

### 3 CONCEITOS BÁSICOS

Há mais de cinquenta anos, pesquisas em pigs instrumentados vêm sendo realizadas internacionalmente. Diversas teorias surgiram e inúmeras patentes foram depositadas na área. As técnicas básicas e os fundamentos físicos fundamentais já são bem conhecidos, as maiores dificuldades se encontram na implementação prática.

Com o objetivo de termos um primeiro embasamento teórico para o início do nosso desenvolvimento procuramos conhecer os métodos mais eficientes em pigs detectores de vazamento. Uma boa referência nesta primeira busca é a pesquisa na literatura realizada pela Gerência de Informação do Centro de Pesquisa da Petrobras nº 2002/078, buscando levantar as patentes internacionais depositadas na área de pigs para detecção de vazamentos. A seguir estão alguns detalhes da pesquisa:

*Título da pesquisa:* levantamento completo de toda informação sobre pigs detectores de vazamento existentes no mundo.

*Termos Chave:* pig, detecção de vazamento, acústica, ultra-som, gasoduto, sensores acústicos, pig instrumentado.

*Referências conhecidas:* Empresas que prestam serviço com pigs, como PII, RTD, Tuboscope.

*Profundidade da Busca:* Levantamento Exaustivo

*Tipo de Material:* Artigo, livro, Patente e REPOR

*Caráter da Pesquisa:* Ostensiva

*Extensão Cronológica:* Sem restrição

*Idiomas:* Incluir itens nos seguintes idiomas: Português, Inglês e Espanhol.

*Resultados:* foram encontradas 97 referências na base de dados “Petroleum Abstracts”, 46 na “API Literature”, 25 em “API Patents”.

Estudando os resultados encontrados, identificamos três principais métodos de detecção e localização de vazamentos por pigs com potencial de aplicação prática. O primeiro e mais simples deles é o que chamamos de “Localização por Busca Binária com Pig Plug” que será brevemente descrito no

item a seguir. Os outros dois foram os escolhidos para serem desenvolvidos e aprimorados nesta dissertação. Um deles foi utilizado para aplicações em oleodutos e utiliza o registro das variações de pressão ao longo do duto. Já o outro, aplicado a gasodutos, utiliza o registro da variação de energia acústica ao longo do duto. Os conceitos, as patentes relacionadas e os desenvolvimentos de cada um deles serão apresentados separadamente nos próximos capítulos.

### **3.1. LOCALIZAÇÃO POR BUSCA BINÁRIA COM “PIG PLUG”**

Apesar deste método não ter sido desenvolvido nesta dissertação, consideramos válido citá-lo, pois é particularmente interessante para casos em que o vazamento só ocorre durante os testes hidrostáticos.

Os dutos geralmente são fabricados em pequenos segmentos entre 6 e 12 metros. No processo de montagem e instalação eles são transportados para o campo e soldados uns nos outros formando extensos trechos. Estes longos trechos passam por testes hidrostáticos durante sua montagem para verificação de estanqueidade. Neste teste, o duto é fechado em suas extremidades, cheio com água, e pressurizado internamente. Após a pressurização completa da linha, a pressão é monitorada durante um tempo pré-determinado e caso haja algum vazamento o nível de pressão diminui.

Quando ocorrem pequenos vazamentos nestes casos, a inspeção visual é muito difícil, pois a quantidade de produto vazada é pequena, a linha é extensa e às vezes está enterrada.

O método de localização com o “pig plug” consiste em realizar o teste hidrostático com o pig posicionado no meio do duto. O pig é equipado com copos de alto poder de vedação, sensores de pressão nas suas extremidades e um transmissor. Durante a depressurização, o pig isola as duas metades da linha e monitora a pressão em cada uma delas através dos sensores. Através do transmissor, o pig envia sinais para fora do duto informando a diferença de pressão entre as suas extremidades. O trecho que apresentar queda de pressão é aquele que apresenta o vazamento. Com esta informação, a localização da posição do vazamento é realizada de forma binária, com o deslocamento do pig para os trechos com perda de pressão e a repetição do teste.

Conceitualmente este método é bem simples. A medição de diferencial de pressão estática não apresenta grandes dificuldades e atende aos casos particulares de vazamentos que só ocorrem durante o teste hidrostático. O pig

trabalhando parado além de possibilitar a transmissão de dados, evita o surgimento de sinais não provenientes de vazamentos que normalmente acontecem quando ele se desloca pelo interior do duto.

As desvantagens estão no longo tempo de duração do processo de busca binária, na necessidade de se interromper o bombeamento da linha e na dificuldade de se encontrar o pig através do transmissor. O processo de busca binária requer sucessivas operações de pressurização e de bombeamento do pig para a posição desejada. A interrupção do bombeamento da linha gera prejuízos na produção e operações que envolvem toda a estação. A localização do pig pelo transmissor pode levar tempo e em casos de dutos enterrados em grandes profundidades o sinal do transmissor não é forte o suficiente, inviabilizando o processo.

Esta tecnologia é apresentada em algumas patentes americanas [8]. A figura 1, retirada de uma das patentes, apresenta um esquema de um duto em teste hidrostático sendo inspecionado com o pig plug, o item 38 ilustra o receptor do sinal do pig.

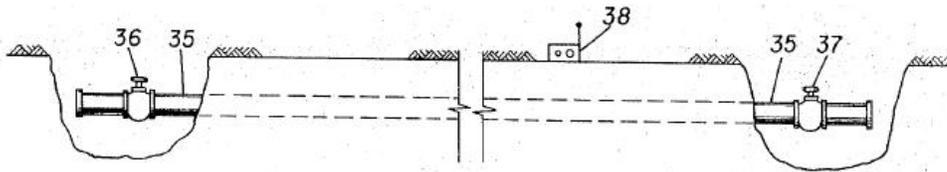


Figura 1 – Esquema ilustrativo de um duto em teste hidrostático.

### 3.2. SOLUÇÃO PARA OLEODUTOS

A tecnologia de pigs detectores de vazamentos em dutos pode ser separada em duas, uma para detecção em oleodutos, e outra para gasodutos. Um dos princípios de funcionamento do pig para oleodutos é baseado em variações de pressão, já para gasodutos pode ser baseado na propagação de energia acústica. Neste item vamos discutir o princípio de funcionamento do pig para oleodutos.

A idéia principal é localizar o vazamento através da queda de pressão que o vazamento gera dentro do duto. A alta incompressibilidade do óleo é uma propriedade que nos incentiva a utilizar esta técnica, pois sua despressurização é grande e rápida para pequenas perdas de produto.

A amplitude da queda de pressão está diretamente associada à relação entre o volume estanque e o volume vazado. Quanto menor a diferença entre os volumes maior é a queda de pressão.

No caso de oleodutos a queda de pressão na seção de um vazamento é baixa, pois o volume vazado é muito menor que o volume total do duto. Por isto a detecção de vazamentos por sensores de pressão instalados ao longo do duto só é eficiente para grandes vazamentos, quando o volume vazado se compara ao volume bombeado.

Para vazamentos pequenos, a solução seria diminuir o volume estanque, de forma a termos uma boa relação com o volume vazado. Com o objetivo de criar esta região de volume estanque no trecho do vazamento, foi projetado o pig detector de vazamentos.

Os copos de propulsão do pig são especiais com grande poder de vedação e criam entre eles uma região com produto bem confinado. Esta região intermediária é chamada de “volume de teste”. O funcionamento do pig baseia-se no registro da queda de pressão do volume de teste quando em contato com o vazamento. O esquema a seguir apresenta uma visualização geral do pig.

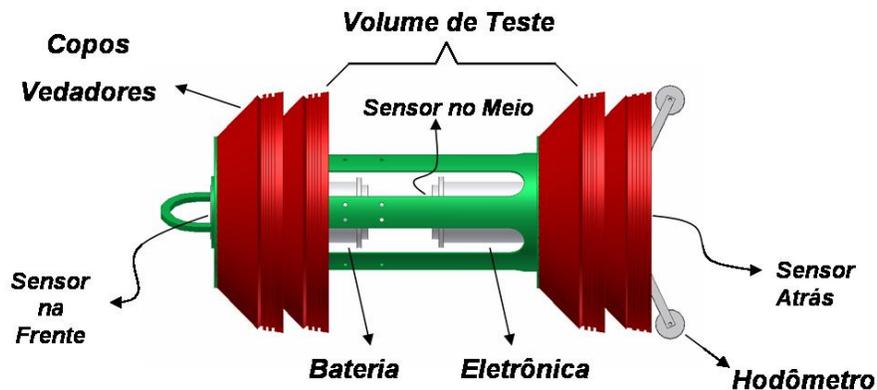


Figura 2 – Esquema geral do pig detector de vazamentos em oleodutos.

Através do registro da distância percorrida e do perfil de pressão, temos a posição precisa do vazamento no duto.

Os aspectos relevantes para permitirem a detecção do vazamento são: a capacidade dos copos vedadores manterem o volume de teste sem o influxo de produto pelas extremidades do pig, a sensibilidade dos sensores e o tempo de despressurização do volume de teste associado à velocidade do pig.

O pig apresenta 3 sensores de pressão, o sensor P1 , localizado na frente, o sensor P2 no meio e o P3 atrás. O sensor do meio monitora a pressão do volume de teste e os das extremidades servem como referência.

Em regiões sem vazamentos, deve ocorrer um gradiente de pressão crescente de P1 a P3, proveniente do diferencial de pressão responsável pelo deslocamento do pig. Em regiões com vazamento, P2 deve cair bruscamente e depois se re-estabelecer lentamente. As figuras 3 e 4 apresentam os gráficos esquemáticos esperados dos sinais nas condições sem e com vazamento:

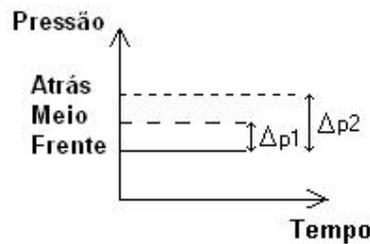


Figura 3 - Gráfico esquemático dos níveis de pressão na condição sem vazamento.

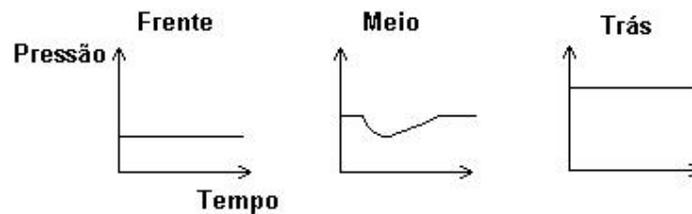


Figura 4 - Gráficos esquemáticos dos níveis de pressão na condição com vazamento.

O pig é equipado com hodômetros que medem a distância percorrida com resolução de centímetros. Em posse das informações geradas pelos hodômetros e pelos sensores é possível indicar a posição do vazamento com precisão de 1 a 2 metros.

Esta técnica é citada em algumas patentes que apresentam diferentes tipos de montagens explorando o mesmo princípio de funcionamento [9].

### 3.3. SOLUÇÃO PARA GASODUTOS

O princípio de funcionamento do pig apresentado no item anterior funciona bem em oleodutos, porém não é recomendado para gasodutos. Diversos são os fatores que dificultam e podem até inviabilizar seu uso. Primeiro que devido à baixa densidade dos gases, o processo de despressurização do volume de teste seria bem mais lento e isso prejudicaria a amplitude e qualidade do sinal característico de vazamento.

Outro fator complicador é o uso de copos vedadores que prejudicam o processo de deslocamento do pig dentro do gasoduto. O diferencial de pressão causado pelos copos torna o deslocamento do pig muito irregular e ele atinge acelerações e velocidades elevadas. Quando a força gerada pela pressurização se torna maior que a força de atrito do duto sobre o pig, este dispara em alta velocidade e vai lentamente perdendo velocidade até parar novamente.

Este processo de disparada se repete várias vezes durante seu deslocamento danificando o pig com os impactos e vibrações decorrentes. Além disso, em altas velocidades o desempenho do pig é prejudicado, pois o tempo de contato com o vazamento é pequeno impossibilitando uma despressurização significativa do volume de teste.

Diante destes fatores complicadores, foi escolhida uma tecnologia alternativa à do registro da queda de pressão, para ser usada em gasodutos: a do registro da energia acústica emitida por um vazamento.

De maneira geral, existem diferentes formas de se usar a energia acústica para detectar e localizar vazamentos. Dois principais fenômenos são geralmente utilizados: a repentina e instantânea onda de impacto sonora gerada no exato momento em que a parede do duto se rompe; e o contínuo ruído gerado durante o vazamento do fluido pelo orifício. A detecção acústica com pig faz uso desta última, a energia sonora associada ao escapamento de gás altamente pressurizado através da ruptura no duto.

A idéia básica é a de equipar o pig com um microfone especial capaz de “escutar” o som propagado no gás gerado pelo vazamento. Com uma boa interpretação da assinatura acústica deste fenômeno, é possível detectar o vazamento ao longo do duto. O desafio é discriminar a assinatura do vazamento dos ruídos normalmente emitidos em um gasoduto, como ruído de bombeio, ruído da turbulência da vazão, abertura e fechamento de válvulas, etc.

Outro fator que complica essa identificação é o ruído gerado pelo próprio pig ao se deslocar pelo duto. Os copos de poliuretano dos pigs convencionais se arrastam em contato com o duto e ao se deslocarem criam ruídos diversos e com grande amplitude. Esses ruídos são tão altos que podemos escutar o pig passando ao andarmos sobre a faixa do duto.

Uma adaptação que minimiza este problema é utilizar um pig de espuma como corpo do nosso pig acústico. Os pigs de espuma são mais silenciosos que os montados com copos ou discos de poliuretano. O ruído provocado pelo arraste do pig é de menor intensidade o que facilita a detecção do vazamento.

Outra propriedade do pig espuma que vamos explorar é sua capacidade de isolamento acústico. Como sabemos, as espumas são ótimos isolantes acústicos, principalmente para altas frequências. Por exemplo, elas são bastante utilizadas para a fabricação de protetores auditivos e isolamentos de ambientes ruidosos.

O esquema de montagem do pig é apresentado abaixo:

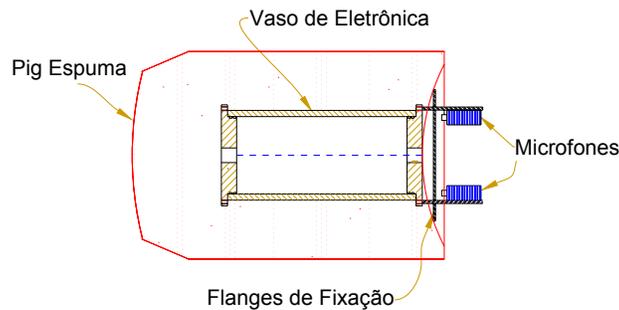


Figura 5 – Esquema de montagem do Pig Acústico.

O projeto de montagem prevê a instrumentação de um pig espuma de limpeza comum, com o vaso de eletrônica e os microfones. O gráfico a seguir apresenta a variação de energia acústica esperada no ponto do vazamento.

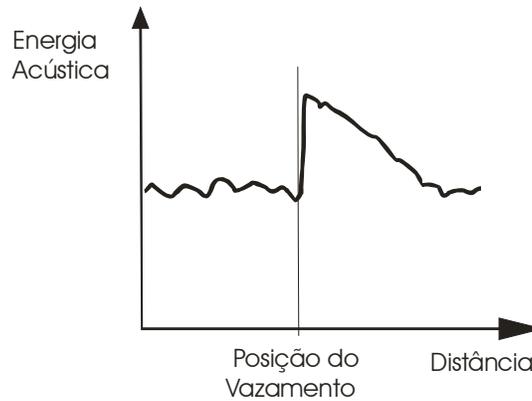


Figura 6 – Sinal esperado para o vazamento.

Como os microfones estão instalados na parte traseira do pig e a espuma é um isolante acústico, os microfones só detectam o som do vazamento quando este estiver atrás do pig. Portanto, assim que o pig ultrapassar o vazamento teremos um sinal de grande amplitude acústica que irá diminuindo conforme o pig se distancia do vazamento.

Diferentes técnicas envolvendo o uso de microfones e de materiais de absorção acústica em pigs instrumentados já foram temas de algumas patentes [10].

### 3.3.1. ESTUDO DO SOM DO VAZAMENTO

Na literatura encontramos diversos trabalhos envolvendo o estudo da assinatura acústica de vazamentos em gasodutos. Muitos discutem o desenvolvimento de softwares e algoritmos para identificar o vazamento em meio aos sinais normais da linha. Os algoritmos normalmente são baseados em técnicas estatísticas [11], de reconhecimento de padrões [12], modelos de dinâmica dos fluidos [13] ou uma combinação destes [13,14].

A maioria dos trabalhos que estudam a física do vazamento se concentra no som propagado na parede do duto enfatizando a sua atenuação ao se propagar pelo duto. Isto se deve ao fato de que o objetivo destes trabalhos é o desenvolvimento de sistemas de detecção de vazamentos que utilizam sensores acústicos fixos ao longo do duto. Os resultados e conclusões mais interessantes são apresentados a seguir.

Em 1989, Rocha publicou seu trabalho [15] onde demonstra que apesar do sinal do vazamento emitir sinais em um largo espectro de frequência,

somente as componentes de baixa frequência são úteis na detecção em pontos distantes da fonte. Rocha afirma que sinais acústicos em torno de 10Hz podem se propagar no gás por distâncias da ordem de 150 km e apresenta a seguinte aproximação: a amplitude da onda é relacionada às propriedades do gás, a pressão de operação do duto e o tamanho do furo. A queda de pressão local devido ao vazamento para um duto sem fluxo de produto é dada por:

$$\Delta p = 0,3 P_s (D_1/D_p)^2$$

Onde:  $\Delta p$  é o sinal acústico,  $P_s$  é a pressão estática da linha no ponto do vazamento,  $D_1$  é o diâmetro do furo,  $D_p$  é o diâmetro do duto.

O gráfico a seguir apresenta o cálculo de  $\Delta p$  para um duto com pressão interna de 1000 psi e diâmetro de 16 polegadas.

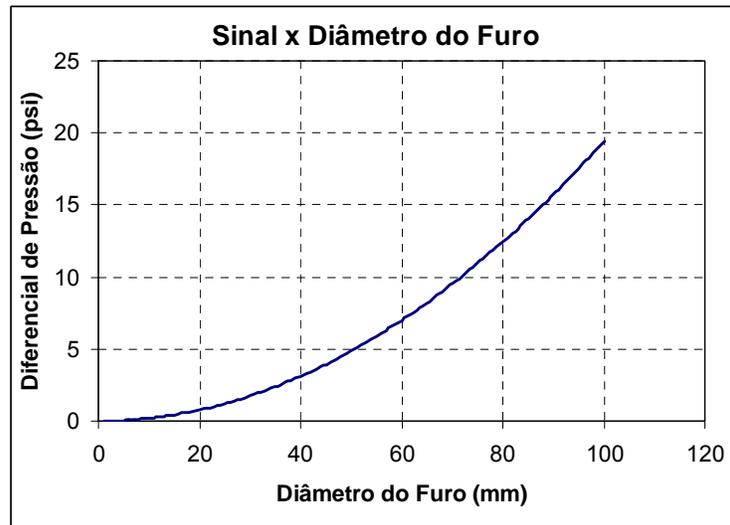


Figura 7 – Relação Sinal e Diâmetro do furo.

Observando o gráfico verificamos que o sinal de queda de pressão é relativamente baixo em relação à de operação do duto e para furos com diâmetro de 100 mm chega somente a 2%. Para furos menores que 10mm o sinal é muito pequeno e facilmente se confunde com os ruídos da linha.

Igal Brodestky e Michael Savic publicaram um trabalho descrevendo os resultados de simulações de vazamentos para a determinação das características do seu som [16]. Como o som de um vazamento é gerado pela turbulência causada pela diferença de pressão entre o gás e o ambiente, eles modelaram esta turbulência como um processo de ruído branco.

O simulador foi construído em um setor de um gasoduto enterrado com uma válvula onde furos de diferentes formas e tamanhos eram acoplados. O simulador foi pressurizado com gás nitrogênio na pressão do gasoduto, a válvula era aberta permitindo o vazamento do gás e o seu som foi gravado. Eles citam que McMaster [17] sugeriu que a máxima frequência gerada por estes tipos de vazamento está abaixo de 100kHz. Assim a taxa de amostragem utilizada foi de 202,8 kHz para cobrir esta banda.

As frequências aquisitadas dos vazamentos foram abaixo de 50kHz. Esta frequência máxima decrescia com a distância. Concluiu-se que a faixa de frequências úteis na detecção de vazamento está abaixo de 20kHz. O menor vazamento simulado foi de 0.8mm sendo detectado a uma distância máxima de 200 metros.

Em 1995, Kovecevic estudou o sistema acústico de detecção de vazamentos em dutos altamente pressurizados em usinas industriais [18]. O sistema utiliza o método de detectar o som contínuo gerado pela turbulência do gás pressurizado vazando. O som se propaga em três meios diferentes, no gás interno ao duto, na parede do duto e no ar externo. Sensores de pressão dinâmica são instalados tanto no fluido interno quanto na parede do duto. Os vazamentos podem ser detectados até 35 metros de distância e a faixa de frequências úteis na detecção é de 2-20kHz para o som propagado no duto e de 2-15kHz para o som propagado no gás.