

BRFEC/1082



APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NAS INDÚSTRIAS DO PETRÓLEO,
GÁS E PETROQUÍMICA
TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS

Antonio Carlos G. Castagnet

INFORMAÇÃO IEA 51
CARREI 12

AGOSTO/1976

*

**APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NAS INDÚSTRIAS DO PETRÓLEO,
GÁS E PETROQUÍMICA**

TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS

Antonio Carlos G. Castagnet

**COORDENADORIA DE APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS E RADIAÇÃO
NA ENGENHARIA E NA INDÚSTRIA
(CARREI)**

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
SÃO PAULO - BRASIL**

APROVADO PARA PUBLICAÇÃO EM FEVEREIRO/1976

SUPERINTENDENTE

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"
SÃO PAULO - BRASIL

NOTA: Este trabalho foi conferido pelo autor depois de composto e sua redação está conforme o original, sem qualquer correção ou mudança.

ÍNDICE

	Página
3 0 0 – TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS	2
3 1 0 – GAMAGRAFIA DE SOLDAS	2
3 2 0 – ACOMPANHAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE RASPADORES NA LIMPEZA DE TUBULAÇÕES SUBTERRÂNEAS	3
3 2 1 – Técnicas operativas de acompanhamento	3
3 2 2 – Técnicas especiais de localização	4
3 2 3 – Cálculo da atividade da fonte	8
3 3 0 – LOCALIZAÇÃO DE FUGAS EM CONDUTOS SUBTERRÂNEOS.....	14
3 3 1 – Diluição homogênea do traçador	14
3 3 2 – Injeção contínua do traçador	16
3 3 3 – Injeção instantânea do traçador	18
3 3 4 – Técnica das fontes flutuantes	19
3 3 5 – Introdução de sondas na tubulação	20
3 4 0 – DETECÇÃO DA PASSAGEM DE INTERFACES	20
3 4 1 – Detecção mediante o uso de traçadores radioativos.....	22
3 4 2 – Detecção mediante o uso de traçadores inertes.....	22
3 4 3 – Detecção mediante a medição da densidade	23
3 4 3 1 – Sensibilidade do método	25
3 4 3 2 – Erros estatísticos.....	26
3 4 3 3 – Projeto dos equipamentos	29
3 4 3 4 – Exemplo de aplicação	32

APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NAS INDÚSTRIAS DO PETRÓLEO, GÁS E PETROQUÍMICA

TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS

Antonio Carlos G. Castagnet

RESUMO

Descrevem-se os fundamentos e a metodologia das principais técnicas radioisotópicas utilizadas na construção e operação de gasodutos e oleodutos.

Essas técnicas compreendem: a gamagrafia de soldas, o acompanhamento de raspadores, localização de perdas em tubulações subterrâneas e detecção de interfaces.

O uso das fórmulas matemáticas, deduzidas no tratamento teórico de cada método, é ilustrado em numerosos exemplos de aplicação.

Finalmente, apresenta-se um procedimento para o projeto de um detector de interfaces por atenuação de raios gama.

PRÓLOGO

O presente relatório faz parte de uma série de 10 publicações de caráter informativo e didático que estão sendo editadas pelo Instituto de Energia Atômica de São Paulo, com o título "Aplicação de Radioisótopos nas Indústrias do Petróleo, Gás e Petroquímica".

A lista de temas básicos considerados nos diferentes fascículos da série compreende:

- 1 – PERFILAGEM DOS POÇOS PETROLÍFEROS, Parte I. (Perfilagem gama natural e gama-gama).
- 2 – PERFILAGEM DE POÇOS PETROLÍFEROS, Parte II. (Perfilagens neutrônicas).
- 3 – ENGENHARIA DE CAMPO.
- 4 – TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS.
- 5 – ENGENHARIA DE PROCESSOS, Parte I. (Aplicação de Traçadores radioativos).
- 6 – ENGENHARIA DE PROCESSOS, Parte II. (Instrumentos radioisotópicos de medição e controle).
- 7 – PRODUÇÃO, Parte I. (Processos por aplicação da radiação ionizante).

8 – PRODUÇÃO, Parte II. (Técnicas nucleares de análise).

9 – MANUTENÇÃO E SEGURANÇA INDUSTRIAL.

10 – INVESTIGAÇÃO TECNOLÓGICA

Estes temas foram originalmente desenvolvidos em nível de pós-graduação nas aulas da disciplina IEA – “Aplicação de Radioisótopos nas Indústrias do Petróleo, Gás e Petroquímica”, ministrada no Instituto de Energia Atômica, pelo Eng^o Antonio Carlos Castagnet, durante o primeiro semestre de 1972.

A série de relatórios além de constituir uma compilação ordenada e completa do emprego de radioisótopos e radiações ionizantes nessas importantes indústrias, contém a contribuição pessoal dos autores no esclarecimento e aprofundamento de alguns temas, assim como na inclusão e análise de aplicações práticas, realizadas pela Coordenadoria de Aplicação de Radioisótopos e Radiações na Engenharia e na Indústria (CARREI)

O nível em que foram tratados os diferentes temas esteve condicionado, fundamentalmente, ao caráter didático que se pretendeu imprimir a este trabalho a fim de facilitar, no futuro, a repetição de cursos similares. Não obstante, muitos desses relatórios podem chegar a constituir verdadeiros guias teórico-práticos para o projeto e ou a utilização industrial de técnicas e equipamentos baseados no uso de radioisótopos e radiações ionizantes.

3.0.0 – TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS

O transporte de petróleo e seus derivados, a grandes distâncias, é feito normalmente, através de oleodutos e gasodutos.

As técnicas radioisotópicas são utilizadas durante a construção e operação desses sistemas tendo em vista as seguintes finalidades:

- inspeção não destrutiva de soldas (gamagrafia);
- acompanhamento e localização de raspadores (“scrapers”) na limpeza de tubulações subterrâneas;
- localização de fugas em condutos subterrâneos;
- detecção da passagem de interfaces, numa determinada secção de oleoduto, quando hidrocarbonetos diferentes são bombeados em série pela mesma tubulação.

3.1.0 – GAMAGRAFIA DE SOLDAS

As tubulações dos oleodutos que podem abranger um percurso de centenas de quilômetros são canos de aço, soldados entre si. Por tratar-se de um sistema destinado à condução de fluidos inflamáveis, sob pressão, a qualidade das soldas deve ser rigorosamente controlada.

A gamagrafia, ou radiografia industrial com raios gama, é uma das técnicas de ensaios não destrutivos comumente utilizada para inspecionar as soldas dos oleodutos.

Os equipamentos de gamagrafia têm, quando comparados com os aparelhos clássicos de raios X, a vantagem de não exigir energia elétrica para seu funcionamento. Esta característica os torna especialmente indicados para serviços de campo.

Atualmente, aplicam-se técnicas avançadas de gamagrafia para a inspeção automática de soldas em tubulações de grande diâmetro. Nesses casos, o irradiador gama (normalmente com fonte de ^{192}Ir) é colocado dentro da tubulação, montado sobre um dispositivo centralizador tracionado por um motor. Um circuito eletrônico, comandado por impulsos magnéticos, programa a seqüência automática das operações requeridas para a obtenção de uma série de gamagrafias em diferentes secções do conduto. Os sinais magnéticos são proporcionados por ímãs fixos na superfície externa da tubulação, nas secções a serem radiografadas.

Para a utilização eficiente e econômica desses modernos equipamentos é conveniente dispor de um laboratório móvel que permita efetuar em campanha todo o processo de revelação e interpretação de filmes.

Os princípios teóricos em que se fundamenta a gamagrafia e as técnicas de sua aplicação prática, constituem matéria específica de um outro curso e não serão tratados nestas apostilhas. Para uma descrição pormenorizada do tema, recomenda-se consultar a Referência 7.

3.2.0 – ACOMPANHAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE RASPADORES NA LIMPEZA DE TUBULAÇÕES SUBTERRÂNEAS

Antes da colocação em serviço de um oleoduto, e depois periodicamente durante sua operação, efetua-se a limpeza interna das tubulações fazendo circular dentro delas, sob pressão, um dispositivo raspador conhecido pelas denominações de "scraper", "pig" ou "go-devil". Basicamente, estes dispositivos são pistões equipados com escovas de aço ou fitas abrasivas (como no caso dos "polly-pigs") que, durante o deslocamento do conjunto, raspam a superfície interna da tubulação, provocando o desprendimento das incrustações ou depósitos eventualmente presentes na secção atravessada.

A eficiência de limpeza depende, entre outros fatores, da velocidade média a que o raspador se desloca dentro da tubulação.

Nos condutos subterrâneos, para controlar o avanço do dispositivo e possibilitar sua localização, caso ele fique retido por uma obstrução numa secção qualquer do oleoduto, empregam-se técnicas radioisotópicas baseadas na "marcação" do raspador com fontes seladas de radiação gama penetrante.

3.2.1 – TÉCNICAS OPERATIVAS DE ACOMPANHAMENTO

O avanço do raspador pode ser acompanhado de modo contínuo e permanente ao longo de todo o percurso do oleoduto, mediante a detecção, na superfície do solo, da radiação emitida pela fonte. Neste caso, se a profundidade em que corre a linha é da ordem de 1,50 m ou mais, torna-se necessário incorporar ao raspador uma fonte gama de energia e atividade muito altas, o que dificulta sua manipulação e aumenta os riscos de exposição para os operadores.

Uma outra técnica consiste na utilização de estações de rastejo, espaçadas ao longo da trajetória do oleoduto, onde a detecção se faz com a sonda encostada na superfície do chão ou introduzindo-a numa perfuração de pequeno diâmetro, adjacente à tubulação subterrânea. Consegue-se, com esta última variante, reduzir a distância fonte-detector e evitar a forte atenuação da radiação causada pela camada de terra presente nos casos anteriores. Ambos os efeitos concorrem para aumentar a eficiência de detecção, possibilitando o emprego de fontes de baixa atividade, independentemente da profundidade em que jaz a tubulação.

Esta técnica, embora apresente todas as vantagens acima mencionadas, tem o inconveniente de exigir a perfuração de poços auxiliares adjacentes à tubulação subterrânea e adequadamente separados entre si, o que obriga a conhecer com razoável precisão o traçado e as cotas da linha. Por outro lado, sendo a detecção descontínua, torna-se mais complicada a localização do raspador, caso ele fique retido entre duas estações de rastejo. (Secção 3.2.2)

Porém, às vezes, por causa da grande profundidade a que podem estar soterrados longos trechos de oleoduto, a técnica das perfurações auxiliares é a única viável. Nesses casos, deveria se prever durante a construção dos oleodutos, a colocação de tubos verticais junto a determinadas secções dos trechos subterrâneos, para proporcionar o fácil e permanente acesso das sondas detectoras até as paredes da tubulação.

Como sistema de detecção utiliza-se, geralmente, uma sonda de cintilação com cristal de Na(Tl) associada a um integrador portátil com registrador gráfico.

A passagem do raspador "marcado" por uma dada estação de rastejo traduz-se num incremento de curta duração na intensidade de radiação detectada, gerando-se, assim, um pico ou máximo no correspondente registro gráfico.

Na prática, para maior segurança, convém operar simultaneamente duas estações de rastejo consecutivas.

Registrada a passagem do raspador pela primeira estação, o operador transmite imediatamente por radio essa informação à segunda estação e desloca-se em seguida para a terceira. Procedendo analogamente com as demais estações vai-se acompanhando e controlando o avanço do raspador, até sua saída na estação terminal.

Conhecidos os instantes de passagem do raspador por duas estações consecutivas e a distância entre elas, pode-se determinar a velocidade média de trânsito naquele percurso. Esse dado permite, por sua vez, fazer as devidas correções no bombeamento do fluido propulsor, para manter a velocidade média do "scraper" nos restantes trechos, dentro dos limites ótimos previamente estabelecidos.

As técnicas anteriormente descritas são aplicáveis, também, para a localização de um raspador comum, preso dentro de um oleoduto. Com efeito, lançando na linha um segundo raspador, esta vez com uma fonte incorporada, poder-se-á acompanhar seu deslocamento até a secção obstruída, onde ficará detido junto ao primeiro, permitindo assim a localização.

3.2.2 – TÉCNICAS ESPECIAIS DE LOCALIZAÇÃO

Em tubulações que jazem em profundidades maiores do que 1,50 m utiliza-se a técnica das perfurações auxiliares, descrita na Secção 3.2.1, para possibilitar a detecção da passagem do raspador pelas estações de rastejo. Geralmente, nestes casos, empregam-se fontes de baixa atividade, difíceis ou impossíveis de serem detectadas da superfície do terreno. Portanto, se o raspador ficar preso na tubulação, entre duas estações, será preciso recorrer a técnicas especiais para sua localização.

Dependendo das circunstâncias, caberá tentar ainda a detecção da fonte diretamente da superfície, mediante o emprego de um sistema de medição gama de alta sensibilidade, tal como uma sonda de cintilação com cristal de InNa(Tl) de 3" x 3", colimada convenientemente.

A distância entre as duas estações deverá ser percorrida devagar, para permitir que o sistema registre qualquer anomalia localizada na radiação de fundo proveniente do solo.

Este procedimento poderá fornecer resultados positivos, incertos, ou totalmente negativos. Nesses dois últimos casos resta a opção de fazer novas perfurações auxiliares de sondagem ao longo de todo o percurso entre as duas estações, ou apenas nos trechos suspeitos.

Para calcular-se a separação máxima em que devem ser perfurados os poços auxiliares para garantir a localização do raspador, parte-se do registro gráfico obtido na última estação em que foi detectada a passagem da fonte. Seja a Figura 3 uma representação esquemática de tal registro e suponha-se que as condições de medição foram as seguintes:

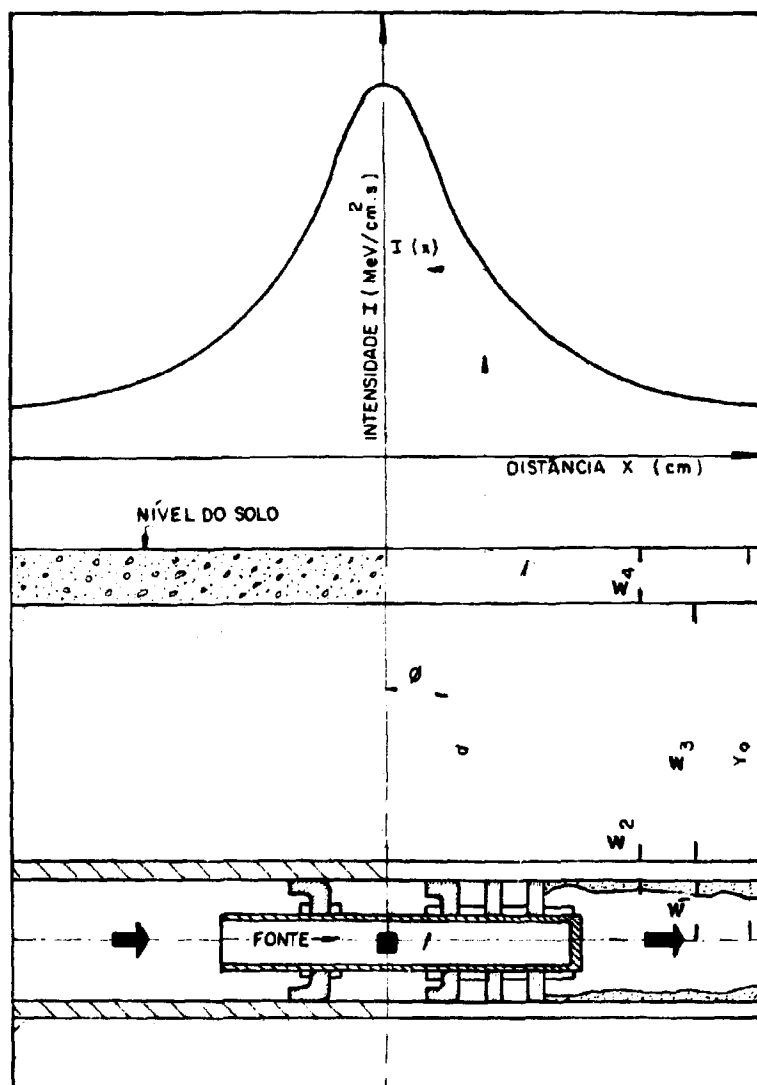


Figura 1 - Geometria para estudar a distribuição da intensidade I de radiação na superfície do solo

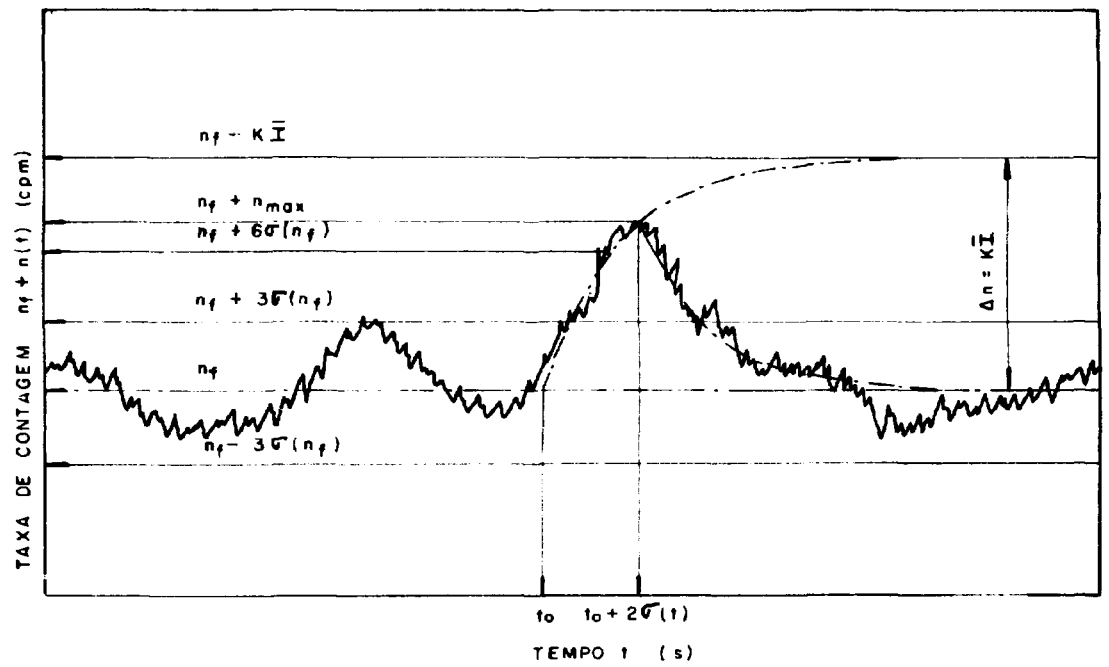


Figura 2 — Registro gráfico da radiação de fundo e da variação ante um pulso retangular de amplitude I e duração $2\tau(t)$.

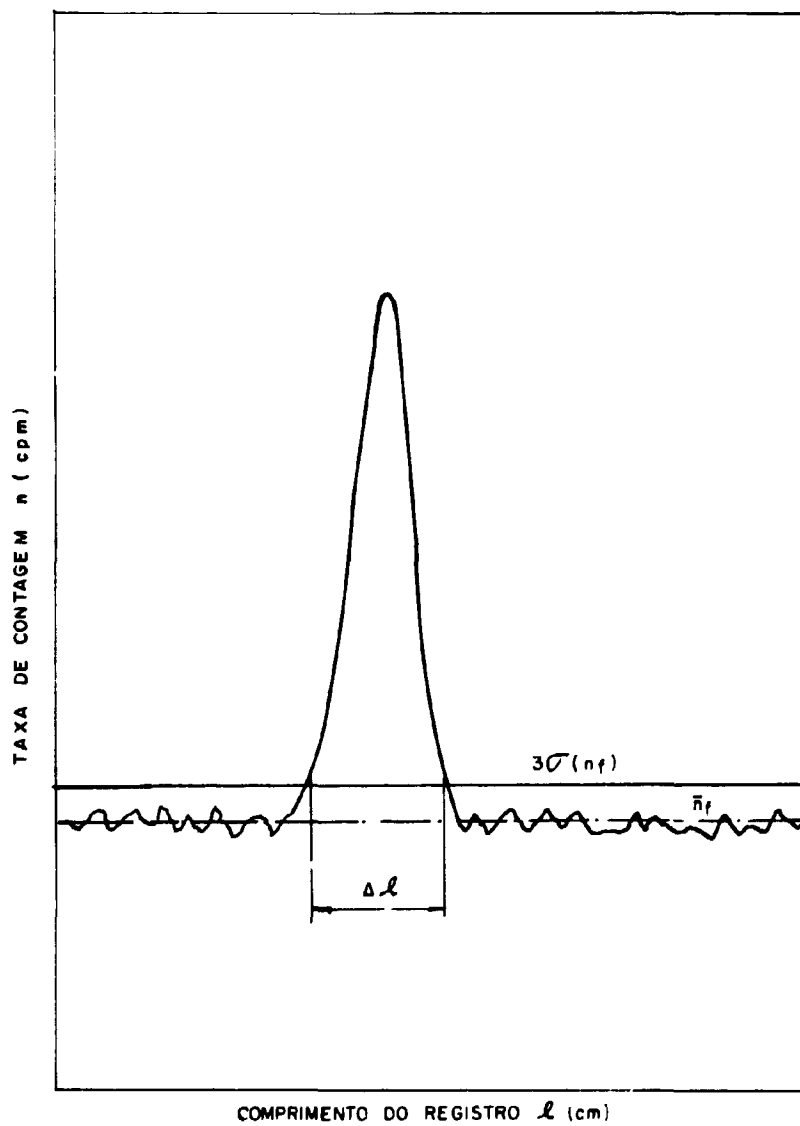


Figura 3 - Forma do pulso registrado durante a passagem do raspador, com a sonda numa perfuração auxiliar.

- a) velocidade média de trânsito do raspador, calculada antes de sua parada: V_r (m/min);
- b) constante de tempo RC do circuito integrador: τ (s);
- c) velocidade do papel do registrador: v_p (cm/min);
- d) taxa de contagem da radiação de fundo: n_f (cpm).

As indicações do registro gráfico acima de:

$$3\sigma(n_f) = 3\sqrt{\frac{30 n_f}{\tau}} \text{ cpm}$$

podem ser atribuídas, com certeza, à presença da fonte radioativa nas vizinhanças do detector.

Na Figura 3 esta condição define uma largura de pulso de Δl cm no papel do registrador que corresponde a um intervalo de tempo:

$$\Delta T = \frac{\Delta l}{v_p} \text{ min}$$

Nesse intervalo o raspador terá percorrido uma distância:

$$\Delta L = v_r \cdot \Delta T \text{ m}$$

O valor de ΔL dado pela expressão acima, representa também a separação máxima em que poderão ser perfurados os poços de localização para assegurar a detecção da fonte. Com efeito, se a fonte ficar na tubulação até a distância $\Delta L/2$ m de uma de tais perfurações, sua radiação ainda poderá ser detectada por cima das flutuações estatísticas do fundo de radioatividade natural.

Além dessa distância, a detecção no mesmo local seria incerta ou impraticável e o detector deveria ser mudado para outra perfuração espaçada a não mais do que $\Delta L/2$ m da fonte. Portanto, a separação entre as duas perfurações fica limitada a $2 \times (\Delta L/2)$, i.e. ΔL m, para possibilitar a detecção da fonte ainda no caso mais desfavorável.

3.2.3 – CÁLCULO DA ATIVIDADE DA FONTE

A profundidade em que corre um oleoduto, a natureza e a compactação dos materiais que o recobrem, estabelecem uma relação de interdependência entre a atividade que deve possuir a fonte radioativa e a técnica utilizada para o acompanhamento e a eventual localização do raspador.

Teoricamente, a atividade da fonte será função da técnica de detecção, mas, por outro lado, essa atividade tem que ser compatível com as limitações práticas de disponibilidade, custo e segurança radiológica.

Convém determinar, primeiro, a atividade da fonte para o caso mais simples, em que a passagem do raspador é detectada em estações de rastejo com a sonda encostada na superfície do chão. Em função do valor obtido para essas condições, poderá ser considerada a aplicação de técnicas de detecção mais complexas, por exemplo, o método das perfurações auxiliares.

No caso mais simples antes mencionado, a passagem do raspador poderá ser detectada com certeza se o pulso ou pico gerado no registro gráfico pela aproximação transitória da fonte ao detector é discernível de forma inequívoca das flutuações estatísticas da radiação de fundo ou "background", as quais estão sendo registradas simultaneamente. Esta condição permite calcular, como se demonstra em seguida, a atividade mínima que deve possuir a fonte incorporada ao raspador para possibilitar sua detecção.

A amplitude do pulso registrado numa estação de rastejo, concomitante com a passagem do raspador marcado, dependerá dos parâmetros seguintes.

- atividade da fonte radioativa;
- distância fonte-detector;
- espessura e densidade dos materiais atravessados pela radiação em seu caminho até o detector;
- velocidade de deslocamento do raspador;
- constante de tempo τ do integrador: ("rate-meter").

Para estabelecer a relação entre a amplitude do pulso registrado e os parâmetros mencionados acima, deve-se analisar a resposta do sistema de detecção e registro frente ao campo de radiação em movimento.

A distribuição da intensidade I (MeV/cm²s) do campo de radiação na superfície do solo pode ser expressa em função da atividade A (Ci) da fonte, da profundidade γ_0 (cm) do eixo da tubulação e da distância x (cm) entre o ponto considerado e a vertical que passa pela fonte. Conforme a Figura 1, e supondo uma fonte mono-energética, tem-se:

$$I(x) = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \eta h\nu AB}{4\pi d^2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_1 \rho_1 \epsilon_1}{\cos \phi} + \frac{\mu_2 \rho_2 \epsilon_2}{\cos \phi} + \frac{\mu_3 \rho_3 \epsilon_3}{\cos \phi} + \frac{\mu_4 \rho_4 \epsilon_4}{\cos \phi} \right) \right] \frac{\text{MeV}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

onde:

- η - rendimento dos fótons (fótons/desintegração);
- $h\nu$ - energia dos fótons (MeV/fóton);
- B - fator de multiplicação ou "build-up" energético;
- μ_i - coeficiente total de atenuação da radiação no material "i" (cm²/g);
- ρ_i - densidade do material "i" (g/cm³);
- ϵ_i - espessura do material "i" (cm).

Denominando-se

$$G = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \eta h\nu}{4\pi} \text{ MeV/Ci.s}$$

e levando-se em consideração que

$$d = (y_0^2 + x^2)^{1/2} \text{cm},$$

a equação (1) se transforma em:

$$I(x) = \frac{GAB}{y_0^2 + x^2} \exp \left[-\frac{1}{\cos \phi} (\mu_1 \rho_1 \epsilon_1 + \mu_2 \rho_2 \epsilon_2 + \mu_3 \rho_3 \epsilon_3 + \mu_4 \rho_4 \epsilon_4) \right] \text{MeV/cm}^2 \cdot s \quad (2)$$

Para a faixa de energias das fontes empregadas como traçadores neste tipo de trabalho, resulta:

$$\mu_1 \cong \mu_2 \cong \mu_3 \cong \mu_4 \cong \bar{\mu} \text{ cm}^2/\text{g}$$

Para $\cos \phi$ emprega-se a expressão:

$$\cos \phi = [1 + (x/y_0)^2]^{1/2}$$

Por substituição de $\bar{\mu}$ e $\cos \phi$ na equação (2) obtém-se

$$I(x) = \frac{GAB}{y_0^2 + x^2} \exp \{ -\bar{\mu} [1 + (x/y_0)^2]^{1/2} (\rho_1 \epsilon_1 + \rho_2 \epsilon_2 + \rho_3 \epsilon_3 + \rho_4 \epsilon_4) \} \text{MeV/cm}^2 \cdot s \quad (3)$$

Considerando-se, ainda, uma densidade média $\bar{\rho}$, de modo que:

$$y_0 \bar{\rho} = \rho_1 \epsilon_1 + \rho_2 \epsilon_2 + \rho_3 \epsilon_3 + \rho_4 \epsilon_4 \text{ g/cm}^2$$

ou

$$\bar{\rho} = \frac{1}{y_0} (\rho_1 \epsilon_1 + \rho_2 \epsilon_2 + \rho_3 \epsilon_3 + \rho_4 \epsilon_4) \text{ g/cm}^3$$

pode-se finalmente escrever a função $I(x)$ na forma

$$I(x) = \frac{GAB}{y^2 + x^2} \exp \{ -\bar{\mu} \bar{\rho} y_0 [1 + (x/y_0)^2]^{1/2} \} \text{MeV/cm}^2 \cdot s \quad (4)$$

que é a função procurada.

O campo de radiação representado pela equação (4) desloca-se com a mesma velocidade da fonte, isto é, com a velocidade $v(\text{cm/s})$ do raspador, de modo que a resposta do sistema de medição equivalerá à resposta frente a uma intensidade de radiação que varia em função do tempo.

Supondo-se, para simplificar que para $t = 0$ a fonte e o detector estão sobre a mesma vertical, a intensidade de radiação $I(t)$ para um outro instante qualquer pode ser calculada a partir da equação (4) fazendo $x = vt$. Neste caso, a equação (4) adquire a forma seguinte;

$$I(t) = \frac{GAB}{y_0^2 + (vt)^2} \exp \left\{ -\bar{\mu}_p y_0 [1 + (vt/y_0)^2]^{1/2} \right\} \text{ MeV/cm}^2 \cdot \text{s} \quad (5)$$

A resposta $n(t)$ em cps do registro gráfico será, conseqüentemente:

$$n(t) = f[I(t), r] \text{ cps} \quad (6)$$

A expressão analítica de $n(t)$ depende da função de entrada $I(t)$ e é muito simples quando esta função assume formas lineares típicas, a saber, as funções degrau, impulso ou rampa. A função $I(t)$ dada por (5) é relativamente complexa quando comparada com as mencionadas acima, o que torna a determinação exata de $n(t)$ muito trabalhosa.

Para efeitos práticos, pode substituir-se $I(t)$ por uma função impulso de amplitude \bar{I} e de duração ΔT adequadas, por exemplo:

$$\Delta T = 2\sigma(t) \text{ s} \quad (7)$$

$$\bar{I} \Delta T = 2 \int_0^{\sigma(t)} I(t) \cdot dt \text{ MeV/cm}^2 \quad (8)$$

ou

$$\bar{I} = \frac{1}{\sigma(t)} \int_0^{\sigma(t)} I(t) \cdot dt \text{ MeV/cm}^2 \cdot \text{s} \quad (9)$$

onde:

$\sigma(t)$ = desvio padrão do tempo em segundos, da distribuição dada pela equação (5).

Por definição, o desvio padrão do tempo é dado pela expressão:

$$\sigma(t) = \left[\frac{\int_0^{\infty} t^2 \cdot I(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} I(t) \cdot dt} \right]^{1/2} \text{ s} \quad (10)$$

As equações (7) e (8) indicam que a função impulso escolhida tem uma duração equivalente a dois desvios padrões do tempo, da distribuição real de $I(t)$, e uma amplitude constante de modo que a área do pulso retangular em questão é equivalente a área envolvida por $I(t)$ entre $t = -\sigma(t)$ e $t = +\sigma(t)$.

A amplitude e a duração do impulso de radiação, na entrada do detector, determinam a amplitude do pulso registrado pelo sistema de medição. No equilíbrio, a resposta do sistema é proporcional à intensidade da radiação incidente no detector. Por outro lado, se no instante t_0 ocorre um acréscimo brusco de amplitude \bar{I} nesta intensidade, a resposta $n(t)$ líquida correspondente será expressa, a partir deste instante, pela função:

$$n(t) = K \bar{I} \left[1 - \exp \left(-\frac{t_0 - t}{RC} \right) \right] \text{ cps} \quad (11)$$

onde:

K = constante de proporcionalidade que relaciona a intensidade do campo de radiação com as contagens (cps/MeV/cm² .s);

RC = constante de tempo τ do sistema de medição (s).

Quando $(t - t_0) \gg RC$ será $n(t) = K\bar{I}$, valor máximo da função (11). Entretanto, no caso considerado, o valor máximo de $n(t)$ será atingido quando $t - t_0 = 2\sigma(t)$ que é o intervalo de tempo durante o qual o pulso de radiação está presente no detector.

Substituindo $(t - t_0)$ por $2\sigma(t)$ na expressão (11) obtém-se:

$$n_{max} = K\bar{I} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{2\sigma(t)}{RC} \right] \right\} \text{ cps} \quad (12)$$

Para que n_{max} possa ser discriminado, sem dúvida nenhuma, das máximas flutuações estatísticas da radiação de fundo, deve-se cumprir a seguinte relação:

$$n_{max} \geq 6 \cdot \sigma(n_f) \text{ cps} \quad (13)$$

onde:

n_f = taxa de contagem da radiação de fundo (cps);

$\sigma(n_f)$ = desvio padrão de n_f (cps).

A condição imposta na relação (13) pode ser inferida da Figura 2. Na mesma figura observa-se, ainda que o valor máximo $\Delta n = K\bar{I}$ somente será atingido se a duração do pulso retangular considerado for muito maior do que a constante de tempo RC .

Sendo RC a constante de tempo do sistema de medição, o desvio padrão da taxa de contagem da radiação de fundo será expresso por:

$$\sigma(n_f) = \left(\frac{n_f}{2RC} \right)^{1/2} \text{ cps} \quad (14)$$

A partir das relações (12), (13) e (14) tem-se:

$$\bar{I} \geq \frac{6 \left(\frac{n_f}{2RC} \right)^{1/2}}{K \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{2\sigma(t)}{RC} \right] \right\}} \text{ MeV/cm}^2 \cdot \text{s} \quad (15)$$

e a partir das relações (5) e (9):

$$\bar{I} = \frac{GAB}{\sigma(t)} \int_0^{\sigma(t)} \frac{1}{y_0^2 + (vt)^2} \exp \left\{ -\mu \rho y_0 \left[1 + (vt/y_0)^2 \right]^{1/2} \right\} dt \text{ MeV/cm}^2 \cdot \text{s} \quad (16)$$

Da comparação entre as relações (15) e (16) e considerando-se apenas a igualdade, a atividade A resulta:

$$A = \frac{6(n_f)^{1/2} \sigma(t)}{(2RC)^{1/2} \cdot K \left[1 - \exp\left\{-\frac{2\sigma(t)}{RC}\right\}\right] \cdot \text{KBG} \int_0^{\sigma(t)} \frac{1}{y_0^2 + (vt)^2} \exp\left\{-\bar{\mu} \bar{\rho} y_0 [1 + (vt/y_0)^2]^{1/2}\right\} \cdot dt} \quad \text{Ci} \quad (17)$$

Das equações (10) e (5):

$$\sigma(t) = \left[\frac{\int_0^{\sigma(t)} \frac{t^2}{y_0^2 + (vt)^2} \exp\left\{-\bar{\mu} \bar{\rho} y_0 [1 + (vt/y_0)^2]^{1/2}\right\} \cdot dt}{\int_0^{\sigma(t)} \frac{1}{y_0^2 + (vt)^2} \exp\left\{-\bar{\mu} \bar{\rho} y_0 [1 + (vt/y_0)^2]^{1/2}\right\} \cdot dt} \right]^{1/2} \quad (18)$$

Da equação (17), é possível estabelecer uma relação entre $\sigma(t)$ e RC para a qual o valor da atividade seja mínimo e conseqüentemente, calcular o valor ótimo da constante de tempo a ser utilizada. Para tanto, basta determinar o ponto de máxima da função em RC que aparece no denominador da equação (17), expressa por:

$$f(\text{RC}) = (\text{RC})^{1/2} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{2\sigma(t)}{\text{RC}}\right] \right\} \quad (19)$$

Derivando a função (19) em relação a RC e tornando nula essa derivação chega-se à expressão:

$$\frac{2\sigma(t)}{\text{RC}} = \frac{1 - \exp\left[-\frac{2\sigma(t)}{\text{RC}}\right]}{2 - \exp\left[-\frac{2\sigma(t)}{\text{RC}}\right]} \quad (20)$$

cuja solução é

$$\frac{2\sigma(t)}{\text{RC}} = 1,26 \quad (21)$$

Desse modo, o valor da constante de tempo RC que torna mínima a atividade da fonte resulta:

$$\text{RC}_{\text{ótimo}} = 1,59 \sigma(t) \text{ s} \quad (22)$$

Finalmente, substituindo-se as expressões (21) e (22) na equação (17):

$$A_{\text{min}} = \frac{4,7 [n_f \sigma(t)]^{1/2}}{\text{KBG} \int_0^{\sigma(t)} \frac{1}{y_0^2 + (vt)^2} \exp\left\{-\bar{\mu} \bar{\rho} y_0 [1 + (vt/y_0)^2]^{1/2}\right\} dt} \quad \text{Ci} \quad (23)$$

A constante K deve ser determinada experimentalmente com uma fonte de atividade conhecida, utilizando-se o mesmo sistema de medição a ser empregado na prática.

O fator B de multiplicação ou "build up" para diferentes materiais pode ser obtido por meio de gráficos ou tabelas em função do produto $\bar{\mu}_0 \rho_0$ e da energia $h\nu$.

A equação 23 fornecerá um resultado somente aproximado da atividade mínima que deve possuir a fonte radioativa, em razão da simplificação suposta no começo, para a verdadeira expressão analítica de $n(t)$. Porém, este método foi utilizado satisfatoriamente para o caso de uma fonte de ^{24}Na (Ref.8).

Pode obter-se uma solução mais exata do problema, mediante aplicação de técnicas de computação analógica. Com efeito⁽⁹⁾, descreve um método de simulação analógica que permite o traçado da família de curvas representada pela equação (6) para diferentes valores da constante de tempo τ , e considerando como função de entrada, a função real $l(t)$ dada na equação 5. As curvas de resposta assim simuladas mostram as possibilidades de detecção para uma determinada escolha de fonte e constante de tempo, em função dos outros parâmetros do problema.

3.3.0 – LOCALIZAÇÃO DE FUGAS EM CONDUTOS SUBTERRÂNEOS

As técnicas de traçadores radioativos são particularmente aptas para localizar fugas de líquidos ou de gases em condutos subterrâneos.

Com efeito, o traçador, comportando-se como o próprio fluido, acumular-se-á no terreno adjacente à fuga no caso de líquidos, ou atingirá logo a superfície do solo, tratando-se de perda de gases.

A medição da intensidade de radiação ao longo da linha revelará os trechos onde é maior o acúmulo de traçador, fornecendo assim indicação segura da presença de fugas nesses locais.

A metodologia a ser aplicada em cada circunstância dependerá, naturalmente, não só das características do problema, mas também da experiência, dos recursos e da imaginação do pesquisador que tenta resolvê-lo.

Nesta secção só serão consideradas as técnicas radioisotópicas de utilização mais freqüente para localização de fugas em tubulações subterrâneas.

3.3.1 – DILUIÇÃO HOMOGÊNEA DO TRAÇADOR

Este método é especialmente aplicável no caso de vazamento de líquidos. O trecho da tubulação suspeito de apresentar fugas é primeiro esvaziado, e depois de fechado numa extremidade, alimentado sob pressão com uma solução aquosa radioativa.

Essa operação deve durar o tempo suficiente para permitir que um volume detectável de solução radioativa escoe pela fuga e se acumule no terreno circundante.

A seguir, esvazia-se novamente a tubulação e depois de lavada completamente com água comum, (para eliminar a contaminação residual das paredes), faz-se um registro do nível de radioatividade ao longo do trecho investigado. O local da perda poderá então ser identificado pelo aumento da intensidade de radiação registrado nesse ponto.

Geralmente, utilizam-se como traçadores compostos solúveis de ^{131}I , ^{82}Br ou ^{24}Na . O traçador é diluído homogeneamente num volume de água suficiente para encher a tubulação e compensar as perdas durante o teste.

Para calcular a atividade específica que deve possuir a solução radioativa é necessário conhecer as cotas de profundidade da linha e medir ou estimar a vazão da perda.

Numa primeira aproximação, pode-se admitir que toda a atividade $A(\text{Ci})$ absorvida pelo terreno, na zona do vazamento, estará concentrada num ponto à mesma profundidade y_0 (cm) do eixo da tubulação. Nessas condições, a resposta $n(\text{cpm})$ do medidor, estando o detector encostado no chão e sobre a vertical que passa pelo ponto considerado, será.

$$n = n_0 A B \left(\frac{100}{y_0} \right)^2 \exp(-\bar{\mu}\bar{\rho}y_0) \text{ cpm} \quad (24)$$

onde:

n_0 – resposta do sistema para uma fonte puntiforme de 1 Ci, a 100 cm do detector, sem absorvente, (cpm);

B – fator de multiplicação ou de "build-up";

y_0 – profundidade do eixo da tubulação (cm);

$\bar{\mu}\bar{\rho}$ – coeficiente de atenuação de massa (cm^2/g);

$\bar{\rho}$ – densidade média do terreno ao longo de y_0 (g/cm^3)

A condição para que a resposta n possa ser diferenciada das flutuações estatísticas do fundo de radiação n_f é:

$$n \geq 6 \sigma(n_f)$$

Portanto a atividade $A_{m,n}$ (Ci) da fonte deve ser:

$$A_{m,n} \geq \left(\frac{y_0}{100} \right)^2 \frac{6\sigma(n_f)}{B n_0} \exp(\bar{\mu}\bar{\rho} y_0) \text{ Ci} \quad (25)$$

Por outro lado:

$$A_{m,n} = a_0 V_{m,n} = a_0 \bar{q} \Delta T_{m,n} \text{ Ci} \quad (26)$$

sendo:

a_0 – atividade específica inicial da solução radioativa (Ci/m^3);

$V_{m,n}$ – volume mínimo de solução acumulado no terreno, no local da fuga (m^3);

\bar{q} – vazão média da perda (m^3/min);

$\Delta T_{m,n}$ – tempo mínimo requerido para acumular a atividade mensurável (min)

Combinando-se as equações 5 e 6, pode calcular-se a duração $\Delta T_{m,n}$ da operação de bombeamento da solução radioativa, em função de sua atividade específica inicial e da vazão da perda. Resulta, assim:

$$\Delta T_{\min} = \left(\frac{y_0}{100}\right)^2 \cdot \frac{6 \sigma(n_f)}{B n_0 a_0 q} \exp(\mu p y_0) \min \quad (27)$$

Às vezes, a vazão média \bar{q} da perda pode ser estimada mediante o seguinte procedimento⁽⁵⁾:

- 1 – enche-se a tubulação à pressão p_1 ;
- 2 – mede-se o tempo ΔT em que a pressão cai a um valor próximo p_2 , por efeito natural do vazamento;
- 3 – repete-se o ensaio levando o líquido novamente à pressão p_1 ;
- 4 – abrindo uma válvula ou torneira extrai-se rapidamente um volume ΔV tal que provoque a mesma queda de pressão obtida na operação 2.

A vazão média da fuga será então aproximadamente igual à relação $\Delta V/\Delta T$

O emprego da técnica de diluição homogênea do traçador, da maneira descrita, exige um conhecimento muito preciso do traçado da linha subterrânea. Caso contrário, convém introduzir uma variante em sua aplicação que consiste em fazer as medições de radiação antes de esvaziar a solução radioativa, e com uma varredura perpendicular à trajetória da tubulação⁽⁴⁾.

As Figuras 4a e 4b ilustram claramente os fundamentos desse método. No caso a), em que a solução radioativa está confinada na tubulação, obtém-se um pico bem definido que contrasta com o registro b), na região da perda, onde o traçador contamina parte do terreno adjacente.

3.3.2 – INJEÇÃO CONTÍNUA DO TRAÇADOR

A técnica de injeção contínua é utilizada, principalmente, para localizar fugas de gases. Introduce-se, na corrente do fluido que circula pela tubulação, uma vazão constante q_0 (m^3/h) de um traçador de vida curta com atividade específica a_0 (Ci/m^3) e detecta-se, posteriormente, a acumulação desse traçador no local da perda

De acordo com o princípio da diluição contínua, uma vez alcançado o estado estacionário de difusão do traçador na corrente, a atividade $\Delta A(Ci)$ incorporada ao sistema durante o intervalo de tempo $\Delta T(h)$ deve ser igual à atividade que passa por uma seção qualquer do conduto nesse mesmo intervalo. Portanto:

$$\Delta A = a_0 q_0 \Delta T = a Q \Delta T \quad (28)$$

ou seja:

$$a_0 q_0 = a Q \quad (29)$$

onde:

a – atividade específica da corrente, para o estado de equilíbrio (Ci/m^3);

Q – vazão volumétrica de circulação do fluido no conduto (m^3/h)

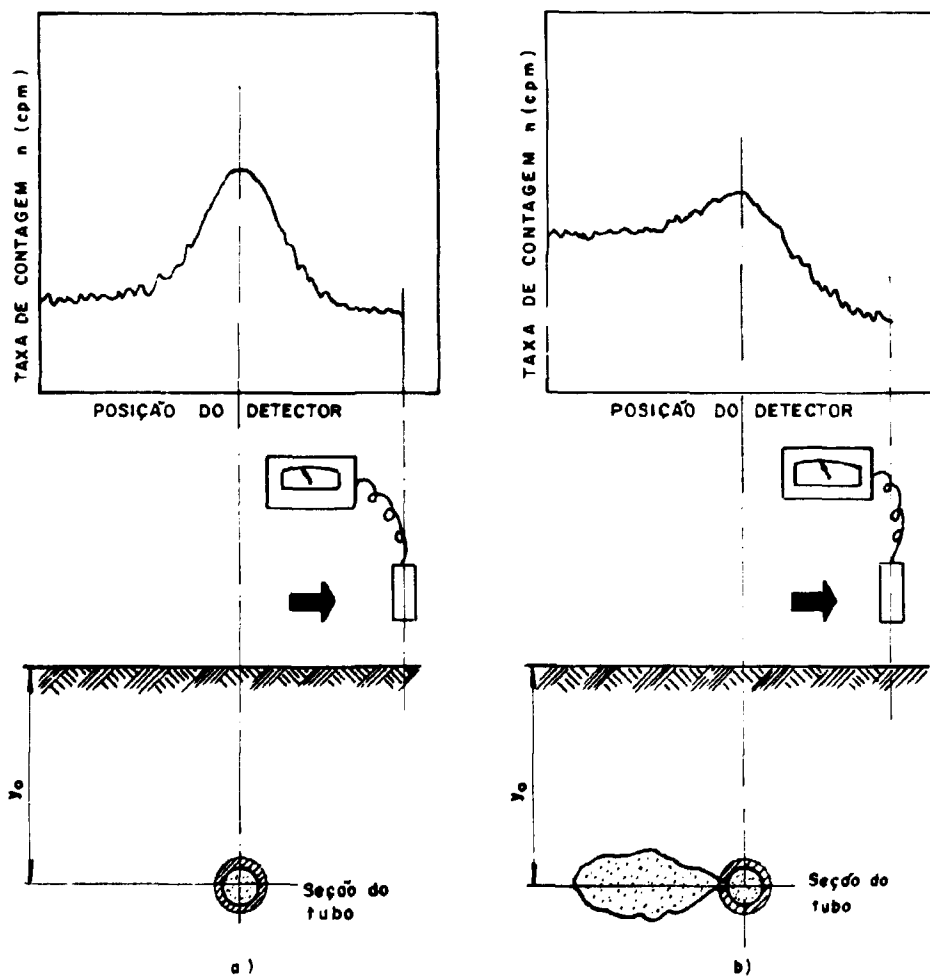


Figura 4 - Resposta de um detector em função de sua posição relativa à projeção vertical da tubulação, para seções sem fugas (caso a) e com fugas de traçador (caso b).

Seja q (m^3/h) a vazão da perda. O acréscimo de atividade $dA(Ci)$ no local adjacente à fuga durante o intervalo dt , ao tempo t (h) de começada a injeção, será (desprezando o tempo t_0 de equilíbrio):

$$dA = q a dt - A \lambda dt Ci \quad (30)$$

sendo λ (h^{-1}) a constante de desintegração do radioisótopo utilizado e A atividade total presente ao tempo t na região da perda.

Da equação 29:

$$a = \frac{a_0 q_0}{Q} = \frac{a_i q_0}{Q} \exp(-\lambda t) \quad (31)$$

onde:

a_i – atividade específica inicial (para $t = 0$) do traçador injetado (Ci/m^3).

Substituindo na equação 30:

$$dA = \frac{a_i q_0 q}{Q} \exp(-\lambda t) dt - A \lambda t Ci \quad (32)$$

cuja solução é:

$$A(t) = \frac{a_i q_0 q t}{Q} \exp(-\lambda t) Ci \quad (33)$$

A atividade acumulada nas vizinhanças da fuga atingirá um máximo quando:

$$\lambda t = 1$$

conforme pode ser deduzido da equação 33, fazendo $dA/dt = 0$

Portanto, se $T_{1/2}$ (h) é a meia-vida do radioisótopo utilizado na preparação do traçador, o tempo ótimo de injeção resulta:

$$t_{ot} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0,693} = 1,44 T_{1/2} \quad (34)$$

Nessas condições, a atividade máxima que poderá ser acumulada na zona de perda será:

$$A_{max} = \frac{a_i q_0 q}{eQ} \cdot 1,44 T_{1/2} \cong \frac{0,5 a_i q_0 q}{Q} T_{1/2} Ci \quad (35)$$

Esta técnica permite a localização de fugas sem necessidade de interromper o serviço normal da linha.

3.3.3 – INJEÇÃO INSTANTÂNEA DO TRAÇADOR

Se um volume discreto de traçador com atividade total A_0 (Ci) é injetado de forma quase instantânea numa tubulação onde circule um fluido com vazão constante Q (m^3/h) resultará, para uma seção transversal do conduto a jusante do ponto de injeção:

$$A_0 = Q \int_{t_1}^{t_2} \bar{C}(t) dt C_i \quad (36)$$

onde $t_2 - t_1$ define o tempo de passagem da "nuvem" radioativa pelo ponto de medição e $\bar{C}(t)$ a concentração média instantânea de traçador nessa secção do conduto.

Caso ocorra uma perda de vazão q (m^3/h), a atividade A (Ci) acumulada nas imediações da fuga após a passagem da onda radioativa será:

$$A = q \int_{t_1}^{t_2} \bar{C}(t) dt C_i \quad (37)$$

Combinando-se as equações 36 e 37 resulta:

$$A = \frac{q}{Q} \cdot A_0 C_i \quad (38)$$

ou levando em conta o decaimento da atividade A_0 :

$$A = \frac{q}{Q} A_0 \exp(-\lambda t) C_i \quad (39)$$

onde t representa o tempo médio de trânsito da nuvem radioativa do ponto de injeção à secção da perda.

Substituindo-se na equação acima o valor de A_{min} dado pela equação 26, pode estimar-se a atividade mínima A_{0min} que deve ser injetada na tubulação para possibilitar a detecção da fuga.

$$A_{0min} = \frac{Q}{q} A_{min} \exp(\lambda t) C_i \quad (40)$$

sendo

A_{min} – valor dado pela equação 26 (Ci)

A técnica descrita é aplicável especialmente em tubulações para transporte ou distribuição de gás, onde não convém interromper o serviço ou onde só cabe admitir cortes breves. Neste último caso o fornecimento de fluido será interrompido momentaneamente, para a evacuação do volume contaminado, antes que ele possa ingressar na rede de consumo domiciliar ou industrial.

3.3.4 – TÉCNICA DAS FONTES FLUTUANTES

Se a perda for suficientemente grande para originar um escoamento apreciável em direção à fuga, podem ser introduzidos na tubulação pequenos flutuadores carregados com fontes radioativas encapsuladas. Os flutuadores, atuando como corpos à deriva, serão levados pela corrente até o local da perda onde ficarão estacionados.

A detecção das fontes é feita da superfície, com técnicas análogas às utilizadas para o acompanhamento e localização de raspadores (Secção 3.2.1).

Este método tem a vantagem de não deixar contaminações radioativas residuais. Por outro lado, o

emprego de radioisótopos de curta meia vida, por exemplo ^{24}Na ou ^{82}Br , reduz os eventuais riscos de exposição caso alguma das fontes não possa ser recuperada

3.3.5 – INTRODUÇÃO DE SONDAS NA TUBULAÇÃO

Para resolver certos problemas de localização de fugas de fluidos, empregam-se sondas de detecção e registro de radioatividade alimentadas por bateria, que são deslocadas dentro da tubulação por propulsão hidráulica, de modo semelhante aos raspadores⁽¹⁾

A sonda é introduzida na tubulação após a aplicação de alguma das técnicas já descritas (Secções 3.3.1 ou 3.3.3, por exemplo) para permitir a acumulação do traçador radioativo no terreno adjacente às fugas. Desse modo, durante seu deslocamento, a sonda irá registrando máximos de atividade, em correspondência com as secções de tubulação que apresentaram perdas de traçador. Antes do ensaio, para posteriormente poder correlacionar as indicações do registro com a posição que ocupava a sonda na tubulação, colocam-se fontes encapsuladas de ^{60}Co com atividades da ordem de 0,5 mCi, em perfurações até a profundidade da linha e convenientemente espaçadas entre si. Conhecida a separação entre as perfurações auxiliares, a seqüência dos picos no registro permitirá determinar a posição das fugas na tubulação.

Com efeito; de acordo com os esquemas e notação das Figuras 5a e 5b e supondo que a velocidade da sonda foi constante nos trechos d_1 e d_2 , obtêm-se as relações seguintes:

$$\frac{d_1}{d'_1} = \frac{x_1}{x'_1}$$

$$\frac{d_2}{d'_2} = \frac{x_2}{x'_2}$$

de onde;

$$x_1 = \frac{d_1}{d'_1} \cdot x'_1 \text{ m (distância de } P_1 \text{ a } F_1 \text{ no terreno)}$$

$$x_2 = \frac{d_2}{d'_2} \cdot x'_2 \text{ m (distância de } P_2 \text{ a } F_2 \text{ no terreno)}$$

3.4.0 – DETECÇÃO DA PASSAGEM DE INTERFACES

Freqüentemente, duas ou mais classes de petróleo ou de seus derivados são transportados em série, sem solução de continuidade, através de um mesmo oleoduto.

Nesses casos, é preciso detectar com antecedência, na estação terminal, a chegada das diferentes interfaces para enviar cada tipo de produto a seu respectivo tanque de armazenamento.

As interfaces abrangem uma certa região do fluido constituído pela mistura dos dois produtos, sendo que a concentração porcentual de um deles varia de forma contínua de 0 a 100%, ao longo do volume afetado.

Em geral, durante a operação de armazenagem, esse volume é incorporado ao produto de menor valor, para não degradar as propriedades do outro.

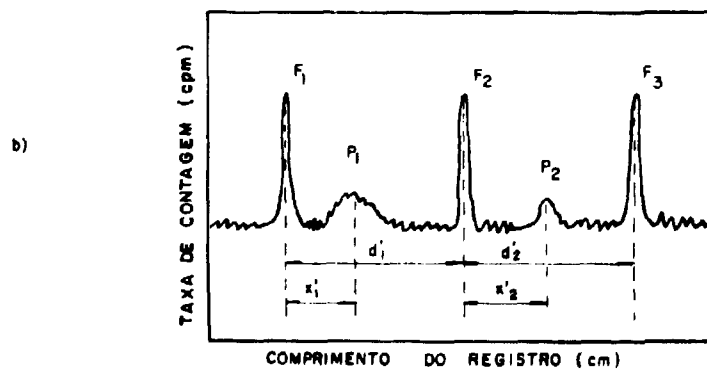
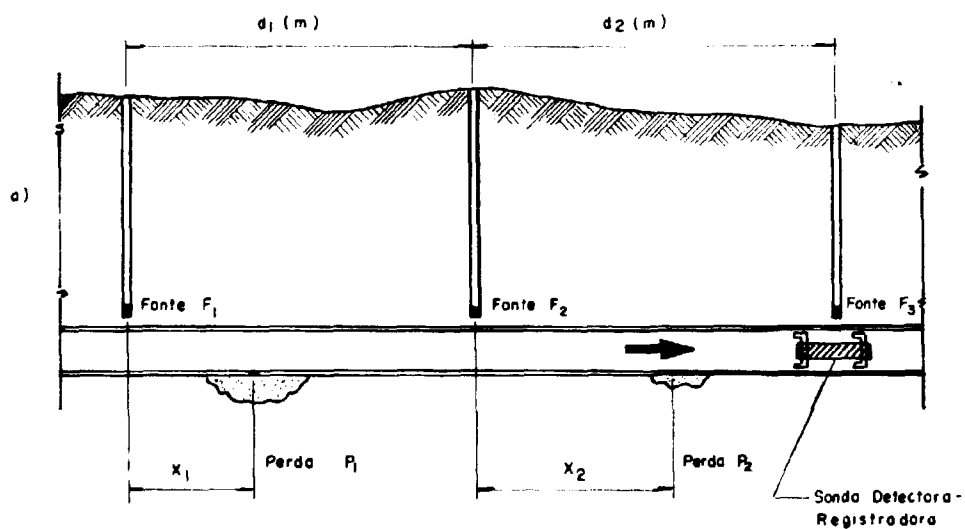


Figura 5 — a) Localização das de referência (F_1 , F_2 e F_3) e das perdas (P_1 e P_2) Na tubulação.
b) posição dos máximos no registro gráfico.

Os métodos clássicos para detectar a chegada de interfaces baseiam-se na medição, normalmente por amostragem descontínua, da densidade ou da cor dos fluidos. O instante em que deve ser iniciada a operação de amostragem é calculado em função da distância de transporte, das dimensões da tubulação nesse percurso, do volume de cada produto e da vazão de bombeamento aplicada na linha. Quando a distância entre a estação emissora e a estação receptora é da ordem das centenas de quilômetros pode cometer-se um erro apreciável na estimativa do tempo de chegada da interface, pois nem sempre é possível manter constante a vazão das bombas. Isto implica em horas-homem improdutivas gastas na manipulação inútil de um grande número de amostras, e também, eventualmente, na perda ou degradação de produtos.

As técnicas radioisotópicas descritas a seguir permitem obviar estes inconvenientes.

3.4.1 – DETECÇÃO MEDIANTE O USO DE TRAÇADORES RADIATIVOS

A solução radioativa (compostos de ^{140}Ba ou ^{124}Sb) é injetada na estação das bombas exatamente na região de interface entre os dois produtos⁽⁶⁾; um detector de raios gama instalado na superfície externa do oleoduto, numa secção próxima à estação receptora, permitirá conhecer o instante preciso em que começa passar o traçador radioativo, isto é, a zona de interface.

Se, como é o usual nesses casos, a condução dos fluidos é feita em regime turbulento, a interface (onde ocorre a mistura dos produtos) afetar-se-á, ao final do percurso, um volume restrito de líquido. Portanto, a diluição final do traçador incorporado na estação de bombas resultará relativamente pequena, permitindo que a passagem da interface possa ser detectada diretamente através das paredes da tubulação, com equipamentos simples.

Esta técnica tem a desvantagem de exigir uma provisão permanente de material radioativo e o emprego de um dispositivo injetor especial, de alta pressão, para incorporar o traçador na linha. Por outro lado sua aplicação traz, como consequência, problemas de segurança radiológica vinculados à contaminação radioativa dos combustíveis e lubrificantes.

Por estes motivos, o método descrito que foi a primeira técnica radioisotópica utilizada para a detecção de interfaces, caiu hoje quase em desuso e só é aplicado em situações especiais por exemplo, para definir com exatidão a região abrangida pela interface.

3.4.2 – DETECÇÃO MEDIANTE O USO DE TRAÇADORES INERTES

Neste método, faz-se a marcação da interface por incorporação de um traçador inerte (não radioativo) susceptível de ser detectado posteriormente com base nos efeitos da interação da radiação com a matéria.

Por exemplo, utilizando-se como traçador inerte um composto de cádmio solúvel nos hidrocarbonetos, a passagem da interface por uma secção do oleoduto poderá ser detectada por um sistema de medição baseado na moderação de nêutrons rápidos e na captura dos nêutrons térmicos.

O Sistema de medição está constituído por uma fonte de nêutrons rápidos (por exemplo de $^{241}\text{Am/Be}$) e dois detectores, um de raios gama e o outro de nêutrons térmicos, instalados sobre a tubulação numa posição diametralmente oposta em relação à fonte.

Como consequência das colisões com os núcleos de hidrogênio e de carbono, os nêutrons rápidos atingirão o estado térmico após um curto percurso nos hidrocarbonetos líquidos. Os nêutrons lentos resultantes deste processo de moderação difundir-se-ão no fluido, até desaparecer por captura radioativa.

Em condições normais, os hidrocarbonetos apresentarão uma secção eficaz de captura relativamente baixa, de maneira que os nêutrons térmicos terão uma probabilidade maior de atingir o detector de nêutrons lentos e a produção de raios gama de captura será pequena.

Portanto, antes da chegada da interface marcada com cádmio à secção de medição, a taxa de contagem será alta para os nêutrons lentos e baixa para os raios gama

De modo semelhante à influência da salinidade das formações sobre os resultados das perfilagens $N - NT$ e $N - G^{(2)}$, a presença do cádmio dissolvido no hidrocarboneto inverte completamente a situação anterior. Por causa de sua altíssima secção eficaz de captura para nêutrons termicos, o cádmio, ainda em baixas concentrações, provocará uma forte diminuição do fluxo de nêutrons lentos nas vizinhanças dos detectores e um conseqüente aumento da intensidade de raios gama

Embora já existam aplicações desta técnica⁽³⁾, ela ainda tem a desvantagem de exigir, como no caso anterior, um dispositivo injetor na estação de bombas e de incorporar produtos estranhos nos hidrocarbonetos

3.4.3 – DETECÇÃO MEDIANTE A MEDIÇÃO DA DENSIDADE

A passagem da interface constituída por dois fluidos de densidades diferentes ρ_1 e ρ_2 pode ser detectada, através das paredes de uma tubulação, medindo por atenuação gama as variações de densidade do fluido em circulação

De acordo com o esquema e notação da Figura 6, se n_0 fótons por segundo (f/s) é a intensidade inicial do feixe de raios gama dirigido ao detector através de uma secção de tubo de ϕ cm de diâmetro interno e x_0 cm de espessura de parede onde passa um fluido de densidade igual a ρ g/cm³, a intensidade n f/s emergente do outro lado do conduto e que chega ao detector sera:

$$n = n'_0 e^{-\mu'_0 2x_0} e^{-\mu' \phi} \text{ f/s} \quad (41)$$

sendo:

μ'_0 e μ' – coeficientes totais de atenuação linear da radiação nos materiais da tubulação e do fluido respectivamente (cm⁻¹);

Fixadas as condições geométricas da medição, o termo:

$$n'_0 e^{-2\mu'_0 x_0} \text{ f/s}$$

é uma constante e representa a intensidade do feixe que atinge o detector quando não ha liquido na tubulação

Fazendo:

$$n_0 = n'_0 e^{-2\mu'_0 x_0} \text{ f/s} \quad (42)$$

a equação 41 toma a simples forma de:

$$n = n_0 \exp(-\mu \phi) \text{ f/s} \quad (43)$$

Se μ cm²/g e o coeficiente total de atenuação da massa para os raios gama no liquido em questão resultará:

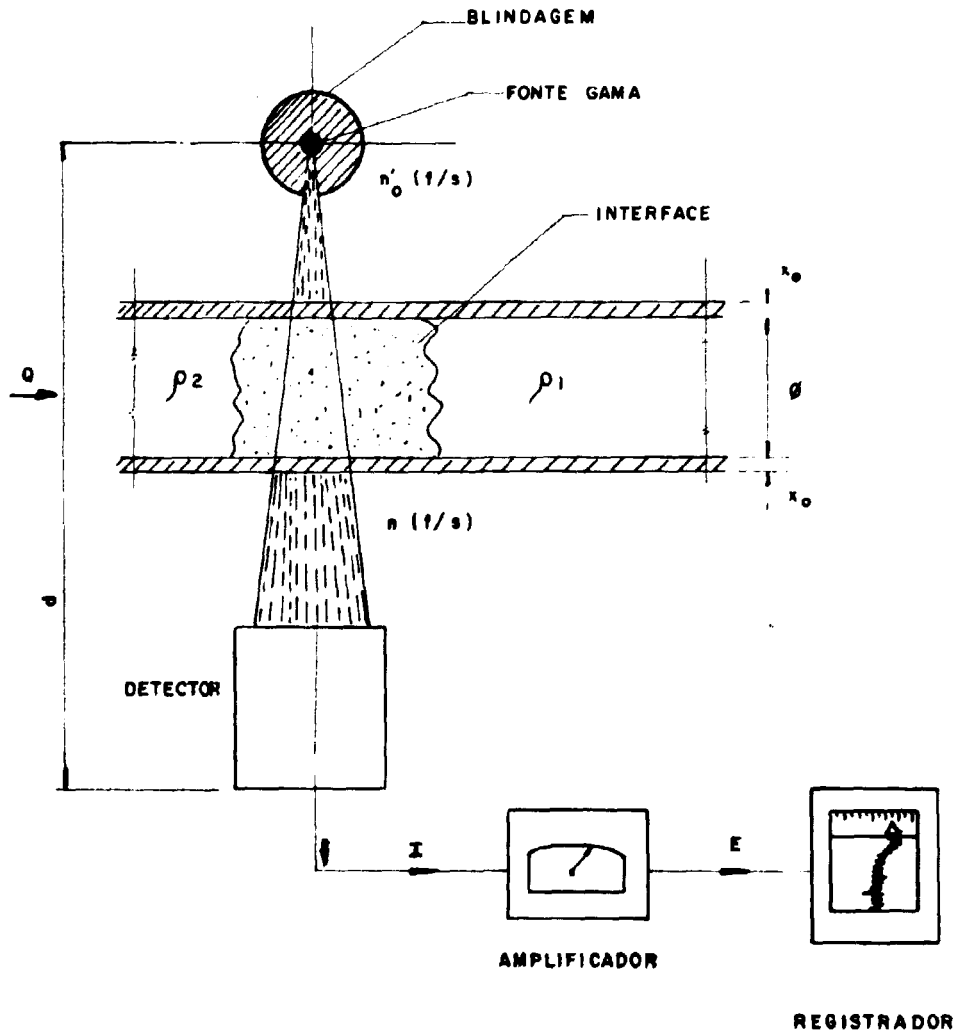


Figura 6 - Detecção de interfaces por atenuação de raios gama.

$$\mu' = \mu \rho \text{ cm}^{-1} \quad (44)$$

$$n = n_0 \exp(-\mu \phi t) \text{ f/s} \quad (45)$$

Na prática, entre 0,6 MeV e 1,3 MeV de energia e para valores médios ou baixos do número atômico Z dos absorventes, o coeficiente total de atenuação de massa será aproximadamente igual ao coeficiente σ de atenuação por efeito Compton que, como é sabido, só depende da relação Z/A dos materiais (A = peso atômico).

Em consequência, para essa faixa de energias, μ na equação 45 permanecerá constante enquanto não variar a relação Z/A dos produtos que circulam na tubulação, e n só será função da densidade ρ .

Por outro lado, como Z/A é aproximadamente igual a 0,5 para todos os elementos, exceto o hidrogênio, cabe esperar uma certa independência da composição química na medida de densidade por atenuação gama.

3.4.3.1 – SENSIBILIDADE DO MÉTODO

Para uma variação pequena de densidade $\Delta\rho$, corresponderá uma variação Δn na intensidade do feixe, de valor absoluto:

$$\Delta n = n_0 \mu \phi \Delta\rho \exp(-\mu \phi t) \text{ f/s} \quad (46)$$

Expressando a variação de densidade em forma relativa, i.e., em termos de $\Delta\rho/\rho$:

$$\Delta n = n_0 \mu \phi \rho \frac{\Delta\rho}{\rho} \exp(-\mu \phi t) \text{ f/s} \quad (47)$$

O sistema de medição será tanto mais sensível quanto maior for Δn para uma variação relativa unitária da densidade. Portanto, a sensibilidade absoluta S do sistema de medição pode ser definida como:

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta\rho/\rho} = n_0 \mu \phi \rho \exp(-\mu \phi t) \text{ f/s} \quad (48)$$

Uma forma de melhorar a sensibilidade de medição é aumentar a intensidade n_0 do feixe, o que equivale a utilizar uma fonte radioativa de maior potência. Porém, independentemente de n_0 , existirá um máximo de função S para um valor particular do produto $(\mu \phi t)$.

Para obter uma expressão da sensibilidade que seja independente de n_0 , convém definir a sensibilidade normalizada S_0 como:

$$S_0 = \frac{S}{n_0} = \mu \phi \rho \exp(-\mu \phi t) \quad (49)$$

Da condição de máximo:

$$\frac{dS_0}{d(\mu\phi\rho)} = 0$$

resulta:

$$\mu\phi\rho = 1 \quad (50)$$

Portanto, o desempenho do sistema de medição sera ótimo quando.

$$\phi = \frac{1}{\mu\rho} \text{ cm} \quad (51)$$

$$\mu = \frac{1}{\phi\rho} \text{ cm}^2/\text{g} \quad (52)$$

A relação 51 permite calcular o diâmetro ótimo da secção de medição em função da densidade ρ g/cm³ do produto e da energia da fonte radioativa (implícita em μ)

A relação 52 serve para seleccionar a fonte quando ρ e ϕ são valores estabelecidos

Na pratica, a energia, a meia vida e o custo dos emissores gama atualmente disponíveis limitam a seleção da fonte a uma opção entre o ¹³⁷Cs e o ⁶⁰Co. Para estes radioisótopos, os coeficientes de atenuação em hidrocarbonetos valem 0,09 cm²/g e 0,06 cm²/g, respectivamente. Substituindo estes valores de μ na equação 51 e supondo um hidrocarboneto de densidade igual a 0,9 g/cm³, os diâmetros ótimos do tubo na secção de medição resultariam de 12,2 cm para o ¹³⁷Cs e de 18 cm para as fontes de ⁶⁰Co.

Obviamente, não é imprescindível que o sistema opere com a máxima sensibilidade ($\mu\phi\rho = 1$). De fato, existe um outro critério de projeto baseado no erro estatístico mínimo (Secção 3.4.3.2), em que $\mu\phi\rho = 2$. Por outro lado, na maioria dos casos, o mesmo equipamento sera utilizado para detectar interfaces numa ampla faixa de densidades. Como regra geral, a medição de densidade por atenuação gama resultará viável se:

$$0,18 \leq \mu\phi\rho \leq 3 \quad (53)$$

A figura 7 mostra a curva da sensibilidade normalizada S_0 (equação 49) em função do produto $\mu\phi\rho$. Observa-se que para as condições mais desfavoráveis de medição, correspondentes aos limites do intervalo dado pela expressão 53, a sensibilidade ainda atingirá 40% de seu valor máximo. Esta diminuição da sensibilidade que é inerente ao processo de medição, pode ser compensada amplificando-se eletronicamente o sinal de saída do detector por um fator 2,5.

Com as tolerâncias de projeto representadas pela expressão 53, as fontes de ¹³⁷Cs e de ⁶⁰Co servem para tubulações com diâmetros de até 36 cm e 54 cm respectivamente, o que inclui a maioria dos oleodutos.

3.4.3.2 – ERROS ESTATÍSTICOS

Na equação 44, n representa o verdadeiro valor médio do número de fótons que ingressam no detector na unidade de tempo. Por causa da natureza aleatória do processo de decaimento radioativo, esse valor só poderia ser obtido após integrar a contagem dos fótons durante um tempo infinito. Porém, os instrumentos de medição indicam o valor que resulta de calcular a média para um intervalo finito T(s) que depende das características eletrônicas do circuito integrador.

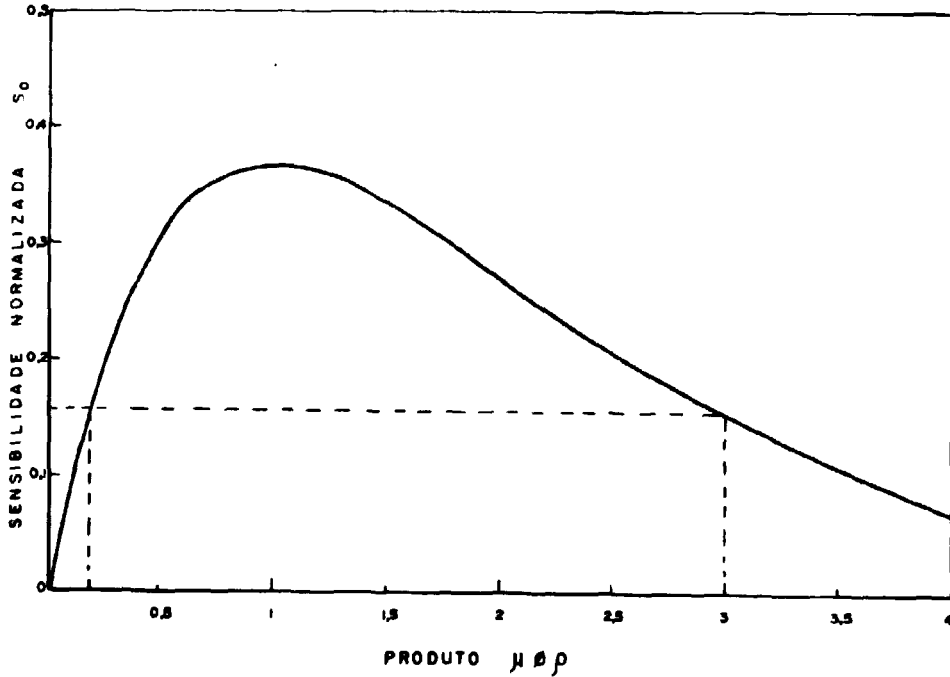


Figura 7 – Sensibilidade normalizada em função do produto $\mu \phi \rho$.

Pode-se demonstrar que:

$$T = 2\tau = 2RC \text{ s} \quad (54)$$

sendo:

τ – constante de tempo do circuito eletrônico dada pelo produto da resistência R vezes a capacidade C do integrador (s).

Nesses condições, a indicação instantânea do instrumento de leitura corresponderá a um valor " n_i " (fótons/segundo) que, em geral, diferirá do verdadeiro valor médio " n ". A magnitude do desvio de " n_i " em relação a " n " variará estatisticamente ao longo do tempo.

O desvio máximo pode ser determinado, praticamente, mediante um grande número de observações instantâneas ou fazendo o registro gráfico de " n_i " durante um tempo t grande em relação a T

A teoria dos erros estatísticos aplicada à medição da radioatividade mostra que num 99,7% das observações (ou do tempo no caso do registro) o valor absoluto Δn do desvio de n_i será:

$$\Delta n = [n - n_i] \leq 3\sigma(n) \text{ f/s} \quad (55)$$

sendo:

$$\sigma(n) = \sqrt{\frac{n}{T}} \text{ f/s} \quad (56)$$

o desvio normal de n . Nesta última expressão, T é o tempo de contagem utilizado para calcular os valores de n_i em cada observação.

Como: $\sqrt{n} \cong \sqrt{n_i}$ resultará:

$$\sigma(n) \cong \sqrt{\frac{n_i}{T}} \text{ f/s} \quad (57)$$

sendo n_i o valor medido numa determinação isolada qualquer.

Da expressão 55, em termos práticos:

$$(\Delta n)_{\max} = 3\sigma(n) \text{ f/s} \quad (58)$$

As flutuações estatísticas de n_i serão traduzidas no equipamento e interpretadas pelo observador, como sendo variações da densidade, embora esta última tenha permanecido sempre constante.

A leitura da densidade estará, assim, acompanhada de um erro relativo $\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_\epsilon$. A magnitude desse erro varia estatisticamente e seu valor máximo pode ser calculado substituindo Δn , na equação 47, por $(\Delta n)_{\max}$ da equação 58 obtém-se:

$$\begin{aligned} (\Delta n)_{\max} = 3\sigma(n) &= n_0 \mu \phi \rho \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_{\epsilon \max} \exp(-\mu \phi \rho) \text{ f/s} \\ \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_{\epsilon \max} &= \frac{3\sigma(n) \exp(\mu \phi \rho)}{n_0 \mu \phi \rho} \end{aligned} \quad (59)$$

e da equação 56:

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_{\epsilon \max} = \frac{3 \sqrt{n} \exp(\mu \phi \rho)}{\sqrt{T} n_0 \mu \phi \rho} \quad (60)$$

Finalmente, substituindo o valor de n da equação 45:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{emax}} = \frac{3}{\sqrt{n_0 T \mu\phi\rho}} \exp\left(\frac{\mu\phi\rho}{2}\right) \quad (61)$$

A equação 61 expressa o erro relativo estatístico máximo do sistema em função dos parâmetros que intervêm no processo de medição.

Observa-se que o erro estatístico diminui para valores crescentes do produto $n_0 T$. Dado que é quase sempre indesejável aumentar n_0 ou T , convém investigar se existe algum mínimo da função representada pela equação 61, para um valor particular do produto $\mu\phi\rho$. Derivando com respeito a $(\mu\phi\rho)$ e igualando a zero, obtém-se um mínimo dessa função para:

$$\mu\phi\rho = 2 \quad (62)$$

Portanto, como foi antecipado na Secção 3.4.3.1, a condição de erro estatístico mínimo difere da condição de máxima sensibilidade ($\mu\phi\rho = 1$).

3.4.3.3 – PROJETO DOS EQUIPAMENTOS

A medição contínua é um processo dinâmico onde, ao invés do que acontece nas técnicas de amostragem intermitente, o parâmetro que se deseja medir pode não permanecer constante durante o intervalo requerido para computar seu valor.

Em geral, os equipamentos de medição contínua de densidade por atenuação gama, são projetados para satisfazer, simultaneamente, duas condições:

- 1 – possuir a sensibilidade suficiente para detectar o limite mínimo de variação relativa de densidade que se deseja medir;
- 2 – indicar essa variação dentro de um dado tempo máximo a partir do instante de sua ocorrência.

Esta segunda condição significa que nesse intervalo prefixado de tempo, a mudança na indicação do medidor deve exceder as flutuações estatísticas (ou a imprecisão) da leitura anterior.

O feixe de fótons de intensidade n f/s gera no detector um pequeno sinal elétrico que, uma vez transformado pelo amplificador eletrônico, é habitualmente apresentado, na saída, como uma tensão E de corrente contínua.

Se a resposta do equipamento é linear com respeito a intensidade de fótons detectada, resultará, no equilíbrio, para uma dada densidade ρ_1 :

$$E_1 = K n_1 = K n_0 \exp(-\mu\phi\rho_1) \quad \text{V} \quad (63)$$

onde:

K – constante de proporcionalidade ou eficiência do detector $\left(\frac{\text{V}}{\text{f/s}}\right)$

Suponha-se, agora que no instante t_0 ocorra uma variação brusca de densidade:

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \text{ g/cm}^3$$

Após um intervalo muito maior do que a constante de tempo τ do integrador, o medidor alcançará um novo estado de equilíbrio em que a resposta será:

$$E_2 = E_1 + \Delta E_{1,2} \text{ V} \quad (64)$$

onde:

$$\Delta E_{1,2} = E_2 - E_1 = K\Delta n_{1,2} \text{ V} \quad (65)$$

sendo $\Delta n_{1,2}$ a alteração provocada por $\Delta\rho$ na intensidade do feixe de fótons

Com efeito, denominando Δt ao intervalo $(t - t_0)$ transcorrido desde a origem da mudança instantânea de densidade $\Delta\rho$, a variação de resposta ΔE do medidor em função do tempo ΔE , será:

$$\Delta E = \Delta E_{1,2} [1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau})] \text{ V} \quad (66)$$

A expressão acima mostra que só quando $\Delta t \gg \tau$, a variação de resposta coincidirá com o valor final $\Delta E_{1,2}$ correspondente ao estado de equilíbrio

Portanto, se a mudança $\Delta\rho$ de densidade deve ser indicada com certeza Δt segundos após sua ocorrência, a variação de resposta ΔE nesse instante deverá ser:

$$\Delta E \geq 3\sigma(E_1) + 3\sigma(E) \text{ V} \quad (67)$$

onde, das equações 56 e 63:

$$\sigma(E_1) = K\sigma(n_1) = K \sqrt{\frac{n_1}{T}} = \sqrt{\frac{KE_1}{T}} \quad (68)$$

$$\sigma(E) = K\sigma(n) = K \sqrt{\frac{Kn}{T}} = \sqrt{\frac{KE}{T}} \quad (69)$$

Se, como acontece normalmente, a variação $\Delta\rho$ de densidade que se deseja detectar é muito pequena em relação a ρ_1 , a correspondente variação de resposta $\Delta E_{1,2}$ também resultará pequena face a E_1 e, conseqüentemente:

$$E_1 \cong E$$

$$\sqrt{E_1} \cong \sqrt{E}$$

Portanto: $\sigma(E_1) \cong \sigma(E)$ e a expressão 67 transforma-se em:

$$\Delta E \geq 6\sigma(E_1) = 6K \sqrt{\frac{n_1}{T}} = 6 \sqrt{\frac{KE_1}{T}} \text{ V} \quad (70)$$

Demonstra-se que se τ é a constante de tempo RC do medidor; T vale:

$$T = 2\tau = 2RC \text{ s} \quad (71)$$

Substituindo este valor de T na expressão 70 tem-se para o caso limite:

$$\Delta E = 6K \sqrt{\frac{n_i}{2\tau}} \text{ V} \quad (72)$$

Da equação 66:

$$\Delta E = \Delta E_{1,2} [1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau})] = 6K \sqrt{\frac{n_i}{2\tau}} \text{ V} \quad (73)$$

e pela equação 65:

$$\Delta E = K \Delta n_{1,2} [1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau})] = 6K \sqrt{\frac{n_i}{2\tau}} \text{ V} \quad (74)$$

Da equação 47, sendo $\Delta\rho$ pequeno face a ρ_1 :

$$\Delta n_{1,2} = n_0 \mu \phi \rho_1 \exp(-\mu \phi \rho_1) \frac{\Delta\rho}{\rho_1} = \mu \phi \rho_1 \frac{\Delta\rho}{\rho_1} n_1 \text{ f/s}$$

Substituindo esta expressão na equação 74:

$$\mu \phi \rho_1 \frac{\Delta\rho}{\rho_1} n_1 [1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau})] = 6 \sqrt{\frac{n_i}{2\tau}} \text{ f/s} \quad (75)$$

Fazendo:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_1} = \ell \quad (\text{limite mínimo de variação relativa de densidade})$$

resulta:

$$n_1 = \frac{18}{\tau (\mu \phi \rho_1)^2 [1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau})]^2} \text{ f/s} \quad (76)$$

e, finalmente, como $n_1 = n_0 \exp(-\mu\phi\rho_1)$:

$$n_0 = \frac{18 \exp(\mu\phi\rho_1)}{\tau (\mu\phi\rho_1)^2 [1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau})]^2} \text{ t/s} \quad (77)$$

O valor de n_0 calculado com esta equação determina a atividade que deve possuir a fonte radioisotópica.

Para que esta atividade resulte a mínima compatível com as restrições impostas pela medição dinâmica (ρ_1 , ℓ , e Δt), n_0 também deve ser mínima. Portanto, sempre que seja possível, μ , ϕ e τ serão calculados a partir das equações:

$$\frac{\delta n_0}{\delta(\mu\phi\rho)} = 0 \quad (78)$$

$$\frac{\delta n_0}{\delta\tau} = 0 \quad (79)$$

Assim, as condições ótimas de medição que servirão de base para o projeto dos equipamentos, estarão representadas pelas relações seguintes:

$$\mu\phi\rho_1 = 2 \quad (80)$$

$$\frac{2\Delta t}{\tau} = \frac{1 - \exp(-\Delta t/\tau)}{\exp(-\Delta t/\tau)} \quad (81)$$

Resolvendo por aproximações sucessivas a equação 81 tem-se:

$$\tau = \frac{\Delta t}{1,26} \text{ s} \quad (82)$$

Para ilustrar a aplicação destas fórmulas descreve-se, seguidamente, um exemplo do cálculo e projeto de um detector de interface.

3.4.3.4 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Em um oleoduto de 30 cm de diâmetro interno estão sendo bombeados dois tipos de hidrocarbonetos, um a continuação do outro, em uma vazão Q de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

A espessura da parede ao longo de toda a tubulação é de 1 cm.

Deseja-se projetar um detector de interface para esse oleoduto, utilizando uma fonte de ^{137}Cs e uma câmara de ionização dispostas numa secção transversal da tubulação, segundo o esquema da Figura 8.

O coeficiente de atenuação, determinado experimentalmente para as condições reais de medição, resultou:

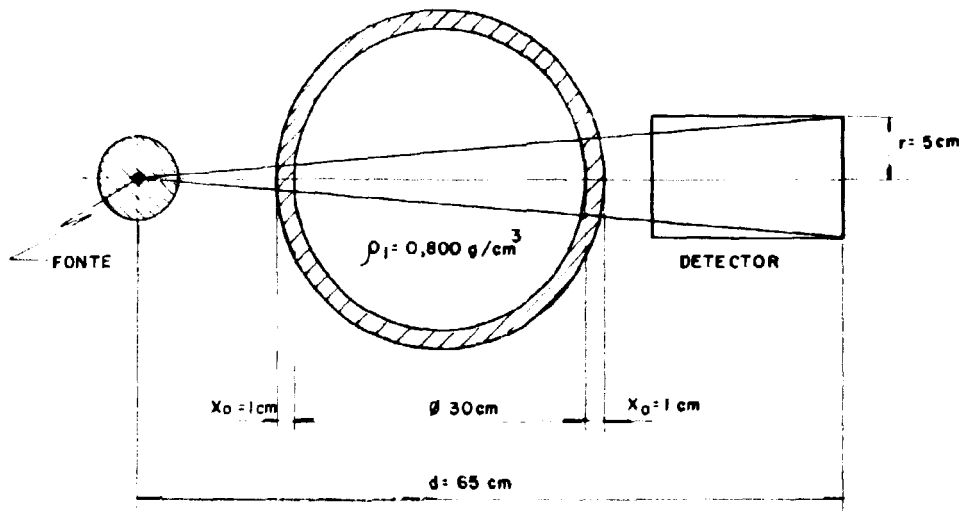


Figura 8 – Disposição geométrica do sistema fonte-detector suposta para o exemplo de seção 3.4.3.4

$$\mu = 0,07 \text{ g/cm}^2$$

Supõe-se que a frente da interface entre os dois hidrocarbonetos está definida por uma variação brusca relativa de densidade:

$$\xi = 0,1\%$$

com respeito à densidade:

$$\rho_1 = 0,800 \text{ g/cm}^3$$

do primeiro

Para que a operação das válvulas na estação receptora possa ser iniciada no instante preciso, o equipamento deve anunciar a chegada da interface 15 segundos antes que sua frente atinja a secção de derivação dos produtos. Por motivos técnicos, o sistema fonte-detector poderá ser instalado, no máximo, a 100 m da secção de derivação.

Nas condições acima supostas serão calculados, com aplicação das fórmulas vistas na Secção 3.4.3.2, os seguintes dados do projeto:

- 1 — tempo máximo Δt (s) em que o equipamento deve discriminar a variação ξ de densidade, após a passagem da frente da interface pela secção de detecção
- 2 — valor ótimo da constante de tempo τ (s) do medidor
- 3 — diâmetro ótimo da tubulação na secção de medição
- 4 — atividade mínima da fonte para a disposição geométrica do sistema fonte-detector representada na Figura 8
- 5 — intensidade I (A) de corrente na câmara de ionização durante a passagem do hidrocarboneto de densidade $\rho_1 = 0,800 \text{ g/cm}^3$, supondo uma eficiência de detecção de 10%

1) Cálculo de Δt

A velocidade média de deslocamento da frente da interface será:

$$v = \frac{Q}{F} \quad \text{m/s}$$

onde:

Q — vazão de bombeamento (m^3/s)

F — secção da tubulação (m^2).

Neste caso:

$$Q = 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,3)^2}{4} = 0,071 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0,3}{0,071} = 4,25 \text{ m/s}$$

Se o medidor é instalado a 100 m da secção de derivação, o tempo de trânsito da frente será:

$$t = \frac{100}{v} = \frac{100}{4,25} = 23,7 \text{ s}$$

Como a chegada da frente à secção de derivação tem de ser anunciada com 15 segundos de antecedência, o tempo disponível para discriminar a variação λ de densidade que caracteriza essa frente será:

$$\Delta t = 23,7 - 15 = 8,7 \text{ s}$$

2 – Cálculo de τ

Da equação 82:

$$\tau = \frac{\Delta t}{1,26} = \frac{8,7}{1,26} = 6,9 \text{ s}$$

3 – Diâmetro ótimo da tubulação na secção de medição

Da equação 80:

$$\phi = \frac{2}{\mu \rho_1} = \frac{2}{0,07 \cdot 0,8} = 35,8 \text{ cm}$$

4 – Cálculo da atividade da fonte

Da equação 77:

$$n_o = \frac{18 \exp(\mu \phi_1 \rho_1)}{r (\lambda \mu \phi_1)^2 [1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau})]^2} \text{ f/s}$$

$$n_o = \frac{18 \cdot \exp(2)}{6,9(0,001 \cdot 2)^2 [1 - \exp(-1,26)]^2} = \frac{18,7,39}{6,9 \cdot 4 \cdot 10^{-6} (1 - 0,284)^2}$$

$$n_o = 9,4 \cdot 10^6 \text{ f/s}$$

Esta é a intensidade do feixe de fótons que atinge o detector após a radiação ter atravessado as paredes do oleoduto. Da equação 42, a intensidade inicial do feixe n'_0 , à saída da fonte, resulta:

$$n'_0 = n_0 \exp(2\mu'_0 x_0) \text{ f/s}$$

O coeficiente total de atenuação linear μ'_0 em ferro, para os fótons de 0,662 MeV emitidos pelo ^{137}Cs , pode ser obtido por meio de gráficos ou de tabelas e vale:

$$\mu'_0 = 0,6 \text{ cm}^{-1}$$

Portanto, como $x_0 = 1$ (espessura da parede da tubulação) resulta:

$$n'_0 = 9,4 \cdot 10^6 \exp(2,0,6) = 9,4 \cdot 10^6 \cdot 3,32 = 3,12 \cdot 10^7 \text{ f/s}$$

Posto que n'_0 representa apenas a radiação emitida dentro do ângulo sólido Ω abrangido pelo detector, a intensidade total de fótons n_t correspondente a uma geometria 4π será:

$$n_t = \frac{n'_0}{\Omega} \cdot 4\pi \text{ f/s}$$

Para a configuração mostrada na Figura 8, tratando-se de uma câmara cilíndrica de ionização, de raio $r = 5$ cm à distância $d = 65$ cm da fonte Ω , resultará, aproximadamente:

$$\Omega = \frac{\pi r^2}{d^2} = \frac{\pi \cdot 5^2}{65^2} = 1,86 \cdot 10^{-2} \text{ "estereo-radian"}$$

Portanto:

$$n_t = \frac{9,4 \cdot 10^6}{1,86 \cdot 10^{-2}} \cdot 4\pi = 6,35 \cdot 10^9 \text{ f/s}$$

Desde que 1 Ci de ^{137}Cs emite $3,7 \cdot 10^{10}$ fótons por segundo, a atividade A correspondente a n_t , será:

$$A = \frac{n_t}{3,7 \cdot 10^{10}} = \frac{6,35 \cdot 10^9}{3,7 \cdot 10^{10}} \cong 0,172 \text{ Ci}$$

Este valor é a atividade mínima que deve possuir a fonte de ^{137}Cs para satisfazer as condições de detecção estabelecidas.

5 - Cálculo da intensidade de corrente

Durante a passagem do hidrocarboneto de densidade $\rho = 0,800 \text{ g/cm}^3$, o número de fótons que ingressa na câmara de ionização será:

$$n = n_0 \exp(-\mu \rho x) = 9,4 \cdot 10^6 \exp(-2) = 1,27 \cdot 10^6 \text{ f/s}$$

Teoricamente, por cada fóton que entra na câmara e gerada a seguinte quantidade de pares de íons (p.i)

$$n_{p.i} = 0,662 \frac{\text{MeV}}{\text{fóton}} \cdot 10^6 \frac{\text{eV}}{\text{MeV}} \cdot \frac{1(p.i)}{34\text{eV}} \approx 1,95 \cdot 10^4 \frac{(p.i)}{\text{fóton}}$$

A carga elétrica do mesmo sinal correspondente a este número de pares de íons vale

$$q = 1,95 \cdot 10^4 \frac{(p.i)}{\text{fóton}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{coulomb}}{(p.i)} = 3,12 \cdot 10^{-15} \frac{\text{coulomb}}{\text{fótons}}$$

Portanto, teoricamente a corrente elétrica para os n fótons por segundo resulta:

$$n \cdot q = 1,27 \cdot 10^6 \frac{\text{fóton}}{\text{s}} \cdot 3,12 \cdot 10^{-15} \frac{\text{coulomb}}{\text{fóton}} = 3,96 \cdot 10^{-9} \text{ Ampere}$$

Na prática, se apenas 10% da energia dos fótons é aproveitada para a produção de pares de íons na câmara, a corrente I de ionização realmente gerada será:

$$I = 0,10 n \cdot q = 3,96 \cdot 10^{-10} \text{ A}$$

Este dado serve para o projeto do pico amperímetro que será associado com a câmara de ionização

ABSTRACT

The fundamentals and the methodology of the principal radioisotope techniques used in the construction and operation of oil-pipes are described

These techniques deal with gamma radiography of welds, scraper tracking, leak localization in underground pipes and interface detection

The practical use of the mathematical formulae deduced during the theoretical treatment of each method is illustrated through several examples of application

Finally, a proceeding for the design of an interface detector based on gamma ray attenuation is presented

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BALL, A M. *Liquid leak measurement* Wantage, Berks, AERE, Isotope Research Div., Feb 1964 (Radioisotopes review sheets, C7).
2. CASTAGNET, A C et alii. Perfilagens com fluxo estacionário de neutrons; influencia da natureza das formações. In: _____ Aplicação de radioisótopos nas indústrias do petróleo, gás, e petroquímica; perfilagem de poços petrolíferos 2 Perfilagens neutrônicas São Paulo, Instituto de Energia Atômica, ago. 1974 p. 50-3, (IEA-INF 30)
3. COMĂNESCU, V et alii. Developpement récent de l'utilisation des traceurs radioactifs dans l'industrie romaine du pétrole. In: INTERNATIONAL ATOMIC AGENCY, Vienna *Radioisotope tracers in industry and geophysics: proceedings of the symposium in Prague, 21-25 November 1966* Vienna, 1967 p. 187-204
4. GARDNER, R P & ELY JR, R L. Leak detection In: _____ Radioisotope measurement applications in engineering New York, Reinhold, 1967. p. 182-3

5. GOMÉZ, H. R. Técnica expeditiva para conocer proximadamente el caudal que fluye por la pérdida. In: BARO, G. B. et alii. *Aplicación de radioisótopos en la industria del petróleo*. Buenos Aires, Comisión Nacional de Energía Atómica, jul. 1968. Cap. 5, sec. 2, p. 19-20.
6. HULL, K. Radioactive tracers to mark interfaces and measure intermingling in pipe-lines. *Ind. Engng Chem.*, Washington, D. C. 44(11)2745, 1952.
7. SANCHEZ, W. *Ensaio não destrutivo pela técnica dos raios x e raios gama*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica ago. 1974. (IEA-INF-29).
8. SZULAK, C. et alii. *Técnica para o acompanhamento e localização de raspadores ("scrapers") em tubulações subterrâneas profundas, utilizando fontes encapsuladas de ^{24}Na* . São Paulo, Instituto de Energia Atômica, abr. 1974 (IEA-331).
9. VIGLIOGLIA, M. A. *Onda de contagem submetida à demora de primeira ordem (Simulação analógica)*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, feb. 1975. (IEA-384).

