

Daniel Almeida Camerini

**Desenvolvimento de Pigs
Instrumentados para Detecção
e Localização de Pequenos
Vazamentos em Dutos**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Mecânica

Rio de Janeiro, setembro de 2004



Daniel Almeida Camerini

**Desenvolvimento de Pigs Instrumentados para Detecção e
Localização de Pequenos Vazamentos em Dutos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientadores: Arthur Martins Braga (PUC-RIO)
Co-orientador: Cláudio Soligo Camerini (PETROBRAS)

**Rio de Janeiro
Setembro de 2004**



Daniel Almeida Camerini

Desenvolvimento de Pigs Instrumentados para Detecção e Localização de Pequenos Vazamentos em Dutos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Arthur Martins Braga
Orientador
PUC-Rio

Jean Pierre von der Weid
PUC-Rio

José Augusto Pereira da Silva
PUC-Rio

Luis Fernando A. Azevedo
PUC-Rio

José Eugênio Leal
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de setembro de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Daniel Almeida Camerini

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2001. Atuou como estagiário a pesquisador do Projeto PIG Instrumentado, parceria entre o CETUC/PUC-Rio e o CENPES/PETROBRAS, de 1998 a 2003. E neste período colaborou ativamente no desenvolvimento de instrumentação em magnetismo, pressão, vibração, temperatura, principalmente na área de detecção de vazamentos.

Ficha Catalográfica

Camerini, Daniel Almeida

Desenvolvimento de pigs para detecção e localização de pequenos vazamentos em dutos / Daniel Almeida Camerini ; orientador: Arthur Martins Braga ; co-orientador: Cláudio Soligo Camerini. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

85 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica .

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Detecção de vazamento. 3. Pig instrumentado. 4. Inspeção. 5. Acústica. 6. Pressão. 7. Oleodutos. 8. Gasodutos. 9. Automação. 10. Petróleo. I. Braga, Arthur Martins. II. Camerini, Cláudio Soligo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Aos meus pais.

Agradecimentos

Ao meu orientador, co-orientador e integrantes de banca, que me deram esta oportunidade e me incentivaram a realizar esse trabalho.

À equipe de inspeção e operação da Transpetro, por tornar possível o teste de campo no Gasbel: Eliezer Ferreira Curvelo, Fernando Enes.

Ao Rodrigo Carvalho Ferreira, pelos desenhos de fabricação e auxílio no teste de campo do Gasbel.

Ao Paulo Cunha da Empresa Hidropig, pela fabricação do pig espuma especial.

À equipe de Inspeção de Pigs Instrumentados do Cenpes: Carlos E. Maia, Carlos Oliveira, Guttemberg Coelho, Marcos.

À equipe do Laboratório de Instrumentação do CETUC, pelo auxílio na montagem e teste das eletrônicas embarcadas: Miguel Freitas, Luiz Domingos, Rodrigo Carvalho Ferreira, Felipe Oliveira, Rafael Honório, Luciana Ramos, Thiago Salcedo, Amália Cappati, Felipe Maimon, Sérgio Paes, Felipe dos Santos Bezerra, André Alves de Souza, Vinícius de Carvalho Lima, Bruno Guedes.

À equipe do Laboratório de Transdutores do Departamento de Mecânica, pelo auxílio nos testes de laboratório: Carla Kato, Vinícius, Morikawa, Alexandre, Robert, Rogério Regazzi, Bruno Sapha.

Resumo

Camerini, Daniel. **Desenvolvimento de Pigs Instrumentados para Detecção e Localização de Pequenos Vazamentos em Dutos**. Rio de Janeiro, 2004. 85p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de ferramentas de inspeção capazes de detectar e localizar pequenos vazamentos em oleodutos e gasodutos. Hoje, diversos dutos brasileiros são equipados com eficientes sistemas de detecção de vazamentos, porém ainda não são capazes de detectar pequenos vazamentos causados por lentos processos de corrosão. A tecnologia de inspeção de dutos mais utilizada mundialmente é a de pigs instrumentados. O pig é lançado dentro do duto e percorre toda sua extensão identificando defeitos como amassamentos e corrosão. Duas tecnologias foram desenvolvidas, uma para oleodutos e outra para gasodutos. O princípio de funcionamento do pig para oleodutos se baseia no registro da variação de pressão gerada pelo vazamento. Quando o pig passa pelo vazamento, a pressão do volume central diminui em relação às pressões à montante e jusante do pig, gerando um sinal característico que permite a identificação. A tecnologia para gasodutos utiliza a energia acústica gerada pelo vazamento. A idéia básica é equipar o pig com microfones capazes de “escutar” o som provocado pelo vazamento propagado no próprio gás. Com uma boa interpretação da assinatura acústica deste fenômeno, é possível detectar o evento 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. Cada tecnologia teve seu protótipo montado e testado em campo onde vazamentos foram detectados com sucesso. São apresentadas as fundamentações teóricas de cada tecnologia e os resultados dos testes de laboratório e de campo assim como propostas futuras.

Palavras-chave

Detecção de vazamento, pig instrumentado, inspeção, acústica, pressão, oleodutos, gasodutos, automação, petróleo.

Abstract

Camerini, Daniel. **Development of Pigs to Detect and Locate Small Pipelines Leaks**. Rio de Janeiro, 2004. 85p. Master Degree Thesis - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work's objective is the development of inspections tools capable to detect and locate small leaks in gas and oil pipelines. Nowadays, many brazilian pipelines are equipped with reliable leak detection systems, but these still can't detect small leaks caused by slow corrosion processes. The most used pipeline inspection technology is the instrumented pigs. The pig is launched inside the pipeline and goes through it detecting dents and corrosions. Two technologies were developed, one for oil pipelines and other for gas pipelines. The pig oil pipeline working principle is based on the register of the pressure variation caused by a leakage. When the pig pass by a leak, the pressure in the middle of the pig drops, generating a characteristic signal. The gas pipeline technology uses the acoustic energy caused by a gas leaks. The main idea is to equip the pig with specials microphones capable to listen the leak sound propagated in the gas. With a good acoustic interpretation of this phenomenon, is possible to detect this event. The biggest challenge is to discriminate the leak signature from the others pipe's noises. Which technology had it prototype manufactured and tested in real oil and gas pipelines with success. Will be shown the theory of which technology, the labs and fields tests results and future proposals.

Keywords

Leak detection, instrumented pig, pipeline inspection, acoustic, pressure, oil, gas, automation.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
2 SISTEMAS DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS	15
2.1. Inspeção Humana	15
2.2. Monitoração de Emissões Químicas	15
2.3. Fibras Óticas e Integridade de Revestimentos Condutores	16
2.4. Sistemas de Detecção de Vazamentos com Controle Supervisório de Aquisição de Dados (SCADA)	16
2.5. Sistemas Acústicos de Detecção de Vazamentos	18
2.6. Pigs Instrumentados	19
3 CONCEITOS BÁSICOS	21
3.1. Localização por Busca Binária com “Pig Plug”	22
3.2. Solução para Oleodutos	23
3.3. Solução para Gasodutos	26
3.3.1. Estudo do Som do Vazamento	28
4 TRABALHO EXPERIMENTAL	31
4.1. Oleoduto	31
4.1.1. Teste da Eletrônica e Sensores em Laboratório	31
4.1.2. Teste do Primeiro Protótipo	35
4.2. Gasodutos	40
4.2.1. Montagem do Aparato Experimental	40
4.2.2. Testes com Sensores de Emissão Acústica	43
4.2.3. Desenvolvimento de Transdutor Ultra-Sônico	44
4.2.4. Resposta em Frequência dos Microfones	52
4.2.5. Sinal do Vazamento Obtido em Laboratório	57
4.3. Montagem do Primeiro Protótipo	68
4.4. Teste de Campo	70
4.4.1. Resultados	71

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	79
5.1. Oleodutos	79
5.2. Gasodutos	80
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

Lista de figuras

Figura 1 – Esquema ilustrativo de um duto em teste hidrostático.	23
Figura 2 – Esquema geral do pig detector de vazamentos em oleodutos.	24
Figura 3 – Gráfico esquemático dos níveis de pressão na condição sem vazamento.	25
Figura 4 – Gráficos esquemáticos dos níveis de pressão na condição com vazamento.	25
Figura 5 – Esquema de montagem do Pig Acústico.	27
Figura 6 – Sinal esperado para o vazamento.	28
Figura 7 – Relação Sinal e Diâmetro do furo.	29
Figura 8 – Esquema do sistema hidráulico com pressão variável.	32
Figura 9 – Sistema hidráulico com pressão variável.	33
Figura 10 – Curvas de calibração dos sensores de pressão.	33
Figura 11 – Esquema do circuito amplificador.	34
Figura 12 – Sinais adquiridos para variações de 2 psi.	35
Figura 13 – Protótipo do Pig Detector de Vazamentos para Dutos de 14”.	35
Figura 14 – Copos Vedadores.	36
Figura 15 – Loop de testes para pigs do DTSE.	36
Figura 16 – Dreno instalado para simulação do vazamento.	36
Figura 17 – Líquido sendo coletado para medição de vazão.	37
Figura 18 – Vazamento com furo de 1mm de diâmetro.	37
Figura 19 – Níveis de pressão para o vazamento de 6mm.	38
Figura 20 – Níveis de pressão para o vazamento de 3mm.	38
Figura 21 – Níveis de pressão para o vazamento de 1mm.	39
Figura 22 – Variação das pressões em 20m de duto e os sinais das soldas.	40
Figura 23 – Esquema do aparato experimental para simulação de vazamentos.	41
Figura 24 – Foto do vaso adaptado para operar com pressão interna de 1000 psi.	42
Figuras 25 e 26 – Gaiola de proteção e cilindros de nitrogênio.	42
Figuras 27 e 28 – Desenho e foto do encapsulamento do sensor.	43
Figuras 29 e 30 – Desenho e foto dos discos de suporte em poliuretano.	43
Figura 31 – Encapsulamento instalado dentro do vaso de pressão.	44

Figura 32 - Foto da membrana com o elemento sensor colado.	45
Figura 33 – Desenho de fabricação da membrana.	45
Figura 34 e 35 – Visões do microfone com disco piezoelétrico montado.	46
Figura 36 e 37 – Microfone piezoelétrico desmontado.	47
Figura 38 – Esquema de montagem do transdutor.	48
Figura 39 – Resposta em frequência do microfone fornecida pelo fabricante de PVDF.	50
Figura 40 – Relação entre o raio de curvatura com a frequência de corte e com a SPL.	50
Figura 41 – Relação da SPL com o comprimento e largura do transdutor.	51
Figuras 42 e 43 – Membrana de PVDF e Suporte do Transdutor.	52
Figura 44 – Microfone PVDF montado.	52
Figura 45 – A relação da função transferência do microfone com o sinal original.	53
Figura 46 – Resposta do microfones para ruído branco.	54
Figura 47– Disposição dos sensores.	54
Figura 48 – Disposição dos sensores.	55
Figura 49 – Resposta em frequência do microfone PVDF para um sinal de 90kHz.	55
Figura 50 –Resposta ao ruído branco gerado pelo sensor PVDF.	56
Figura 51 – Gráfico da resposta em frequência do microfone PVDF.	57
Figura 52 – Circuito condicionador do sinal.	58
Figura 53 – Vazamento com furo de 5mm.	58
Figura 54– Vazamento com furo de 1.5mm.	58
Figura 55 – Vazamento com furo de 0.8mm.	59
Figura 56– Relação Sinal-Ruído x diâmetro do furo.	59
Figura 57– Sinal do Vazamento de 5mm, sensor PVDF.	60
Figura 58 – FFT dos sinais com e sem vazamento sensor Piezo	61
Figura 59– FFT do sinal com e sem vazamento, sensor PVDF.	61
Figura 60 – Comparação do sinal do vazamento com o ruído branco, sensor piezo.	62
Figura 61 – Comparação do sinal do vazamento com o ruído branco, sensor PVDF.	63
Figura 62 - Espectrograma do vazamento de 5mm.	64
Figura 63 – Espectrograma do Vazamento de 1.5mm	64
Figura 64 – Espectrograma do Vazamento de 0.8mm.	65

Figura 65– Comparação do som interno com o som externo ao vaso.	65
Figura 66– Sinal do som interno do vazamento durante a pressurização do vaso.	66
Figura 67 – Espectrograma do Sinal do Som Externo do Vazamento de 5mm.	67
Figura 68 - Espectrograma do Sinal do Som Externo do Vazamento de 0.8mm.	67
Figura 69– Esquema da montagem do protótipo.	68
Figura 70– Pig espuma especial.	68
Figuras 71 e 72 - Visões traseira do pig com o vaso embutido.	69
Figuras 73 – Vaso, eletrônica e bateria embarcados.	69
Figuras 74 e 75 – Visões do protótipo do Pig Acústico.	70
Figura 76 – Protótipo do Pig Acústico.	70
Figura 77– Pig Acústico no lançador.	70
Figura 78 – Dreno utilizado para simulação do vazamento.	71
Figura 79– Equipe monitorando a passagem do pig com o geofone.	71
Figura 80– Recebedor de pigs do GASBEL.	72
Figura 81 – Pig fragmentado em duas partes.	72
Figuras 82 e 83 – Parte traseira do pig, com os sensores e a eletrônica embarcada.	73
Figura 84 – Sinal do Vazamento Simulado no Gasbel Sensor PVDF	74
Figura 85 – Sinal do Vazamento Simulado no Gasbel Sensor Disco-piezoelétrico	74
Figura 86– Espectrograma do Sinal do Vazamento Simulado no Gasbel.	75
Figura 87 – FFT do Sinal do Vazamento Simulado no GASBEL	76
Figura 88 – Reconstituição do Sinal Original do Vazamento.	76
Figura 89 – Sinal do gasoduto sem vazamento.	77
Figura 90 – Espectrograma do som do gasoduto sem vazamento.	78
Figura 91 – Montagem com dois módulos de espuma.	81
Figura 92 – Gráfico esquemático do sinal de vazamento utilizando pig acústico.	82
Figura 93 – Gráficos esquemáticos da assinatura do vazamento.	82