistência hidráulica dos fluidos, uma inflexão no perfil de altura piezométrica na linha que se movimenta a media que os produtos vão sendo deslocados na linha. Designando-se $\bar{H}_i(t)$ e $\bar{H}_o(t)$ como sendo as alturas piezométricas, respectivamente, na entrada e na saída da linha na ausência de vazamento e $x_m(t)$ a posição da interface (ou mais precisamente, da metade convencional da mistura), resulta para o perfil de altura piezométrica o gráfico ilustrado na Figura 2. Nota-se, conforme convenção previamente estabelecida, que o produto “B” desloca o produto “A”, posicionando-se à montante da posição da metade convencional da mistura.

Quando o vazamento se situa à montante da interface, $x_L < x_m$, surge uma nova inflexão no gradiente hidráulico na posição do vazamento x_L decorrente do fato de a vazão à montante de x_L , Q_i , ser maior do que a vazão à jusante, denominada de Q_o . Nesta situação, o fluido vazado é o produto “B” e a nova configuração do gradiente hidráulico é apresentada na Figura 2. Destaca-se, que em função do vazamento, há uma despressurização da linha fazendo com que a nova curva de gradiente hidráulico se situe abaixo daquela observada na situação sem vazamento. Tomando-se como referência o perfil de gradiente hidráulico na situação de vazamento, conforme ilustrado na Figura 2, e aplicando-se a equação de perda de carga (1) para os três segmentos de duto definidos pelos intervalos $[0, x_L]$, $[x_L, x_m]$ e $[x_m, L]$, é possível explicitar a posição do vazamento em termos das variáveis operacionais do sistema, das resistências hidráulicas dos produtos e da posição da metade convencional:

$$x_L = \frac{\Delta H - K_A L Q_o^2 - x_m (K_B - K_A) Q_i^2}{K_A (Q_i^2 - Q_o^2)}, \quad (2)$$

na qual $\Delta H = H_i(t) - H_o(t)$ representa a variação de altura piezométrica nas extremidades na linha na presença do vazamento, K_A e K_B são os valores das resistências hidráulicas dos fluidos A e B na tubulação mais atualizados determinados no processo de sintonia, respectivamente.

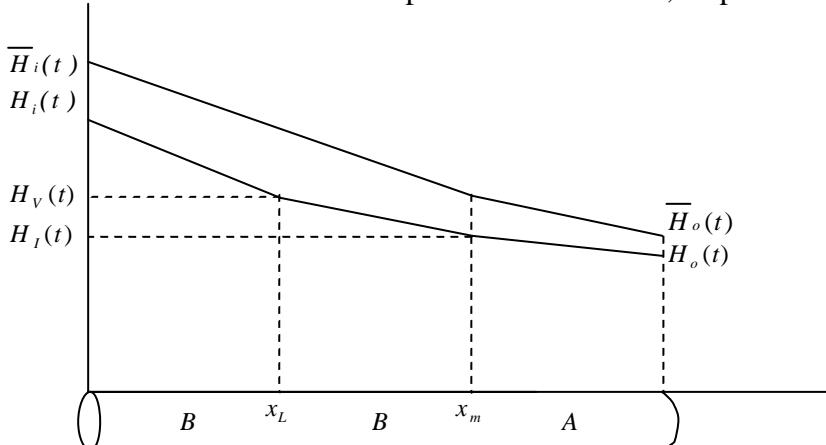


Figura 2 – Representação espacial da altura piezométrica apó o vazamento para $x_L < x_m$.

Se o procedimento apresentado anteriormente for conduzido para a situação em que o vazamento localiza-se e à jusante ($x_L > x_m$) da metade convencional da mistura, obtém-se:

$$x_L = \frac{\Delta H - K_A L Q_o^2 - x_m (K_B - K_A) Q_o^2}{K_B (Q_i^2 - Q_o^2)}, \quad (3)$$

É importante frisar que as expressões (2) e (3) são diferentes, embora guardem uma semelhança muito grande. Note que se $K_A = K_B$ nas expressões (2) e (3), recupera-se a expressão de x_L para um só fluido em ambos os casos.

3. INCERTEZA ASSOCIADA À LOCALIZAÇÃO DO VAZAMENTO

Como as resistências dos fluidos na tubulação avaliadas no processo de sintonia e as medidas de altura piezométrica nas extremidades da linha são grandezas independentes, a estimativa da localização do vazamento (equação (2) ou (3)) pode ser expressa como uma função destes argumentos, além das medidas de vazão na entrada e na saída da linha e da posição da metade convencional na linha, isto é, $x_L = \hat{x}_L(\Delta H, Q_i, Q_o, K_A, K_B, x_m)$ sendo sua incerteza calculada através de (Moffat, 1988),

$$\begin{aligned} \left(\frac{dx_L}{L} \right)^2 = & \left(\frac{\partial \hat{x}_L}{\partial \Delta H} \frac{\Delta H}{L} \frac{d\Delta H}{\Delta H} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{x}_L}{\partial Q_i} \frac{Q_i}{L} \frac{dQ_i}{Q_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{x}_L}{\partial Q_o} \frac{Q_o}{L} \frac{dQ_o}{Q_o} \right)^2 + \\ & + \left(\frac{\partial \hat{x}_L}{\partial K_A} \frac{K_A}{L} \frac{dK_A}{K_A} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{x}_L}{\partial K_B} \frac{K_B}{L} \frac{dK_B}{K_B} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{x}_L}{\partial x_m} \frac{x_m}{L} \frac{dx_m}{x_m} \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

nas quais os coeficientes de sensibilidade (as derivadas parciais) dos quatro termos devem ser calculados segundo a equação (2), se $x_L < x_m$, ou segundo a equação (3) se $x_L > x_m$.

Na expressão anterior, dQ_i , dQ_o e $d\Delta H$ representam as incertezas associadas às medidas de Q_i , Q_o e ΔH , dK_A e dK_B as incertezas decorrente das estimativas de K no processo de sintonia para os fluidos “A” e “B” na linha e, finalmente, dx_m denomina a incerteza associada à posição da metade convencional na linha quando o vazamento é identificado.

3.1. Incerteza das resistências hidráulicas

Conforme mencionado anteriormente, a equação (1) pode ser empregada para calcular K_i , $i \in \{A, B\}$, em regimes de operação estabilizada na ausência de vazamentos. Desta forma, a resistência hidráulica pode ser vista como uma função independente dos argumentos $\Delta \bar{H}_i$ e \bar{Q}_i , ou seja, $K_i = \hat{K}_i(\Delta \bar{H}_i, \bar{Q}_i)$, resultando para sua incerteza:

$$\left(\frac{dK_i}{K_i} \right)^2 = \left(\frac{d\Delta \bar{H}_i}{\Delta \bar{H}_i} \right)^2 + \left(-2 \frac{d\bar{Q}_i}{\bar{Q}_i} \right)^2, \quad i \in \{A, B\} \quad (5)$$

Como a princípio não existe necessariamente uma relação entre as condições com que os fluidos “A” e “B” são movimentados isoladamente através do duto, pode-se admitir, como primeira aproximação, que os produtos são transportados isoladamente na linha com as mesmas vazões, isto é,

$$\bar{Q}_A = \bar{Q}_B = \bar{Q} \quad (6)$$

Nesta situação, com base em (1) a seguinte relação torna-se válida:

$$\frac{\Delta \bar{H}_A}{K_A} = \frac{\Delta \bar{H}_B}{K_B} = \frac{\Delta \bar{H}}{K_M} \quad (7)$$

na qual $\Delta\bar{H} = (\bar{H}_i - \bar{H}_o)$, representa a diferença de altura piezométrica na linha com batelada na ausência de vazamento e K_M a resistência hidráulica oferecida pelos produtos quando ambos encontram-se na linha;

$$K_M = \frac{K_B x_m + K_A (L - x_m)}{L} \quad (8)$$

Se neste caso, devido aos medidores serem os mesmos, admitirmos também que:

$$d\Delta\bar{H}_A = d\Delta\bar{H}_B = d\Delta\bar{H} \quad \text{e} \quad d\bar{Q}_A = d\bar{Q}_B = d\bar{Q} \quad (9)$$

então é fácil perceber que:

$$\frac{d\Delta\bar{H}_i}{\Delta\bar{H}_i} = \frac{d\Delta\bar{H}}{\Delta\bar{H}} \frac{K_M}{K_i}, \quad i \in \{A, B\} \quad (10)$$

À luz da consideração de que na prática os vazamentos com os quais os SDV se preocupam em identificar e localizar são tais que $j \leq 15\%$ (Liou et al., 1995) sendo j a magnitude adimensionalizada do vazamento,

$$j = \frac{Q_i - Q_o}{Q_i}$$

é possível admitir que

$$\frac{d\Delta\bar{H}}{\Delta\bar{H}} = \frac{d\Delta H}{\Delta H} = \frac{d\Delta P}{\Delta P} \quad \text{e} \quad \frac{d\bar{Q}}{\bar{Q}} = \frac{dQ_i}{Q_i} = \frac{dQ_o}{Q_o} = \frac{dQ}{Q} \quad (11)$$

resultando, finalmente, para as incertezas das resistências hidráulicas:

$$\left(\frac{dK_i}{K_i} \right)^2 = \left(\frac{K_M}{K_i} \frac{d\Delta P}{\Delta P} \right)^2 + \left(2 \frac{dQ}{Q} \right)^2, \quad i \in \{A, B\} \quad (12)$$

3.2. Incerteza da localização da metade convencional da mistura

A metade convencional da mistura precisa ser definida desde o instante de tempo em que o fluido deslocador entra na linha até o instante de tempo caracterizado pela estimativa da localização do vazamento. Desta forma, denominando-se por t_I o instante de tempo em que o fluido “B” entra na linha, t_{VR} o instante de tempo em que o vazamento ocorre e, finalmente, t_{VD} o instante de tempo em que o vazamento foi detectado e localizado, a metade convencional da mistura pode ser expressa como:

$$x_m = \int_{t_I}^{t_{VR}} \frac{\bar{Q}(t')}{A} dt' + \int_{t_{VR}}^{t_{VD}} \frac{Q_k(t')}{A} dt' \quad (13)$$

Como $Q(t')$, $Q_k(t')$, $k \in \{i, o\}$, ($k = o$, se $x_L < x_m$ e $k = i$, se $x_L > x_m$) t_I , t_{VR} e t_{VD} são parâmetros independentes, é possível expressar a posição da metade convencional da mistura como, $x_m = \hat{x}_m(Q(t'), Q_0(t'), t_I, t_{VR}, t_{VD})$ se $x_L < x_m$, e como $x_m = \hat{x}_m(Q(t'), Q_i(t'), t_I, t_{VR}, t_{VD})$ se $x_L > x_m$. Além disso, como não existem incertezas associadas a t_I , t_{VR} e t_{VD} segue que:

$$\left(\frac{dx_m}{L} \right)^2 = \left(\frac{\partial \hat{x}_m}{\partial Q} \frac{Q}{L} \frac{dQ}{Q} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{x}_m}{\partial Q_k} \frac{Q_k}{L} \frac{dQ_k}{Q_k} \right)^2 \quad (14)$$

com $k = o$ se $x_L < x_m$, e $k = i$ se $x_L > x_m$.

Considerando-se que o regime permanente prevalece durante quase todo o tempo de operação da linha, que o intervalo de tempo $T = (t_{VD} - t_{VR})$ requerido pelo SDV para anunciar o vazamento após sua efetiva ocorrência é relativamente pequeno é possível mostrar que a incerteza da metade convencional da mistura se reduz a:

$$\left(\frac{dx_m}{L} \right)^2 = \left(\frac{x_m}{L} \right)^2 \left(\frac{dQ}{Q} \right)^2, \quad (15)$$

Com base em (2),(4), (11-12) e (15) é possível expressar dx_L/L em termos de \mathbf{j} , x_L/L , x_m/L , dQ/Q e dDP/P , para $x_L < x_m$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dx_L}{L} \right)^2 &= \left\{ \frac{K_A}{K_B} \mathbf{I} + \frac{x_L}{L} + \frac{x_m}{L} \left(\frac{K_B - K_A}{K_B} \right) \mathbf{I} \right\}^2 \left(\frac{d\Delta P}{\Delta P} \right)^2 + \\ &+ \left[\left\{ 2(\mathbf{I}+1) \frac{x_L}{L} \right\}^2 + \left\{ 2\mathbf{I} \left(\frac{K_A}{K_B} + \left(\frac{K_B - K_A}{K_B} \right) \frac{x_m}{L} - \frac{x_L}{L} \right) \right\}^2 \right] \left(\frac{dQ}{Q} \right)^2 + \\ &+ \left\{ \frac{K_A}{K_B} \mathbf{I} \left(1 - \frac{x_m}{L} \right) \right\}^2 \left(\frac{dK_A}{K_A} \right)^2 + \left\{ \mathbf{I} \left(\frac{x_m}{L} + \frac{x_L}{L} \right) \right\}^2 \left(\frac{dK_B}{K_B} \right)^2 + \left\{ \mathbf{I} \left(\frac{K_B - K_A}{K_B} \right) \frac{x_m}{L} \right\}^2 \left(\frac{dx_m}{L} \right)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

na qual $\mathbf{I} = \frac{(1-\mathbf{j})^2}{\mathbf{j}(2-\mathbf{j})}$.

Com base em (3),(4), (11-12) e (15) é possível expressar dx_L/L em termos de \mathbf{j} , x_L/L , x_m/L , dQ/Q e dDP/P , para $x_L > x_m$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dx_L}{L} \right)^2 &= \left\{ \mathbf{I} + \frac{x_L}{L} + \frac{x_m}{L} \left(\frac{K_B - K_A}{K_A} \right) (\mathbf{I}+1) \right\}^2 \left(\frac{d\Delta P}{\Delta P} \right)^2 + \\ &+ \left[\left\{ 2(\mathbf{I}+1) \frac{x_L}{L} + 2(\mathbf{I}+1) \frac{x_m}{L} \left(\frac{K_B - K_A}{K_A} \right) \right\}^2 + \left\{ 2\mathbf{I} \left(1 - \frac{x_L}{L} \right) \right\}^2 \right] \left(\frac{dQ}{Q} \right)^2 + \\ &+ \left\{ -\mathbf{I} + (\mathbf{I}+1) \frac{x_m}{L} - \frac{x_L}{L} \right\}^2 \left(\frac{dK_A}{K_A} \right)^2 + \left\{ (\mathbf{I}+1) \frac{K_B}{K_A} \frac{x_m}{L} \right\}^2 \left(\frac{dK_B}{K_B} \right)^2 + \left\{ (\mathbf{I}+1) \left(\frac{K_B - K_A}{K_A} \right) \frac{x_m}{L} \right\}^2 \left(\frac{dx_m}{L} \right)^2 \end{aligned} \quad (17)$$

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na análise apresentada a seguir, foram considerados como produtos “A” (deslocado) e “B” (deslocador) a gasolina e o diesel por constituírem transferências bastante comuns nos oleodutos brasileiros, como ocorre no OSBRA – oleoduto de 20 polegadas de diâmetro que interliga a REPLAN à Base de Brasília. Para facilitar a caracterização das bateladas, convencionou-se designar as bateladas gasolina/diesel como sendo aquelas em que a gasolina é o fluido “B” e o diesel o fluido “A”. De forma análoga, numa batelada diesel/gasolina o diesel é o fluido “B” e a gasolina o fluido “A”. Os resultados apresentados adiante foram obtidos com base nas equações (16) e (17), estabelecendo-se diferentes valores para \mathbf{j} , x_L/L e x_m/L , assim como para as incertezas das medidas de pressão ($d\Delta P/\Delta P$) e vazão (dQ/Q) nas extremidades do segmento de linha monitorado. A atribuição de diferentes valores a esses parâmetros visa não somente caracterizar a qualidade da instrumentação instalada (alta, média e baixa precisão), mas também

diferentes regimes de operação (vazão nominal ou baixa). Tomando-se como base as características dos equipamentos fornecidos por diferentes fabricantes (Furness et al. 1986 e Mears, 1992), se $d\Delta P / \Delta P$ situa-se na faixa de 0,1 a 0,4 % e dQ / Q na faixa de 0,5 a 0,9%, então a instrumentação é considerada de alta precisão. No outro extremo, se $d\Delta P / \Delta P$ e dQ / Q são superiores a 2% e 5%, respectivamente, os equipamentos podem ser considerados como de baixa precisão. Ressalva-se que essa classificação se aplica a situações em que a linha opera com vazão próxima à nominal. Por outro lado, em circunstâncias em que a linha opera com vazões baixas, $d\Delta P / \Delta P$ e dQ / Q podem assumir valores da ordem de 1,0% e 2,5%, respectivamente, para uma instrumentação de média precisão.

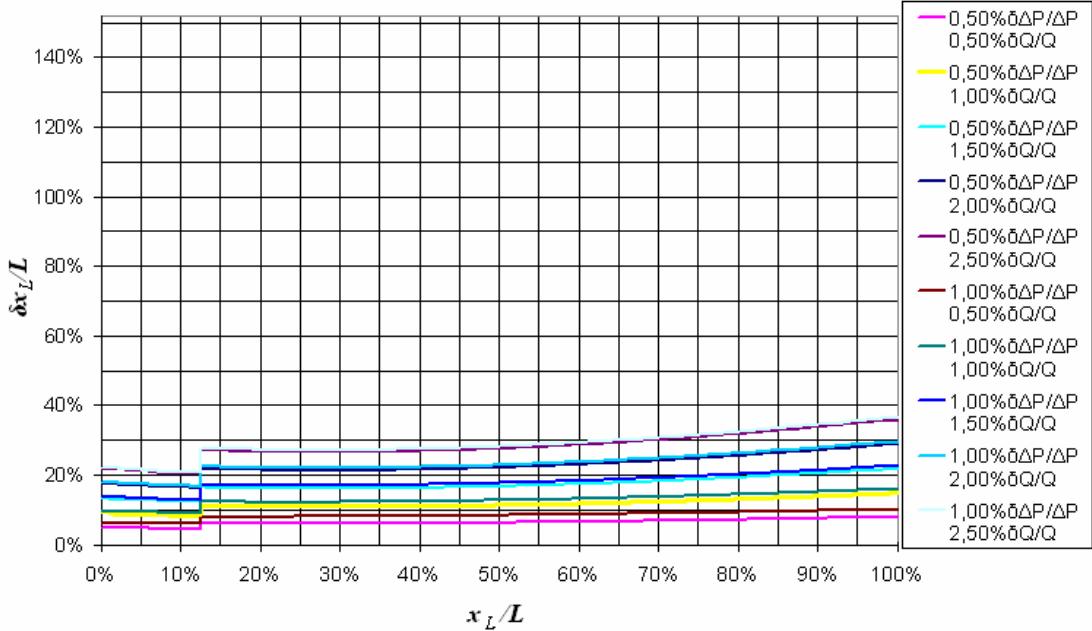


Figura 3 – Incerteza da localização do vazamento em função da sua posição para $j = 10\%$ e diferentes valores de dQ / Q e $d\Delta P / \Delta P$. Batelada diesel/gasolina e $x_m / L = 12,5\%$.

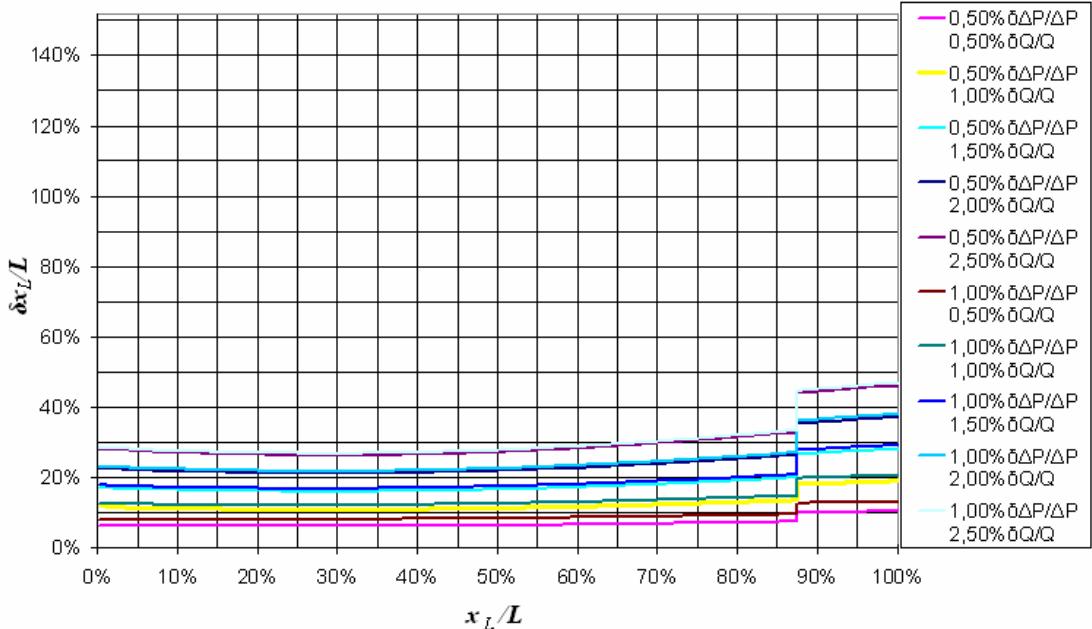


Figura 4 – Incerteza da localização do vazamento em função da sua posição para $j = 10\%$ e diferentes valores de dQ / Q e $d\Delta P / \Delta P$. Batelada diesel/gasolina e $x_m / L = 87,5\%$.

As Figuras 3 e 4 ilustram a variação da incerteza da localização do vazamento em função de sua posição para bateladas diesel/gasolina para $x_m / L = 12,5\%$ e $x_m / L = 87,5\%$, respectivamente; com $j = 10\%$ e diferentes combinações dos pares de incertezas das medidas de variação de pressão e vazão: ($d\Delta P / \Delta P, dQ / Q$).

A primeira observação importante a cerca das figuras 3 e 4 diz respeito à descontinuidade na curva da incerteza da localização do vazamento nas posições em que x_m / L coincide com x_L / L . Este fato decorre da utilização de expressões distintas para determinar a posição do vazamento de acordo com a condição $x_L < x_m$ ou $x_L > x_m$, o que, consequentemente, impõe expressões também distintas para o cálculo da incerteza. As figuras revelam, ainda, que as maiores incertezas da localização se verificam na região da tubulação ocupada pelo fluido de menor resistência hidráulica; no caso a gasolina.

As incertezas associadas à localização tendem a aumentar tanto a montante quanto a jusante da linha na medida em que a metade convencional da mistura se movimenta em direção a saída do duto, independentemente da qualidade da instrumentação. Todavia, o aumento da incerteza da localização é mais pronunciado na extremidade final da linha. Para $x_L / L = 5\%$ e ($d\Delta P / \Delta P, dQ / Q$) = (1,0%, 2,5%), a incerteza aumenta de 22% quando $x_m / L = 12,5\%$ (vide figura 3) para 28% na situação em que $x_m / L = 87,5\%$ (vide figura 4). Por outro lado, se $x_L / L = 95\%$ e ($d\Delta P / \Delta P, dQ / Q$) = (1,0%, 2,5%), a incerteza aumenta de 35% quando $x_m / L = 12,5\%$ (vide figura 3) para 45% na situação em que $x_m / L = 87,5\%$ (vide figura 4).

A segunda observação relevante está associada à qualidade da instrumentação empregada. Comparando-se os resultados relativos à instrumentação, observa-se que a incerteza da medida de vazão exerce maior influência na incerteza da localização do vazamento do que a incerteza da medida de variação de pressão. Para magnitudes de vazamento de $j = 10\%$, a instrumentação de vazão de alta ou média precisão fornece incertezas de localização de no máximo 20% do comprimento do segmento de linha, qualquer que seja a posição da metade convencional da mistura. Para instrumentação de baixa precisão ou regimes de operação com baixas vazões, a máxima incerteza associada à localização sobe para 47%.

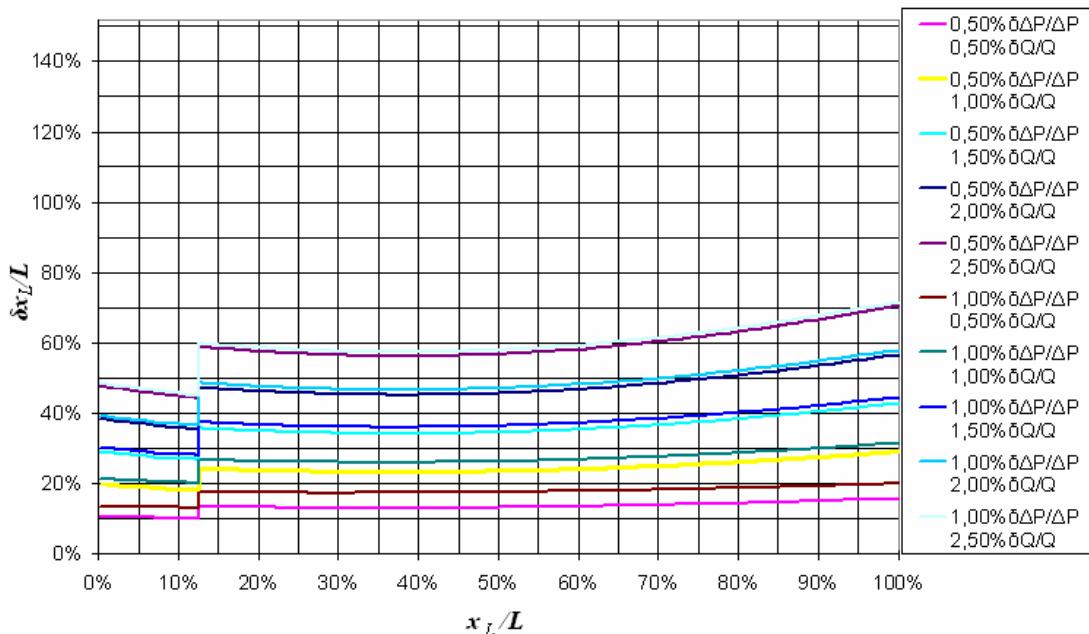


Figura 5 – Incerteza da localização do vazamento em função da sua posição para $j = 5\%$ e diferentes valores de dQ / Q e $d\Delta P / \Delta P$. Batelada diesel/gasolina e $x_m / L = 12,5\%$.

Entretanto, este nível de incerteza se eleva de 20% para 40% quando a magnitude do vazamento é reduzida de $j = 10\%$ para $j = 5\%$, conforme pode ser observado nas figuras 5 e 6.

Essas figuras ilustram a variação da incerteza da localização do vazamento em função de sua posição para bateladas diesel/gasolina para $x_m / L = 12,5$ e $x_m / L = 87,5\%$, respectivamente; com $j = 5\%$ e diferentes combinações dos pares de incertezas das medidas de variação de pressão e vazão. Mesmos comportamentos relatados anteriormente referentes à descontinuidade na curva da incerteza e à qualidade da instrumentação são observados nesta nova situação em que $j = 5\%$. Para instrumentação de vazão tal que $dQ/Q > 2,0\%$ ou regimes de operação de baixa vazão, as incertezas associadas à localização inviabilizam a metodologia em apreço.

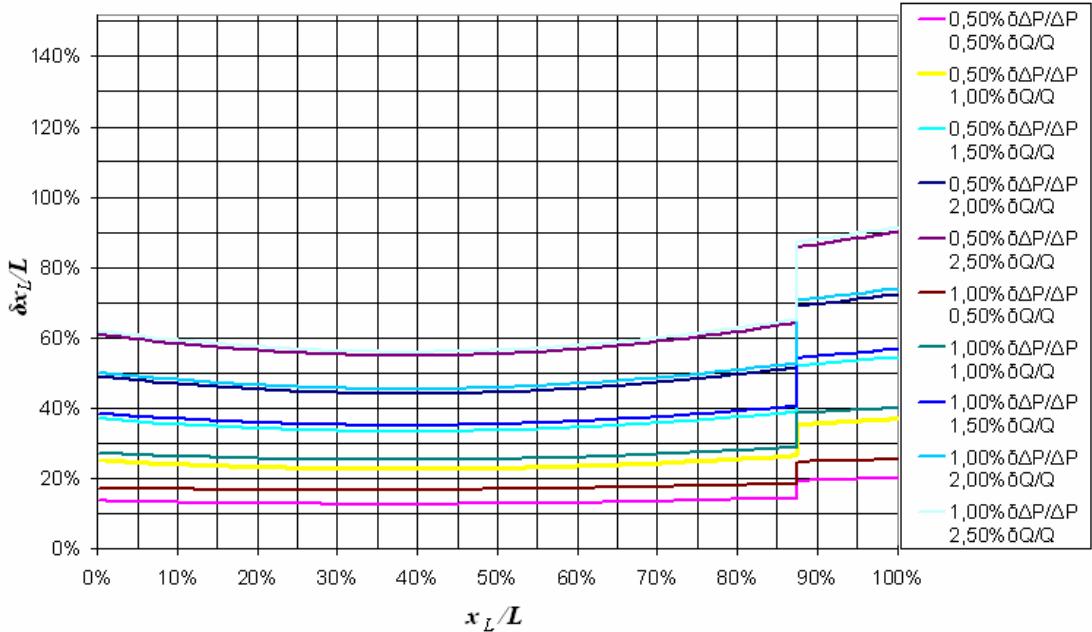


Figura 6 – Incerteza da localização do vazamento em função da sua posição para $j = 5\%$ e diferentes valores de dQ/Q e $d\Delta P/\Delta P$. Batelada diesel/gasolina e $x_m/L = 87,5\%$.

Se a magnitude do vazamento é reduzida ainda mais para $j = 3\%$, os valores de incerteza mostram que a identificação de pequenos vazamentos em linhas com batelada é praticamente inviável se a instrumentação de vazão é de baixa qualidade ou a linha opera com baixas vazões.

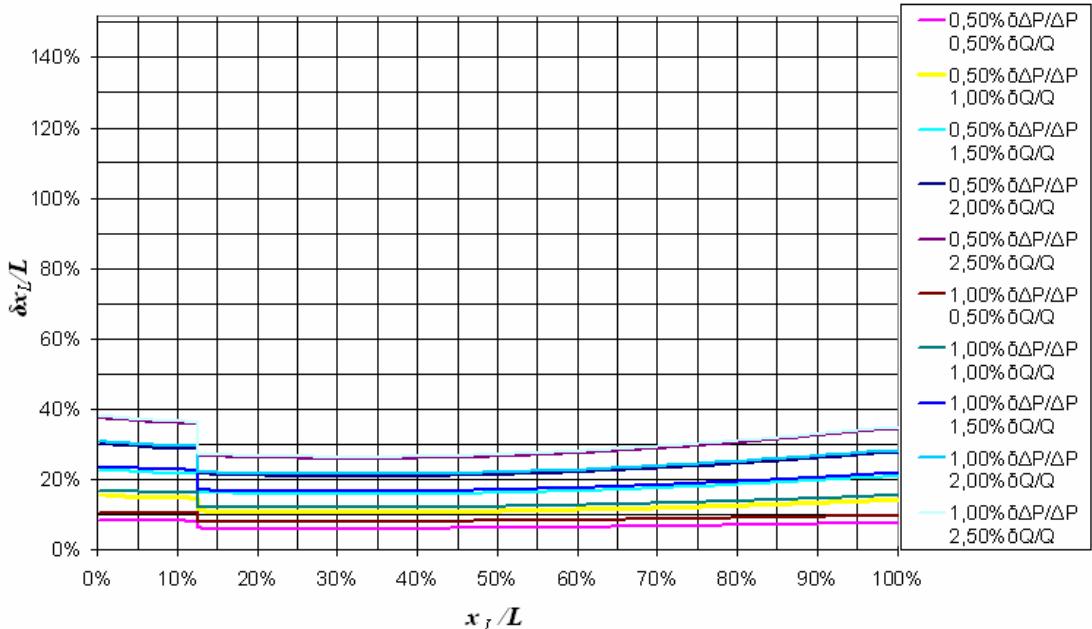


Figura 7 – Incerteza da localização do vazamento em função da sua posição para $j = 10\%$ e diferentes valores de dQ/Q e $d\Delta P/\Delta P$. Batelada gasolina/diesel e $x_m/L = 12,5\%$.

As Figuras 7 e 8 ilustram a variação da incerteza da localização do vazamento em função de sua posição para bateladas gasolina/diesel para $x_m / L = 12,5$ e $x_m / L = 87,5\%$, respectivamente; com $j = 10\%$ e diferentes combinações dos pares de incertezas das medidas de variação de pressão e vazão.

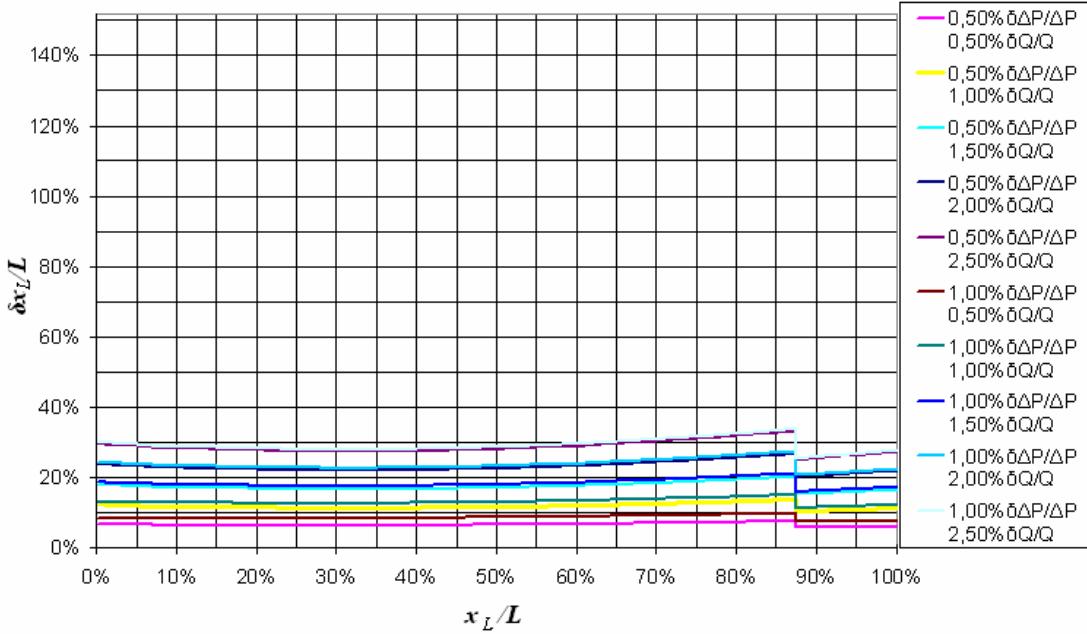


Figura 8 – Incerteza da localização do vazamento em função da sua posição para $j = 10\%$ e diferentes valores de dQ/Q e $d\Delta P/\Delta P$. Batelada gasolina/diesel e $x_m / L = 87,5\%$.

Observando-se as figuras 7 e 8, notam-se os mesmos comportamentos qualitativos mencionados anteriormente com relação à descontinuidade e à influência da instrumentação na curva de incerteza. De forma análoga ao caso diesel/gasolina, a incerteza associada à localização é maior na região da linha ocupada pelo produto de menor resistência hidráulica (no caso a gasolina).

Ao contrário do que ocorre com a batelada diesel/gasolina, a incerteza associada à localização tende a diminuir tanto a montante quanto a jusante da linha na medida em que a metade convencional da mistura se movimenta em direção a saída do duto, independentemente da qualidade da instrumentação. Novamente, a redução da incerteza da localização é mais pronunciada na extremidade final da linha.

Finalmente, comparando-se as curvas de incerteza da localização do vazamento entre bateladas diesel/gasolina e gasolina/diesel quando a metade convencional situa-se em $x_m / L = 12,5\%$, qualquer que seja a magnitude do vazamento, verifica-se que a incerteza a jusante da interface permanece praticamente inalterada qualquer que seja o fluido gasolina ou diesel. Entretanto, a incerteza a montante (no trecho inicial da linha) varia sensivelmente, sendo maior para a gasolina do que para o diesel. Por outro lado, quando a metade convencional situa-se em $x_m / L = 87,5\%$, qualquer que seja a magnitude do vazamento, verifica-se que a incerteza a montante da interface permanece praticamente inalterada, enquanto que a incerteza a jusante (no trecho final da linha) varia sensivelmente, sendo maior para a gasolina do que para o diesel. Estes fatos permitem concluir que as situações mais desfavoráveis no que se refere a incerteza associada à localização ocorrem na região da linha ocupada pelo fluido de menor resistência hidráulica, quando a interface se localiza junto à entrada ou à saída da linha.

5. CONCLUSÕES

A análise conduzida permite afirmar que: 1) a qualidade da instrumentação de medida de vazão tem um impacto na incerteza da localização muito mais significativa do que o da medida de diferencial de pressão, sendo o fator determinante no desempenho da metodologia; 2) as incertezas

associadas à localização do vazamento são maiores na região da tubulação ocupada pelo fluido de menor resistência hidráulica, sendo a diferença mais acentuada quanto menor a magnitude do vazamento, pior a qualidade da instrumentação ou menor a vazão (em comparação ao seu valor nominal); 3) as situações mais desfavoráveis à localização de vazamentos - no que se refere a sua incerteza - ocorrem na região ocupada pelo fluido de menor resistência hidráulica quando a interface se localiza nas proximidades da entrada ou da saída da linha e, finalmente; 4) a identificação de pequenos vazamentos em linhas transportando bateladas de gasolina e diesel (qualquer que seja o produto deslocador) é praticamente inviável se; isto é, se a instrumentação de vazão é de baixa qualidade ou se a linha opera com uma vazão da ordem de ou menor do que metade da vazão nominal.

Agradecimentos

É com satisfação que os registramos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro parcial recebido através do processo 476985/2003-0. Esta pesquisa foi parcialmente conduzida no Laboratório de Mecânica Teórica (LMTA-UFF).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Freitas Rachid, F. B., J. H. Carneiro de Araujo, and R. M. Baptista. Interface contamination modeling in pipeline batch transfers. *Proceedings of ETCE/OMAE2000*, 9, 2000
- Freitas Rachid, F. B. J. H. Carneiro de Araujo, and R. M. Baptista. Predicting Mixing Volumes in Serial Transport in Pipelines. *Journal of Fluids Engineering - Transactions of the ASME*, United States of America, v. 124, n. June, p. 528-534, 2002.
- Freitas Rachid, F. B.; A Thermodynamically Consistent Model for Cavitating Flows of Compressible Fluids, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 38:1007-1018, 2003.
- Furness, R. A. and J. D. Van Reet. Pipeline leak detection techniques. pages 1–18. *Pipes and Pipeline International*, 1986. *Proceedings of Pipeline Integrity Monitoring Conference*, Oct. 29-30, Aberdeen.
- Liou, J. C. P. and J. Tiam. Leak detection transient flow simulation approaches. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of ASME*, 117:243–248, 1995.
- Lucas, A. H.. Detecção de Vazamentos em Linhas de Transmissão de Líquidos, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2003.
- Luopa, J. A.. New algorithms improve SCADA-based material balance leak detection systems. *Pipeline Technology*, 5:455–461, 1992.
- Mears, M. N., Real world applications of pipeline leak detection. pages 189–209. ASCE, 1992. *Proceedings of the International Conference on Pipeline Infrastructure II*, San Antonio.
- Moffat, R. J. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1:3–17, 1988.