

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA**

**Sistema de monitoramento de falhas em tubulações por meio de
processamento digital de sinais**

Autor: Carlos Antonio Berto Junior

Orientador: Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

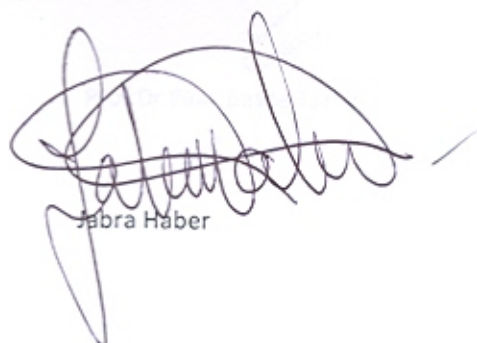
Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio Ricardo Lourenço

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas, São Paulo
maio, 2008

Dedico este trabalho a minha amada esposa
Rejane, ao meu filho Guilherme e aos meus pais
Carlos e Deuza pela paciência, apoio nos
momentos difíceis e pelo incentivo em todos os
momentos da minha vida

Dissertação de Mestrado defendida por Carlos Antonio Berto Junior , em 16 de maio de 2008
e aprovada pela banca constituídas pelos doutores:



Jabra Haber



José Carlos Curvelo Santana



Elias Basile Tambourgi

200815547

Esta versão é a final da Dissertação de Mestrado , defendida por Carlos Antonio Berto Junior ,em 16 de maio de 2008.



Prof Dr Elias Basile Tambourgi-orientador



Prof Dr Sergio Ricardo Lourenço - co orientador

Agradecimentos

Todo trabalho não seria concluído se as pessoas listadas abaixo não tivessem colaborado ativamente em todos os momentos. Neste ínterim, agradeço:

Ao meu orientador Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi e co-orientador Prof. Dr. Sérgio Ricardo Lourenço que dirimiram as minhas dúvidas em todos os momentos.

Ao meu pai Carlos Antonio Berto pela ajuda na construção do protótipo.

“Quando você deseja alguma coisa, todo o universo conspira para que você realize o seu desejo.”

Paulo Coelho

Resumo

O gás natural possui alguns contaminantes que, além de serem corrosivos, comprometem a qualidade para o consumo. Dessa forma, a condensação de água residual no gás pode iniciar um processo corrosivo localizado, que pode acarretar prejuízo à estrutura dos gasodutos. Devido à grande extensão dos dutos os corrosivos comprometem a qualidade do gás e causam grandes transtornos de ordem operacional. Para avaliar a redução da espessura da parede metálica do duto, proveniente de efeitos corrosivos, e identificar fissuras e outras não-conformidades, é fundamental que seja feito o monitoramento contínuo e que se utilizem técnicas e métodos de manutenção preditiva. Atualmente as técnicas adotadas para tal avaliação consistem na inclusão de um corpo de prova, conhecido como *pipeline inspection gauge* (PIG), com varredura por meio de ultra-som, termografia, sensores ópticos, sensores de efeito Hall e sensores para análise de resistência elétrica, além de levantamentos de campo especiais realizados sobre a superfície do solo. Assim, o presente trabalho teve como norteador a otimização do processo de detecção, com vistas à redução de custos e precisão na identificação das falhas. Para tal, foi implementado um PIG autônomo para o monitoramento contínuo da região interna dos dutos dotado de câmeras infra-vermelho, o que diferencia este equipamento dos atuais para o mesmo fim. As câmeras fornecem imagens que são processadas digitalmente e gravadas em uma memória não-volátil presente no equipamento. Um *software* é utilizado para verificar as imagens e, ao mesmo tempo, identificar as não-conformidades presentes. Estas informações serão utilizadas como orientador na tomada de decisão acerca do processo de manutenção que deverá ser utilizado para a solvência dos problemas encontrados.

Palavras-chave: Monitoramento de gasodutos; transporte de gás natural; análise de falhas em gasodutos; PIG; processamento digital de imagem.

Abstract

Natural gas has hazardous contaminants that, besides being corrosive, compromise the quality for the consumption. For in such a way the present residual water condensation in the gas can start a local corrosive process, which could cause damage to the structure of the gas ducts. Due to the great length of a gas duct, corrosive components decrease its quality and cause great operational problems. To evaluate the reduction of the metallic wall thickness for duct, proceeding from corrosive effect, and to identify to fictions and other not-conformity, it is basic that the continuous monitoring is made and that techniques and methods of predictive maintenance are used. Currently the techniques adopted for such evaluation consist the inclusion of a body test, known as pipeline inspection gauge (PIG), with sweepings by means of ultrasound, thermograph, optical sensor, hall-effect and analysis of electric resistance, beyond carried through special surveys of field on the surface of the ground. Thus, the present work had as optimization of the detention process, with sights to the reduction of costs and precision in the identification of imperfections. For such, a PIG independent for the continuous monitoring for internal region in ducts was implemented endowed with cameras infra-red, what it the same differentiates this equipment of the current ones for end. The cameras supply recorded images that are processed digitally and in a present not-volatile memory in the equipment. A software is used to verify the images and, at the same time, to identify to not-conformity gifts. These information will be used as orienting in the taking of decision concerning the maintenance process that will have to be used for the solution of the joined problems.

Key-words: Gas-lines monitoring; transport of natural gas; analysis of imperfections in gas-lines; PIG; digital image processing.

Lista de figuras

Figura 1: Sistema realizado nos ensaios de detecção de falhas	5
Figura 2: Simulação das falhas na tubulação	6
Figura 3: Sistema de detecção de vazamento do gasoduto Niigata – Sendai	17
Figura 4: Perfis dos gradientes de pressão	21
Figura 5: Vazamento entre T1 e T2 com $Re = 9000$	22
Figura 6: Esquema de uma tubulação com vazamento entre os transdutores T2 e T3	23
Figura 7: Influência do número de Reynolds e magnitude do vazamento da onda	25
Figura 8: Perfis de pressão	26
Figura 9: Perfis de transiente de pressão	28
Figura 10: Caixa de inspeção com sistemas de monitoramento instalado em campo	34
Figura 11: PIG de fluxo magnético	38
Figura 12: Duto instrumentado com extensômetro	38
Figura 13: Conversão Analógica/Digital (A/D)	40
Figura 14: Diagrama em bloco de um sistema de Processamento Digital de Sinais	40
Figura 15: Amostragem de sinal	40
Figura 16: Representação de uma imagem digital bidimensional	42
Figura 17: Representação dos planos monocromáticos de uma imagem digital	43
Figura 18: Influência da variação do número de amostras e de níveis de quantização na qualidade de uma imagem digital	46
Figura 19: Diagrama em blocos de um sistema típico para processamento de imagens	47
Figura 20: Operação no domínio do espaço: (A) n-árias; (B) uniárias	49
Figura 21: Operação pontual unária	49
Figura 22: Exemplo de LUT e diagramas de transformação	50
Figura 23: Exemplo de vizinhanças utilizadas em operadores locais	51
Figura 24: Histogramas	52
Figura 25: Exemplo de equalização histográfica	53
Figura 26: Representação gráfica do processo de filtragem espacial	54
Figura 27: Filtro da média	55
Figura 28: Verificação da existência de uma borda a partir do gradiente e do Laplaciano	57
Figura 29: Imagem binária contendo 2 objetos (2 conjuntos de pontos)	60
Figura 30: Representação geral para o processo de classificação	61
Figura 31: Célula de corrosão básica	64
Figura 32 – Múltiplas células de corrosão ao longo de tubulação enterrada	64
Figura 33: Formas de corrosão	65
Figura 34: (a) Fratura altamente dúctil na qual a amostra empescoça até um único ponto. (b) Fratura moderadamente dúctil após algum empescoçamento. (c) Fratura frágil sem qualquer deformação plástica	67

Figura 35: (a) Geometria das trincas de superfície e internas. (b) Diagrama esquemático do perfil de tensão ao longo da linha X – X' em (a), demonstrando a amplificação de tensão nas extremidades da trinca	68
Figura 36: Transporte de um ponto material	72
Figura 37: Volume de controle de uma seção elementar	73
Figura 38: Falha interna na tubulação com 0,003 metros de diâmetro detectada pela câmera digital	81
Figura 39: Falha interna na tubulação com 0,008 metros de diâmetro detectada pela câmera digital	81
Figura 40: Velocidade de deslocamento do PIG	84
Figura 41: Velocidade de deslocamento do PIG – ascendentes – 15°, 30°e 45°	84
Figura 42: Velocidade de deslocamento do PIG – descendentes – 15°, 30°e 45°	85
Figura 43: Velocidade de deslocamento do PIG – com controle PID	89
Figura 44: Imagem de uma falha captada pela câmera acoplada no PIG na tubulação	91
Figura 45: Sinal temporal da imagem de uma falha na tubulação gerando a partir das matrizes DCT	91
Figura 46: Velocidade de deslocamento do PIG “real” – com controle PID	92

Lista de tabelas

Tabela 1: Histórico das metodologias utilizadas para detecção de vazamentos em gasodutos	9
Tabela 2: Comparação dos métodos na detecção dos vazamentos	18
Tabela 3: Precisão na detecção de vazamentos	24
Tabela 4: Número de <i>bytes</i> para uma imagem monocromática	45
Tabela 5: Número de <i>bytes</i> para uma imagem colorida	47
Tabela 6: Comparativo entre simulação teórica e prática	86

Lista de abreviaturas e siglas

A/D	Analógica/Digital
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
D/A	Digital/Analógica
DCT	Discrete cosine transform
DV	Digital video
Gasbol	Gasoduto Brasil-Bolívia
Geid	Grupo de trabalho especial do programa de integridade dos dutos
LED	Light emitting diode
Mpeg	Moving picture experts group
PDI	Processamento digital de imagens
PDS	Processamento digital de sinais
Pegaso	Programa de excelência em gestão ambiental e segurança operacional
Petrobras	Petróleo Brasileiro S/A
PIG	Pipeline inspection gauge
Produt	Programa tecnológico de dutos
PVC	Policloreto de vinila
SAR	Synthetic aperture radar
Scada	Supervisory control and data acquisition
SFAI	Swept frequency acoustic interferometry
USB	Universal serial bus

Lista de símbolos

y	distância entre o vazamento e o transdutor mais próximo
L_2	distância entre os transdutores 2 e 3
t_2, t_3	tempos de detecção dos transdutores T_2 e T_3
v_{onda}	velocidade de propagação da onda de pressão
Re	Numero de Reynolds
L	número de valores de brilho
b	número de bits
L_R	níveis de quantização no plano R
L_G	níveis de quantização no plano G
L_B	níveis de quantização no plano B
$H_f(C)$	histograma número total de pixels na imagem
n_c	número de vezes em que o nível de cinza C se apresenta na imagem
rnd	representa o arredondamento do resultado da expressão para o inteiro mais próximo
$G[f(i, j)]$	vetor que aponta no sentido da maior taxa de variação de $f(i, j)$
σ_m	tensão máxima na extremidade da trinca
σ_o	magnitude da tensão de tração nominal aplicada
ρ_e	raio de curvatura da extremidade da trinca
a	comprimento de uma trinca superficial, ou metade do comprimento de uma trinca interna
ρ	massa específica do volume de controle
A	área da seção transversal
v	velocidade de deslocamento do volume de controle
s	coordenada axial do volume de controle
t	coordenada tempo do volume de controle
p	pressão do gás natural
D	diâmetro da parede da tubulação
e	espessura da parede da tubulação
Y	módulo de elasticidade (Young) do material da tubulação
n	coeficiente de Poisson
σ	tensão viscosa
F_s	Forças que atuam na superfície do volume de controle
μ	coeficiente de atrito
v_a	viscosidade absoluta do fluido
v_{ref}	viscosidade absoluta de referência na pressão de referência

$c_{v,p}$	coeficiente de pressão para a viscosidade absoluta
p_{ref}	pressão de referência
T_{ref}	temperatura de referência
R	constante do gás
z	fator de compressibilidade
v_{pig}	velocidade de deslocamento do PIG
m	massa do PIG
p_1	pressão na face à montante do PIG
p_2	pressão na face à jusante do PIG
F_{at}	representa a força de contato entre o PIG e a parede do gasoduto
F_{neg}	Força máxima para o gradiente de pressão negativa
F_{pos}	Força máxima para o gradiente de pressão positiva
τ_s	tensão de escoamento do material do duto
D_e	diâmetro externo do duto
T	temperatura
F	fator de projeto
E	tipo de solda longitudinal
p_{th}	pressão exercida em cada ponto do duto durante o teste hidrostático
F_{th}	fator de teste hidrostático
η	viscosidade dinâmica
m_f	massa do gás natural
v_c	velocidade do PIG com o sistema de controle
v_r	velocidade relativa ao sistema de coordenada móvel
h	fator de escala
K_p	ganho proporcional
τ_i	constante de tempo integral
τ_d	constante de tempo derivativa
$u_{(x)}$	a variável manipulada
$e_{(x)}$	erro no tempo medido
$e_{(x-1)}$	erro anterior

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Problema	2
1.2	Objetivo	3
1.3	Justificativa	3
1.4	Metodologia	4
2	Revisão bibliográfica	8
2.1	Métodos de detecção de vazamento em tubulações	8
2.2	<i>Pipeline inspection gauge</i> (PIG)	33
2.3	Processamento digital de sinais (PDS)	39
2.4	Corrosão, falhas e degradação de metais	62
3	Gás natural e gasoduto	69
3.1	Propriedades do gás-natural	69
3.2	Fluido-dinâmica do gás natural	72
4	Resultados e discussão	81
5	Conclusões	94
6	Referências bibliográficas	95

1 Introdução

O gás natural tem uma utilização bastante diversificada. Seus usos vão desde calefação de ambientes, passando por cozimento de alimentos, até aplicações industriais, além de ser utilizado como combustível para automóveis e usinas termo-elétricas. Com a crise do petróleo no início da década de 70 do século passado, o gás natural tornou-se uma fonte de energia economicamente competitiva e estratégica, participando atualmente com cerca de um quarto do consumo mundial de energia.

No Brasil, o gás natural tem uma participação em torno de 9,6% na matriz energética. A meta do governo é aumentar a participação do gás natural para 15% até 2015. A diferença da participação do gás natural na matriz energética do Brasil e do mundo deve-se basicamente à predominância de geração hidrelétrica brasileira (LOURENÇO, 2007).

O país conta atualmente com reservas provadas de gás natural de mais de 350 bilhões de metros cúbicos, uma produção diária ao redor de 50 milhões de metros cúbicos, e rede de transporte (gasodutos) com mais de 11.000 quilômetros, tendo seu principal gasoduto entre o Brasil e a Bolívia (Gasbol) e tem 3150 quilômetros de extensão (ANP, 2007).

O transporte de gás natural por meio de tubulações iniciou-se em maior escala na Europa no final do século XIX, no entanto, as técnicas de construção eram modestas e os gasodutos tinham no máximo cento e sessenta quilômetros de extensão, impedindo, assim, o transporte de grandes volumes a longas distâncias (GASPETRO, 2007).

Nos Estados Unidos, o primeiro gasoduto iniciou as operações comerciais em 1821. Em 1931 contemplava-se mais de dez linhas de transmissão de grande porte, porém com alcance restrito entre os estados. Desde 1960, milhares de quilômetros de dutos foram instalados, mediante os avanços consolidados na metalurgia para a construção de tubos metálicos. A utilização dos dutos em vários

países, deve-se ao fato das vantagens econômicas e ambientais destacadas pela técnica (GASPETRO, 2007).

O consumo de gás natural influencia na operação dos gasodutos devido à sua baixa capacidade de estocagem. Como as usinas termo-elétricas são um dos principais consumidores, pode-se esperar que a operação das usinas influencie na operação do sistema de gás. Por outro lado, as restrições operacionais da rede de gás, devido a manutenções ou demandas excessivas, podem impor limites na geração termo-elétrica.

Na década de oitenta do século passado o Brasil concentrou-se na construção de um grande número de gasodutos devido ao aumento da utilização do gás natural nas indústrias. Em 1998, a Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras) criou o Programa Tecnológico de Dutos (Produt) com o objetivo de disponibilizar e desenvolver tecnologias para o sistema de dutos, visando aumentar a confiabilidade operacional, minimizando riscos de vazamentos, impactos no meio ambiente e perdas de capacidade de transporte, melhoria do desempenho operacional, com maior aproveitamento dos ativos como garantia da qualidade do produto transportado e minimização dos custos de operação e de investimentos (GASPETRO, 2007).

1.1 Problema

Como o gás natural possui alguns contaminantes corrosivos, estes acarretam prejuízo à estrutura dos dutos. Devido à grande extensão dos dutos, os corrosivos comprometem a qualidade do gás e causam grandes transtornos de ordem operacional.

Determinar como pode ser realizado o monitoramento interno do duto com vistas à detecção de falhas, com o emprego de técnicas e conceitos diferentes dos utilizados atualmente. O monitoramento deve estar orientado para que haja

aumento de confiabilidade e melhoria na operacionalidade do processo de manutenção.

1.2 Objetivo

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e teste de uma técnica de detecção de falhas que podem ocasionar vazamentos baseado no monitoramento interno dos dutos, por intermédio de um PIG inteligente utilizado para identificar problemas estruturais. Trata-se, portanto, de uma ferramenta sofisticada que permite rapidez e eficiência no processo de visualização de dutos por meio de câmeras acopladas que armazenam as imagens em forma de dados por um sistema microcontrolado durante o percurso da inspeção.

1.3 Justificativa

Baseado no Programa de Excelência em Gestão Ambiental e Segurança Operacional (Pegaso) e no Grupo de Trabalho Especial do Programa de Integridade dos Dutos (Geid), criados pela Petrobras nos anos de 2000 e 2001, respectivamente, é patente o estabelecimento de critérios para classificação dos dutos, com base nas possíveis consequências decorrentes de suas falhas, para priorizar as ações de monitoramento, controle e intervenção, fixando as ações necessárias para detectar, monitorar e controlar: corrosão interna, corrosão externa, esforços provocados pelo solo e ação por terceiros.

O programa Pegaso define também, procedimentos de avaliação e critérios de aceitação para os diversos tipos de descontinuidade, bem como procedimentos de teste hidrostático e de reparos de contingência. Este padrão se aplica a todos os dutos de transporte e de transferência, construídos em aço carbono, com diâmetro igual ou superior a 6 polegadas ou quando houver exigência legal.

Neste contexto é premente a necessidade de elementos que realizem o monitoramento do gasoduto de forma autônoma e detectem com confiabilidade falhas internas existentes nos dutos.

A técnica de detecção de falhas por meio de imagem remete a necessidade da monitoração continua dos dutos evitando vazamentos. Este método prove um avanço tecnológico no controle e manutenção das falhas.

1.4 Metodologia

Neste trabalho foram analisadas duas formas de deslocamento do PIG e a interação na detecção dos pontos de falha no duto por meio de uma câmera digital. As situações analisadas foram:

1. Deslocamento do PIG em um trecho de tubulação de 2 metros de comprimento, fechado nas extremidades, utilizando um compressor de ar com pressão de $9,7 \cdot 10^5$ Pa;

2. Deslocamento do PIG em um trecho de tubulação de 2 metros de comprimento, fechado nas extremidades, utilizando um motor elétrico de corrente contínua acoplado no sistema de tração do PIG.

A tubulação foi construída com tubo de policloreto de vinila (PVC) de 0,102 metros de diâmetro e 2 metros de comprimento. O PIG é constituído de um invólucro de PVC de 0,08 metros de diâmetro, 0,38 metros de comprimento e 70 gramas de massa. Neste PIG foram acoplados quatro rodízios para a movimentação dentro da tubulação e uma câmera digital com resolução de 720×480 pixels, 30 frames por segundo e *light emitting diode* (LED) infra-vermelhos para auxiliar na captação das imagens em ambientes com baixa luminosidade. A comunicação de dados entre a câmera digital e o computador é realizada por uma interface *universal serial bus* (USB), que simula o processamento digital de imagem.

O fluido que escoar na tubulação é ar comprimido, que provém de um compressor industrial com pressão máxima de $9,7 \cdot 10^5$ Pa.

O sistema utilizado para a realização dos ensaios na detecção de falhas na tubulação está apresentado na Figura 1: (a) PIG com a câmera digital (b) trecho da tubulação de PVC com 2 metros de comprimento, (c) conexão entre o computador e o PIG pela interface USB.

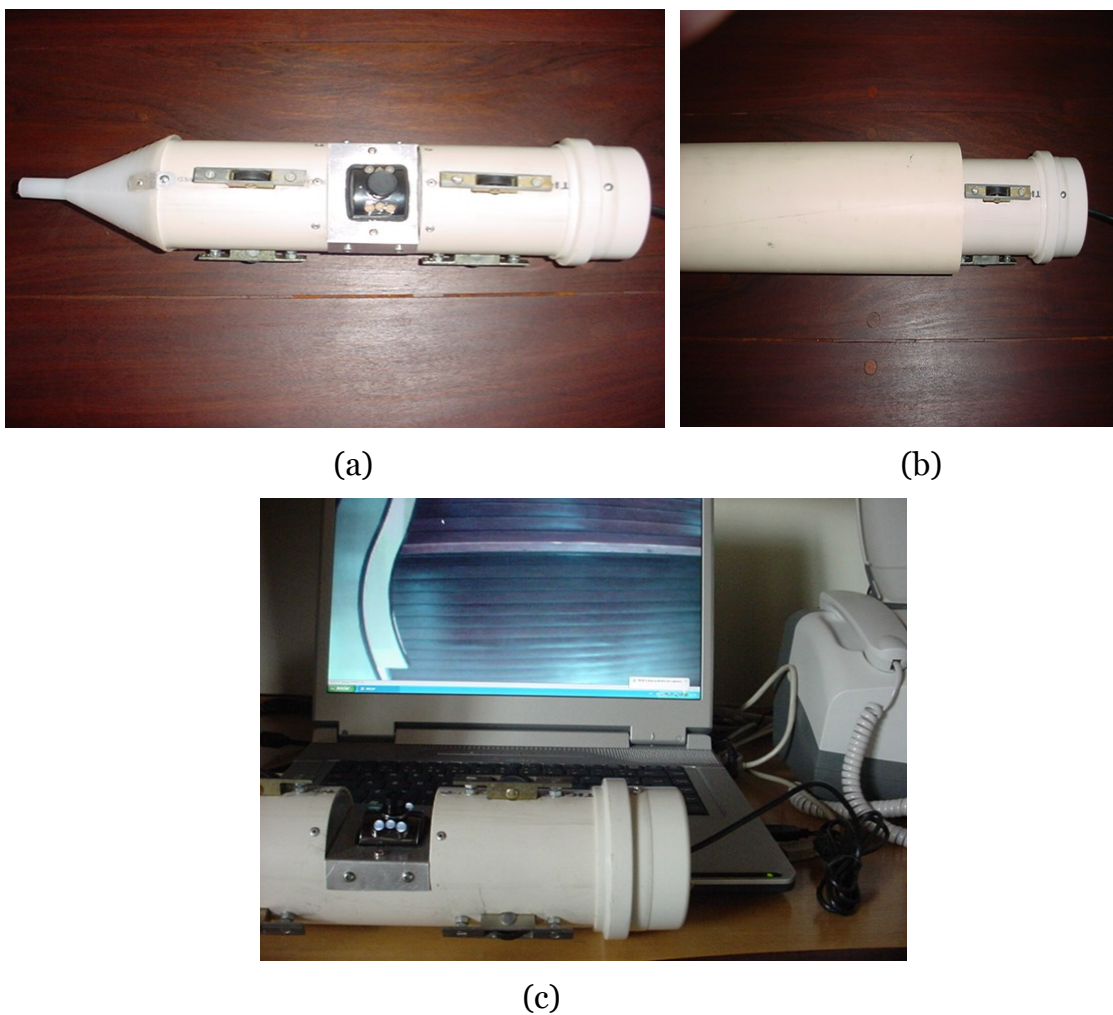


Figura 1: Sistema realizado nos ensaios de detecção de falhas

As falhas na tubulação foram simuladas por meio de símbolos inseridos na parte interior, conforme mostra a Figura 2.

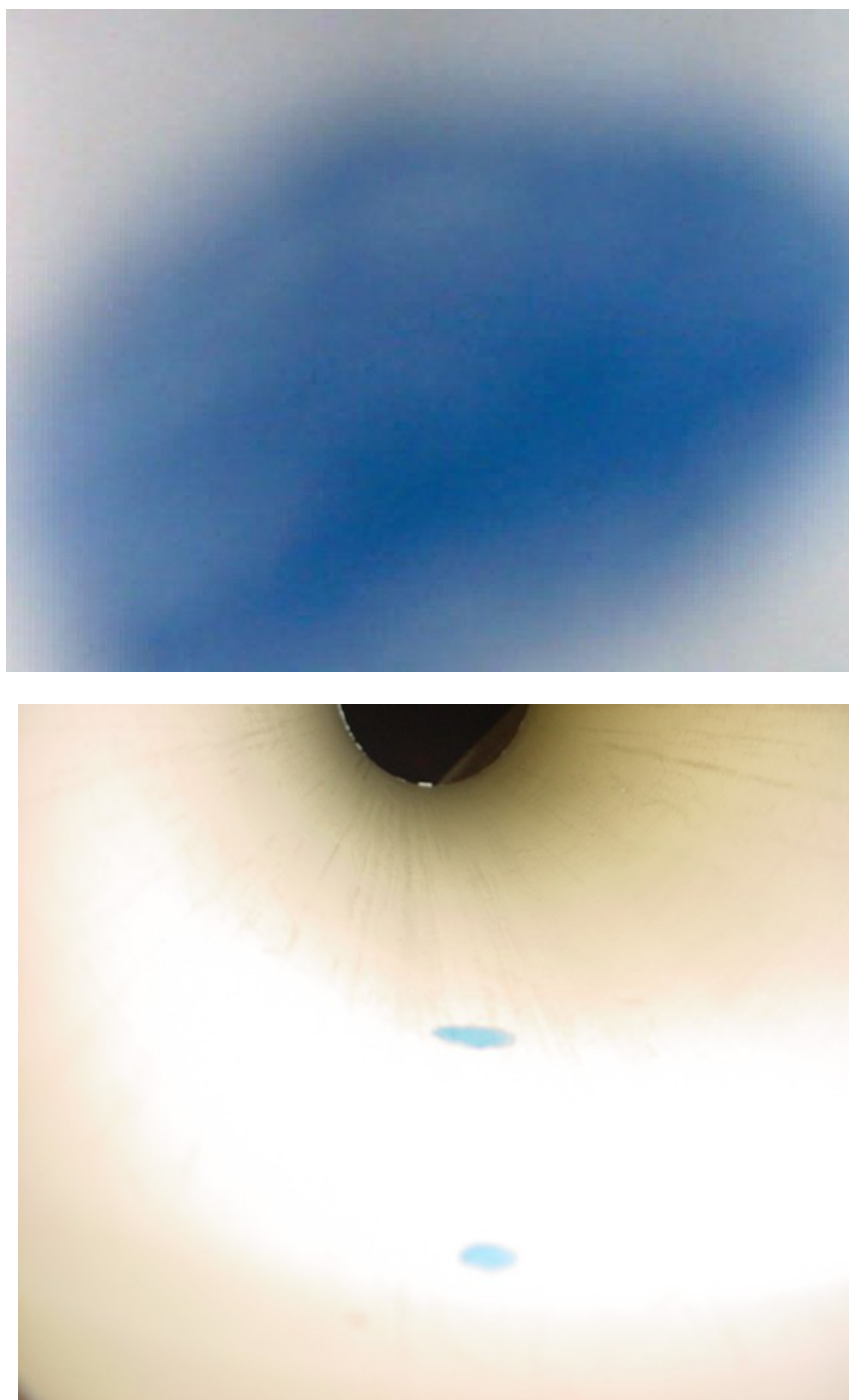


Figura 2: Simulação das falhas na tubulação

O deslocamento do PIG, através da tubulação de 2 metros de comprimento, foi realizado experimentalmente e simulado utilizando métodos computacionais para várias condições de operação:

1. deslocamento horizontal do PIG, na tubulação, impulsionado pelo ar comprimido;
2. deslocamento com inclinações ascendentes de 15° , 30° e 45° do PIG, na tubulação, impulsionado pelo ar comprimido;
3. deslocamento com inclinações descendentes de 15° , 30° e 45° do PIG, na tubulação, impulsionado pelo ar comprimido;
4. deslocamento horizontal do PIG, na tubulação, impulsionado pelo motor elétrico acoplado ao sistema de tração;
5. deslocamento com inclinações ascendentes de 15° , 30° e 45° do PIG, na tubulação, impulsionado pelo motor elétrico acoplado ao sistema de tração;
6. deslocamento com inclinações descendentes de 15° , 30° e 45° do PIG, na tubulação, impulsionado pelo motor elétrico acoplado ao sistema de tração.

2 Revisão bibliográfica

O vazamento ocasionado por ruptura devido a falha estrutural, esforços provocados pelo solo e ação por terceiros é detectado em menor escala, contudo, apresenta um significativo dano ambiental, especialmente em áreas remotas e em tubulações submersas. Entretanto, este tipo de vazamento é detectado facilmente mediante as quedas abruptas de pressão e discrepância no volume do gás na linha de transporte. Os vazamentos de menor escala são oriundos de corrosão, erosão, fadiga, defeitos na solda ou em junções, os quais contemplam difícil detecção e podem levar a grandes perdas de produto.

Observa-se nos gasodutos que os vazamentos são relativamente pequenos e os métodos conhecidos permitem a detecção a partir de fatores como: o tipo de fluido que escoar na tubulação, a precisão do sistema de medida e dos transmissores, tamanho e espessura da tubulação, a condição do estado transiente ou estacionário do fluxo, equipamento de análise e empirismo (KENNEDY, 1993).

A implementação de um grande número de sistemas de detecção de vazamento nas tubulações em operação não demonstram um desempenho satisfatório pelos seguintes fatores: freqüentes alarmes falsos, são de difícil entendimento para o usuário e a manutenção é de custo elevado. Conseqüentemente, alarmes de vazamento são negligenciados e em alguns casos desligados (ZHANG, 2001).

2.1 Métodos de detecção de vazamento em tubulações

Denota-se que um sistema de detecção deve ser sensível o suficiente para fornecer notificação precisa e rápida e ao mesmo tempo ter baixa freqüência de alarmes falsos (BLACK, 1992).

Sistemas de detecção de vazamento podem ser classificados em duas

principais categorias: estáticos e dinâmicos (SANDBERG, 1989).

Segundo Sandberg (1989) nota-se uma preferência pelos sistemas dinâmicos, mediante o fato destes serem utilizados enquanto a tubulação está em operação. Métodos estáticos são úteis depois que o vazamento foi detectado para obter a localização. Estes métodos são capazes de detectar pequenos vazamentos baseando-se no conceito de queda na pressão mediante a ausência no fluxo do fluido.

Neste contexto várias técnicas para detecção de vazamentos e falhas nos dutos foram estudados e implementados nas últimas décadas. Para melhor elucidação a Tabela 1 resume as técnicas utilizadas.

Tabela 1: Histórico das metodologias utilizadas para detecção de vazamentos em gasodutos

Autor	Ano	Método
Wike	1986	análise por meio de variação de pressão e fluxo
Wike	1986	análise a partir do balanço de volume não compensado
Sandberg	1989	PIG de monitoramento acústico
Sandberg	1989	sensores térmicos e ópticos utilizados em patrulhas aéreas
Sandberg	1989	sensores de hidrocarbonetos
Naves	1991	detecção e análise computacional de transientes de perda de carga na tubulação
Black	1992	Observação
Black	1992	PIG com sensor ultra-sônico
Jönsson	1992	análise espectral a transientes de pressão
Pudar	1992	modelagem matemática de toda a rede para obtenção do transiente hidráulico
Buiatti	1995	variação do método utilizado por Naves (1991) alterando o numero de Reynolds, o comprimento da tubulação e o fluido
Silva	1996	variação do método utilizado por Naves (1991) alterando o numero de Reynolds, o comprimento da tubulação e o fluido
Belsisto	1998	localização de vazamentos baseado no modelamento em redes neurais

Cariatti	1999	variação do método utilizado por Naves (1991) alterando o numero de Reynolds, o comprimento da tubulação e o fluido
Fukushima	2000	medidas de pressão e temperatura nas estações de válvulas
Chung	2001	sensores de SnO ₂
Verde	2001	detecção de vazamentos múltiplos baseados no modelo da tubulação distribuída
Zhang	2001	modelos matemáticos para cálculo de fluxo e pressão na tubulação
Braga	2001	variação do método utilizado por Naves (1991) alterando o numero de Reynolds, o comprimento da tubulação e o fluido
Zirnig	2001	monitoramento de gasoduto por análise de imagens
Souza	2002	análise espectral de sinais de pressão medidos em trechos da tubulação (ondas estacionárias)
Macias	2004	análise de transientes de pressão simulados e reais
Nóbrega	2005	análise da corrosão por meio de sensores de resistência elétrica
Sinha	2005	monitoramento de um gasoduto por sensor acústico
Bueno	2006	PIG de alta resolução com sensores de efeito Hall
Battelle	2006	PIG com sensores de fluxo magnético
Sousa	2007	análise de vazamentos em tubulações através de método acústico e da análise de transientes de pressão

Wike (1986) enumera várias técnicas de detecção e localização de vazamentos baseadas no sistema *supervisory control and data acquisition* (Scada): teste estático, variações inesperadas, gradiente de pressão, balanço de massa, ondas de pressão negativa e simulação paralela.

No mesmo contexto, Dempsey (1996) descreve a aplicação de um novo sistema Scada, em duas tubulações transportando petróleo por mil e cem quilômetros na Arábia Saudita. O sistema Scada computadorizado monitora e

controla as tubulações e substitui o método anterior, por dois motivos: proporciona um sistema de controle distribuído e providencia ao sistema maior número de funções de monitoramento e controle supervisorio. O sistema Scada inclui um *software* de aplicação para detecção de vazamento em tempo real.

Conforme Black (1992), os sistemas de detecção de vazamentos são classificados como: observação, métodos baseados em sensores, PIG inteligente, análise a partir de medidas de pressão, balanço de volume não compensado e modelagem matemática da tubulação. A seguir são detalhados os métodos de detecção de vazamento em tubulações.

Observação

É o método baseado na a patrulha regular da tubulação, realizando a inspeção visual da integridade da linha. Um método similar é a injeção de aditivos químicos em gases atóxicos provendo odor. A ocorrência de vazamentos deve ser verificada em inspeções regulares, já que a eficácia deste método pode deteriorar dependendo das condições ambientais e da direção do vento (BLACK, 1992).

Métodos baseados em sensores

A utilização de sensores acústicos, detectam pequenos vazamentos em um curto espaço de tempo, contudo, mantém pontos de não conformidade devido ao “ruído de fundo” de compressores e válvulas. Sandberg (1989) cita PIGs de monitoramento acústico que detectam o vazamento através da energia acústica gerada pelo escape do fluido.

Uma outra alternativa é a utilização de sensores de ruídos ultra-sônicos, os quais detectam os vazamento produzido na faixa de frequência correspondente.

Neste ínterim, o cuidado adicional remete ao software associado que deve ser desenvolvido cuidadosamente de modo a filtrar os ruídos externos (BLACK,1992).

Os sensores térmicos e ópticos, são utilizados em patrulhas aéreas dotadas de sensores remotos, os quais podem detectar vazamentos de gás natural monitorando o metano e etano na atmosfera sob a tubulação por meio de picos no espectro infravermelho. Um sistema similar usa imagens infravermelhas térmicas (SANDBERG,1989).

A evidência do vazamento de produtos pode ser deduzida pelas mudanças nas propriedades eletromagnéticas de cabos enterrados ou por sensores seletivos para uma substância específica (BLACK, 1992).

Para detecção seletiva de metano e gás natural, Chung (2001) desenvolveu um sistema de monitoramento multicanal de vazamento de gás natural, baseado em sensores de óxido de estanho (SnO_2). O óxido de estanho tem grandes aplicações científicas e tecnológicas na área de sensores de gases na sua forma porosa e na sua forma densa nas áreas de varistores cerâmicos e dispositivos com alta resistência química dentre outras.

A partir de um sistema composto por sensores de hidrocarbonetos, Sandberg (1989) desenvolveu um sistema que consiste em um módulo de alarme e um cabo sensor. O cabo sensor é instalado ao longo da tubulação, com comprimento de 2 quilômetros, e é revestido de um polímero condutivo que incha ao entrar em contato com o hidrocarboneto que está vazando da tubulação. Ao inchar, o circuito existente dentro do cabo é fechado acionando o alarme para avisar a presença de vazamento, o qual detecta o ponto fulcral a partir da relação entre a fonte de corrente constante, a alta impedância e a diferença de potencial disposta no cabo.

Análise a partir de medidas de pressão

Conforme Wike (1986) o vazamento é detectado na tubulação, em operação, por meio da variação da pressão e do fluxo. O vazamento pode provocar uma diminuição de pressão e um correspondente aumento de fluxo. Este método pode ser aplicado apenas a fluídos incompressíveis próximo ao estado estacionário, caso contrário pode levar a falsos alarmes, bem como somente vazamentos em grande escala são detectados.

O método que utiliza o gradiente de pressão, baseia-se no princípio da distorção do perfil de pressão a partir de um vazamento ao longo de uma seção da tubulação. O gradiente médio de pressão ao longo da linha pode ser calculado por meio de medidores de pressão nas extremidades das seções. Segundo Wike (1996) o vazamento causa uma diminuição no gradiente médio e através de técnicas de ajuste de curvas de interpolação entre medidas de pressão, para tanto o vazamento é localizado.

No estudo de ondas de pressão negativa, Wike (1996) e Black (1992) ilustram que no instante em que o vazamento ocorre há uma queda de pressão no local originando uma onda de pressão negativa que se propaga à velocidade do som no sentido montante e jusante até que seja alcançado um novo estado estacionário. Esta pressão negativa viaja a grandes distancias apenas com atenuação moderada, providenciando uma detecção rápida para grandes tubulações. Para calcular a posição do vazamento com razoável precisão, transdutores de pressão são instalados nas extremidades das seções. É necessário realizar uma análise cuidadosa dos dados, mediante o fato das ondas de pressão negativas serem provocadas por bombas, fechamento de válvulas e outros procedimentos normais da operação. As experiências mostram que o número de alarmes falsos é afetado pela instalação e que o desempenho depende do número de Reynolds.

Jönsson (1992) aplicou a análise espectral a transientes de pressão, baseados na teoria de que a pressão medida em um ponto do sistema hidráulico e

analisada a respeito da propagação de ondas não associadas à configuração do sistema, podem revelar possíveis vazamentos. Quando uma série de medidas de pressões no tempo são representadas por um número de funções periódicas com variações de amplitude, frequência e fase, é possível distinguir ondas de frequência dominantes no sinal e identificar as ondas refletidas. A detecção e localização são possíveis porque um vazamento no sistema origina ondas refletidas com magnitudes que dependem do fluxo de vazamento e da razão entre a pressão incidente e a pressão no local do vazamento.

Análise a partir de balanço de volume não compensado

Wike (1986), Black (1992) e Sandberg (1989), descrevem que este é um dos métodos mais utilizados, porém, limitado pela exatidão da medida do volume e das variações associadas ao método. Essencialmente mede-se o volume que entra e subtrai o volume que sai, sendo a diferença o vazamento. Alarmes incorretos podem ocorrer devido a taxa de fluxo que depende de parâmetros do fluido (temperatura, pressão, densidade e viscosidade). As variações nos parâmetros podem ser corrigidas por medições regulares das variáveis ao longo da tubulação ou preditas por um modelo de cálculo. No intuito de evitar alarmes falsos, o vazamento será validado quando a diferença de fluxo exceder um valor limite de 2% para líquido e 10% para gases.

Vazamentos menores podem ser detectados com métodos não lineares adaptativos baseados na medida do fluxo e pressão na entrada e saída da tubulação, sendo que a localização do ponto de vazamento não é verificada por este método.

Deteccão baseada na modelagem matemática da tubulação

Conforme Black (1992), mesmo coexistindo diferentes formulações, a essência dos sistemas de modelagem baseia-se na solução de equações da conservação de massa, momento e energia. Estas equações não representam um sistema fechado e devem ser suplementadas por uma equação de estado e formulação do fator de fricção, para tanto métodos numéricos são utilizados para resolução dos grupos de equações não lineares, resultando uma ferramenta preditiva conhecida como modelo de tempo real.

Este modelo estima variáveis intermediárias ao longo da tubulação através de um conjunto limitado de medições reais, como pressão a montante e fluxo a jusante, que são usados como condições de contorno. As discrepâncias entre as variáveis intermediárias calculadas pelo modelo e medições reais são usadas para indicar vazamentos (WIKÉ, 1986).

Black (1992) descreve que a predição exata do empacotamento da linha e o efeito do transiente no balanço de volume são obtidos quando utiliza-se o sistema baseado no modelo.

A modelagem na rede, inteira, para obter o transiente hidráulico foi desenvolvida por Pudar (1992) e Dempsey (1996).

Billmann (1987) propôs um método de modelo matemático dinâmico para detectar e localizar pequenos vazamentos, baseado nas equações de escoamento transiente, observadores de estado adaptativo não linear, bem como uma técnica de correlação. Os sinais medidos são a taxa de fluxo e a pressão nas extremidades da seção. São detectáveis vazamentos maiores de 2% para líquidos e maiores que 10% para gases.

A detecção de vazamentos múltiplos baseados no modelo da tubulação distribuída, são descritos por Verde (2001). O problema é resolvido usando apenas sensores de fluxo e pressão nos extremos do duto e a redundância analítica dada

por essas medidas. O modelo da tubulação com múltiplos vazamentos é considerado como uma condição de contorno adicional na equação diferencial parcial onde há vazamento.

Fukushima (2000) implementou a detecção de vazamento medindo a pressão e a temperatura nas estações de válvulas, distantes 12 quilômetros, a partir do fluxo de gás na entrada e na saída. Este sistema foi instalado na tubulação em Niigata-Sendai com 250 quilômetros de extensão, operando continuamente sem estado estacionário na operação. O sistema de detecção de vazamento determina automaticamente o local do vazamento e a taxa de vazamento em tempo real. O método proposto é uma extensão do método de balanço de massa e volume e corresponde a um modelo de simulação para a tubulação baseado no modelo do fluxo transiente, com características específicas para resolução das equações diferenciais ordinárias.

A detecção em tempo real é feita em duas etapas. A técnica baseia-se na simulação no balanço de pressão e o vazamento em potencial é definido pela diferença de balanço de massa a cada estação de válvula. No instante da detecção do vazamento, um parâmetro de sintonia reconcilia o balanço de pressão para minimizar a possibilidade de vazamento a cada estação de válvula.

As discrepâncias entre os valores dos balanços de pressão, simulado e o real, são avaliados para determinar o possível vazamento, neste ínterim a detecção de vazamento é realizada a partir da comparação do valor do vazamento em potencial com um valor preestabelecido. No momento em que o vazamento em potencial for superior ao valor preestabelecido, este pode ser determinado como um possível vazamento e a localização do vazamento será entre os dois pontos em que os valores preestabelecidos foram violados. Neste sistema o vazamento mínimo detectado é de 1,1%, e para localizar o vazamento é preciso que seja de no mínimo 1,8%.

Com a carga máxima o vazamento é detectado em 8 minutos com erro de localização médio de 4%. Já com a carga mínima o vazamento é detectado em 4 minutos com erro de localização médio de 20%. A Figura 3 detalha os módulos de monitoramento do sistema *supervisory control and data acquisition* (Scada), sintonia, controle (limiar) e detecção de vazamento.

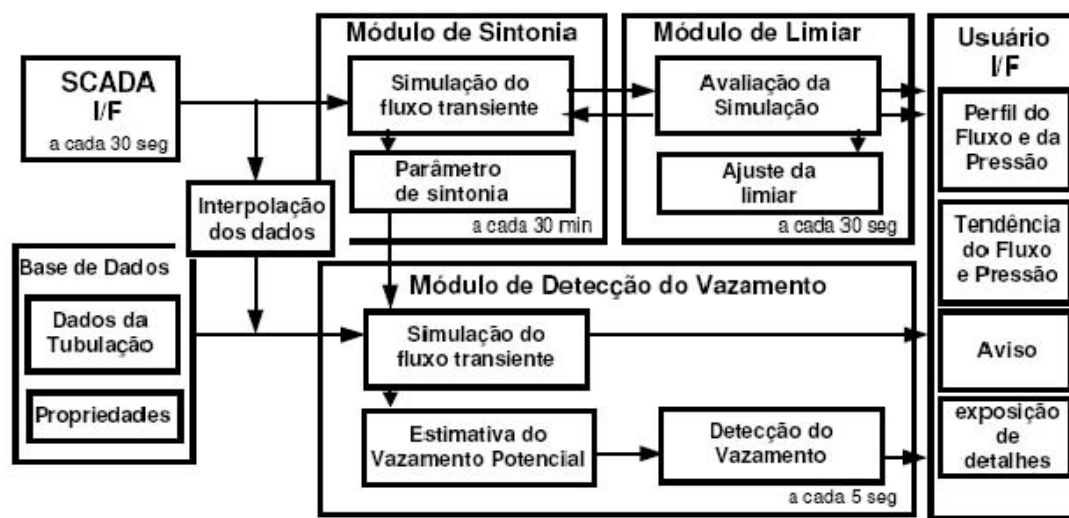


Figura 3: Sistema de detecção de vazamento do gasoduto Niigata – Sendai
Fonte: Fukushima, 2000

Cist (2001) descreveu uma comparação entre diferentes métodos de detecção de vazamento, conforme Tabela 2. No estudo realizado, Cist (2001) conclui que o método mais apropriados para detecção de vazamentos em tubulações é o acústico, mediante a requisição de manutenção especializada e custo para implantação não atingirem valores elevados, aliado a excelente sensibilidade e estimativa de localização na detecção de vazamentos.

Tabela 2: Comparação dos métodos na detecção dos vazamentos

Fonte: Cist, 2001

Método	Observação	Sensor de temperatura	Acústico	Pressão negativa	Balanço de volume	Balanço de massa	Modelagem
Sensível a vazamento	sim	sim	sim	sim	não	não	sim
Estimativa da localização	sim	sim	sim	sim	não	não	sim
Trabalha sob mudanças operacionais	sim	sim	não	não	não	não	sim
Disponível 24 horas	não	não	sim	sim	sim	sim	sim
Taxa de alarmes falsos.	baixa	média	alta	alta	alta	alta	alta
Requerimento de manutenção especializada	médio	médio	médio	médio	baixo	baixo	alto
Custo (implantação e operacional)	alto	alto	médio	médio	baixo	baixo	alto

Belsito (1998), considera que nenhum método pode ser considerado ideal e seu desempenho varia com o projeto de aplicação, com isso, as tubulações importantes utilizam-se de mais de um método de detecção de vazamento.

Neste contexto, Belsito (1998) desenvolveu um sistema de detecção e localização de vazamentos em tubulações, transportando gás liquefeito, baseada em redes neurais artificiais.

A rede foi treinada com dados simulados e testada levando em consideração os sinais de ruídos existentes na tubulação. No sistema em estudo foram detectados vazamentos de 1% do fluxo de entrada e a localização de vazamentos maiores (5%, 10%) foi feita com alta confiabilidade, mesmo na presença de ruídos.

Zhang (2001) examina uma aplicação desenvolvida pela companhia Shell, a qual utiliza-se de um método estatístico de detecção de vazamentos em tubulações, o qual não faz uso de modelos matemáticos para calcular o fluxo e a pressão na tubulação. Contudo, este método detecta as mudanças na relação entre o fluxo e a

pressão usando dados de medidas disponíveis, operando em tubulações de gás e líquido. Baseado em medidas de fluxo e pressão, este método calcula continuamente a probabilidade de ocorrência de vazamento, avisando o tamanho do vazamento e sua localização aproximada, contemplando uma taxa muito baixa de alarmes falsos. Todas as variações geradas por mudanças operacionais são registradas, assegurando que o alarme de vazamento ocorra quando houver um padrão único de mudanças no fluxo e pressão, sendo assim suas características proporcionam ao sistema uma capacidade de aprendizado *on-line* às mudanças na tubulação e instrumentos de medida.

Este sistema foi testado em uma tubulação transportando etileno a alta pressão por 413 quilômetros. O sistema recolhe dados provenientes do Scada existente e após o processamento da posição da linha (normal ou vazamento) é devolvida ao sistema juntamente com a taxa de vazamento e a estimativa do local. Durante as operações normais da tubulação o sistema não gerou alarmes falsos. Testes também foram realizados em tubulações transportando petróleo e propileno líquido.

Deteccção de vazamentos por computador *on-line*

O Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos da Faculdade de Engenharia Química, na Universidade Estadual de Campinas desenvolve estudos sobre técnicas de detecção e localização de vazamentos em tubulações por métodos computacionais *on-line* desde 1989. Neste contexto, a contribuição para o desenvolvimento de um PIG inteligente o qual utiliza de métodos computacionais para detecção e localização de corrosões internas em gasodutos, que são causadores de vazamentos, é de suma importância.

Para tanto, Naves (1991) desenvolveu um método para detecção de vazamentos baseado na detecção e análise de transientes de perda de carga na tubulação. O perfil teórico do transiente hidráulico gerado por um vazamento foi

obtido através de simulação feita a partir das equações da continuidade e do momento e do método das características.

O perfil experimental foi obtido através de experimentos realizados em uma tubulação de policloreto de vinila (PVC) de 20 metros de comprimento e 0,02 metros de diâmetro nominal. O sistema de aquisição de dados em tempo real por computador era composto por transdutor de pressão (do tipo célula capacitiva) interligado a um computador através de um circuito condicionador e amplificador do sinal e placa analógica/digital (A/D) e digital/analógica (D/A).

Em ambos os casos variou-se os principais parâmetros que afetam diretamente o vazamento: razão de vazamento (10, 20, 30, 40 e 50% da vazão nominal do fluxo), número de Reynolds (6000, 8000, 10000 e 12000) e a posição do vazamento (5, 10 e 15 metros da entrada da tubulação).

Na Figura 4 verifica-se os perfis da perda de carga na tubulação obtidos por meio da simulação e da aquisição de dados. A simulação foi baseada em uma tubulação reta de 20 metros de comprimento e condições de contorno foram necessárias nas extremidades, onde não há equações para relacionar as variáveis do processo, adotando reservatório a montante e válvula a jusante; enquanto os dados experimentais foram obtidos de uma tubulação que apresentava curvas e as medidas foram feitas por transdutores localizados nas extremidades, o que levou à diferenças nos perfis de pressão.

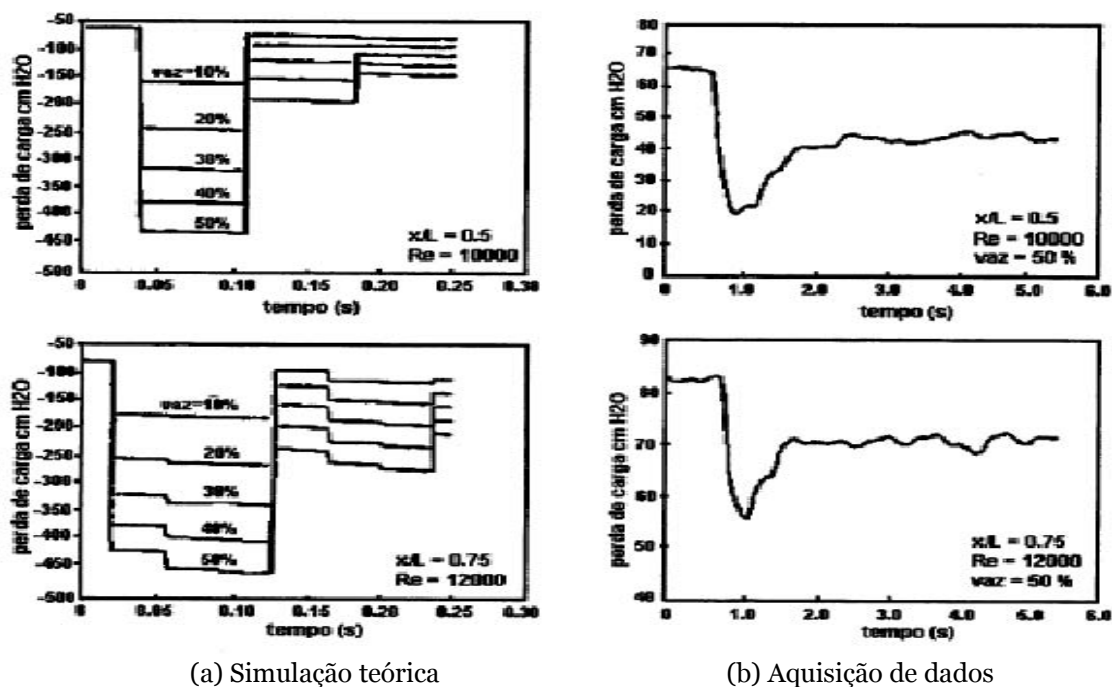


Figura 4: Perfis dos gradientes de pressão
Fonte: Naves, 1991

A partir dos resultados denota-se o aumento da variação da perda de carga com o aumento da vazão do líquido e do vazamento. Esta variação depende da posição do vazamento na tubulação.

Vazamentos da ordem de 0,5% da vazão nominal do escoamento foram detectados, porém, não foi possível a análise do ponto do vazamento. O tempo de detecção constituiu basicamente do tempo de resposta do transdutor, não havendo diferenciação nítida entre os diversos tempos de detecção do transiente de perda de carga para as diferentes posições de vazamento.

Com o objetivo de detectar e localizar vazamentos Buiatti (1995) utilizou-se do método de análise de transientes hidráulicos em uma tubulação de PVC de 427 metros de comprimento, 0,01905 metros de diâmetro. Foram fixados na tubulação 4 transdutores de pressão (do tipo piezoelétrico) a 6,5, 165,1, 262,3 e 420,9 metros da entrada da tubulação e válvulas solenóide-gaveta, responsáveis por gerar e

controlar a magnitude do vazamento, a 85,7, 170,9 e 256,2 metros. Os transdutores e as válvulas foram conectados a um computador equipado com placa conversora A/D e D/A.

Experimentos foram feitos para o regime turbulento, com o número de Reynolds variando de 5000 a 13000. São identificados vazamentos da ordem de 0,5% a 150% da vazão inicial de escoamento, conforme mostra a Figura 5.

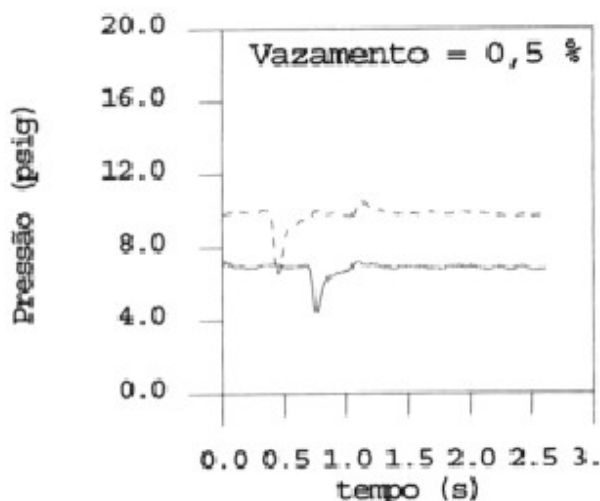


Figura 5: Vazamento entre T1 e T2 com $Re = 9000$
Fonte: Buiatti, 1995

Foi determinado o valor experimental da velocidade de propagação da onda. Os resultados mostram que a velocidade diminui com o aumento da vazão de líquido e da distância entre o vazamento e os transdutores, sendo maior nas regiões de maior pressão no interior da tubulação.

A localização do vazamento pode ser expressa em termos da distância y entre o vazamento e o transdutor mais próximo. Com base na Figura 6, gerou-se as equações 1 e 2 que caracteriza a distância entre o vazamento e o transdutor (y) mediante a velocidade de propagação do fluido.



Figura 6: Esquema de uma tubulação com vazamento entre os transdutores T2 e T3
Fonte: Buiatti, 1995

$$y = \frac{[L_2 + v(t_2 - t_3)]}{2} \quad (1)$$

$$v_{onda} = \frac{L_1}{(t_1 - t_2)} \text{ ou } v_{onda} = \frac{L_3}{(t_4 - t_3)} \quad (2)$$

onde L_2 é a distância entre os transdutores 2 e 3 ; t_2 e t_3 os tempos de detecção dos transdutores T2 e T3 e v_{onda} a velocidade de propagação da onda de pressão.

O método provou ser capaz de localizar vazamentos com precisão, sendo que quanto menor a distância entre os transdutores e o local do vazamento, menor o erro de localização.

Silva (1996) estendeu o trabalho para o regime laminar, com o número de Reynolds variando de 1000 a 12000, em uma tubulação de PVC de 1248 metros de extensão e 0,01905 metros de diâmetro. Vazamentos foram provocados através de válvulas solenóide-gaveta a 250 e 750 metros da entrada da tubulação. A aquisição de dados foi feita por um microcomputador com placa conversora A/D e D/A ligada a 4 transdutores de pressão fixados a 494, 744, 994 e 1244 metros da entrada da tubulação.

Vazamentos da ordem de 9 a 100% foram facilmente detectados. A Tabela 3 demonstra a precisão de localização do vazamento.

Tabela 3: Precisão na detecção de vazamentos
Fonte: Silva, 1996

Re	$y_1 \pm \text{erro (m)}$	$y_2 \pm \text{erro (m)}$
1000	$243 \pm 2,21$	$243 \pm 4,46$
2000	$243 \pm 4,75$	$243 \pm 4,97$
5000	$243 \pm 7,97$	$243 \pm 7,94$
7000	$243 \pm 2,63$	$243 \pm 3,79$
8000	$243 \pm 5,50$	$243 \pm 3,01$
12000	$243 \pm 4,80$	$243 \pm 0,92$

Cariatti (1999) utilizou a tubulação nas mesmas configurações do trabalho desenvolvido por Silva (1996), contudo, a análise do perfil do transiente de pressão foi feita para casos em que o fluido era líquido (água) e misturas gás-líquido (ar-água).

Para tubulações transportando líquido a técnica detecta vazamentos da ordem de 10% em escoamento laminar e 2% em escoamento turbulento. Os valores calculados da velocidade da onda de pressão ficaram na faixa entre 490 e 540 m/s, mostrando-se praticamente independente do número de Reynolds e da magnitude e posição do vazamento, conforme a Figura 7.

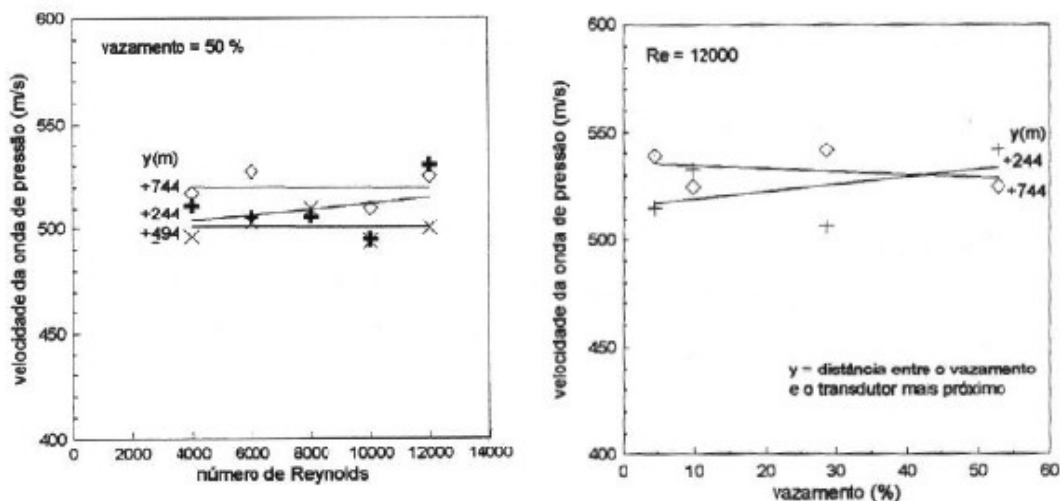


Figura 7: Influencia do número de Reynolds e magnitude do vazamento da onda

Fonte: Ciriatti, 1999

Para mistura gás-líquido diferentes tipos de experimentos foram realizados:

- ✓ Injeção de uma bolha de ar, sem ocorrência de vazamento: a presença da bolha não alterou o valor da pressão ao longo da tubulação.
- ✓ Injeção de múltiplas bolhas, sem ocorrência de vazamento: os pulsos indicam a passagem das ondas de pressão pelos transdutores, o novo estado de equilíbrio alcançado é caracterizado por uma pressão maior do que aquela no estado inicial.
- ✓ Injeção de uma bolha de ar, com ocorrência de vazamento: os resultados mostram que a pressão sofre uma brusca redução, mas seu valor não se recupera totalmente.
- ✓ Escoamento contínuo de uma mistura ar-água, com ocorrência de vazamento: a ocorrência de vazamento foi detectada somente pelos transdutores mais próximos do vazamento e para vazamentos maiores de 30%. A velocidade da onda variou entre 43 e 76 metros por segundo sendo que estes valores são 9 vezes menores do que aqueles medidos em uma

tubulação transportando líquido.

A Figura 8 mostra um exemplo de cada caso. As condições de operação estudadas foram: número de Reynolds entre 2000 a 12000, porcentagem de vazamento entre 2 a 50% e vazão de ar entre 0,28 a 1,6 m³/s.

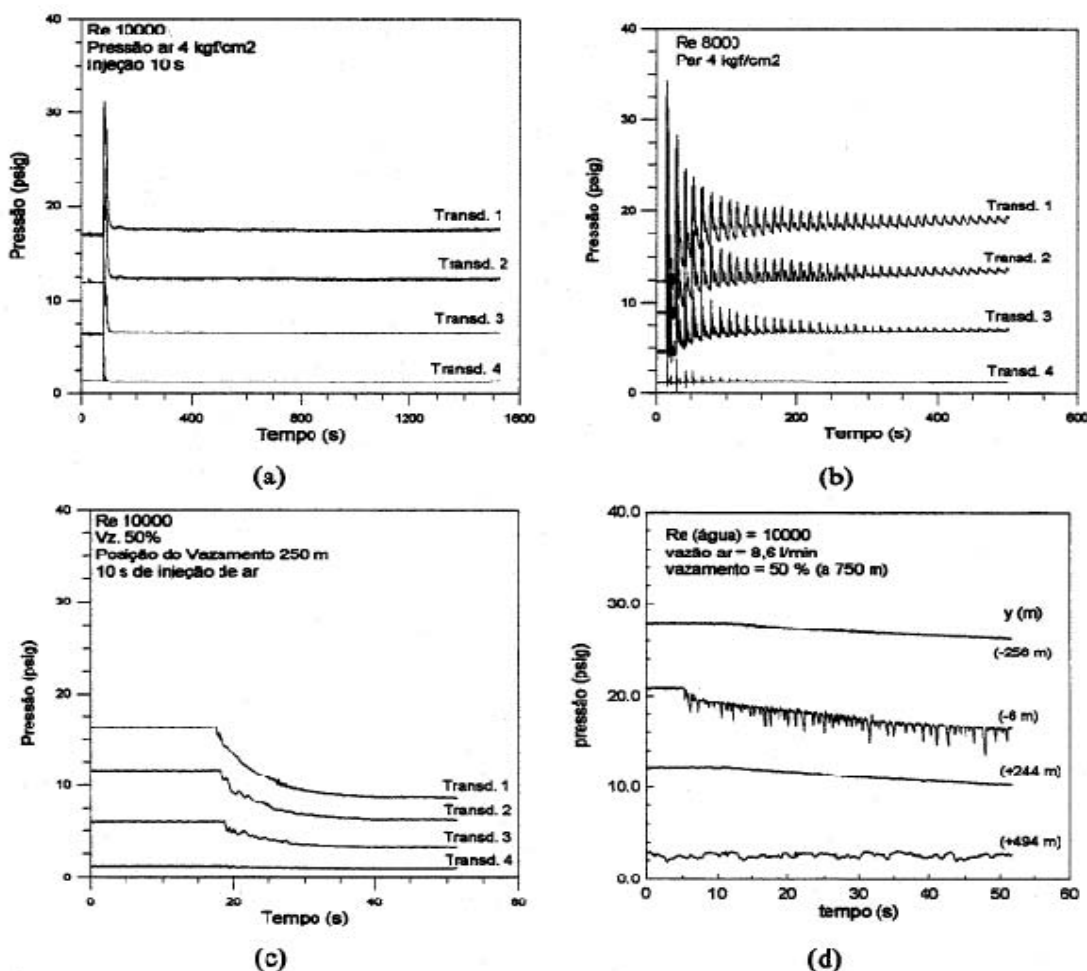


Figura 8: Perfis de pressão
Fonte: Ciriatti, 1999

Resultados mostram que o gás escoando na tubulação absorve grande parte do impacto causado pela onda de pressão, quando da ocorrência de vazamento, e também que existe maior dificuldade de propagação da onda de pressão no sentido contrário ao fluxo da tubulação.

Braga (2001) aprofundou o estudo realizado por Ciriatti (1999), detectando transientes de pressão causados por vazamentos na tubulação de 1248

metros transportando ar-água.

O estudo foi realizado para diferentes condições de operação da tubulação: número de Reynolds do líquido entre 4000 e 10000; porcentagem de vazamento de 10 a 50%; vazão de ar de 0,28 a 10,8 m³/s; posição de vazamento a 250 e 750 metros da entrada da tubulação.

O trabalho experimental constituiu-se na detecção e análise de transientes de pressão gerados para os seguintes casos demonstrados na Figura 9:

- ✓ Injeção de bolhas isoladas de ar, sem vazamento; onde o escoamento das bolhas não altera o perfil da pressão ao longo da tubulação.

- ✓ Para a detecção de vazamentos na presença de uma única bolha de ar, os perfis obtidos mostram uma queda na pressão seguida de uma recuperação parcial. Para número de Reynolds e vazão de ar constante, o aumento na magnitude do vazamento aumenta a queda no valor da pressão e diminui sua recuperação. A detecção é afetada pela distância entre o vazamento e o transdutor e a quantidade de ar, que provoca um amortecimento na onda de pressão. A presença de ar gera reflexões da onda (efeito elástico) que interferem na detecção.

- ✓ Na detecção de vazamentos durante escoamento contínuos ar-água a queda de pressão menor se comparada ao caso anterior devido ao amortecimento. Para vazamentos a 750 metros da entrada, a detecção só é possível para $Re > 6000$ e razão de vazamento maior que 30% da vazão nominal do líquido.

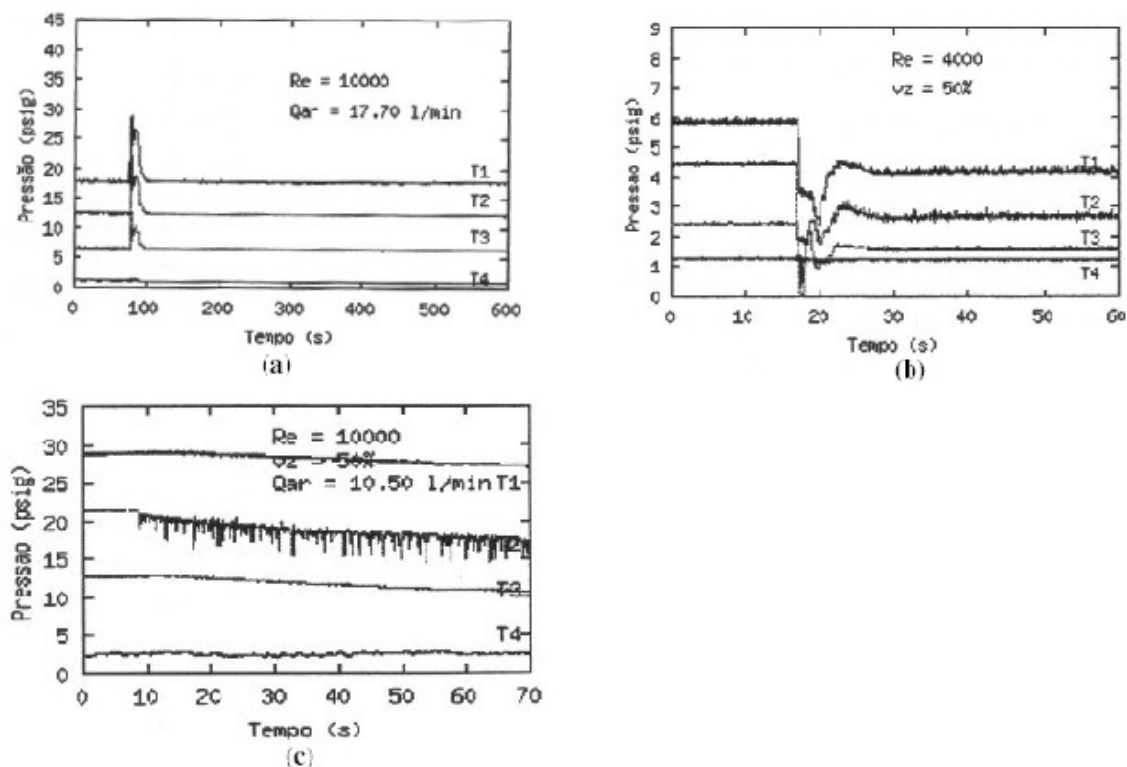


Figura 9: Perfis de transiente de pressão
Fonte: Braga, 2001

Souza (2002) desenvolveu uma técnica de detecção de vazamentos em tubulações baseada na análise espectral de sinais de pressão medidos em trechos da tubulação (zona de reflexão) que favorecem a formação de ondas estacionárias. Este método possibilita a detecção de vazamentos mesmo quando este ocorre durante a realização de operações como partidas e paradas de bombas ou interrupção do fluxo. Estas operações geram transientes que podem encobrir o transiente de pressão gerado pelo vazamento.

Testes experimentais foram realizados em uma tubulação de 1250 metros de extensão em várias configurações de fluxo e de vazamento durante a partida e a parada de uma bomba centrífuga.

Verificou-se que pela medida da fração energética em torno dos harmônicos associados ao trecho de reflexão é possível detectar a presença de vazamentos na tubulação com uma porcentagem de acerto superior a 70%.

Macias (2004), descreve uma técnica de detecção de vazamentos em tubulações de transporte de gás baseada na análise de transientes de pressão simulados e reais. Os transientes de pressão foram detectados e simulados para os casos de tubulações com e sem escoamento em várias condições de operação.

No estudo teórico, perfis da perda de pressão com o tempo foram obtidos através da simulação da ruptura no sistema pressurizado.

Os transientes de pressão provocados por vazamentos foram detectados em uma tubulação de ferro galvanizado de 0,013 metros de diâmetro com 6 metros na detecção estática e 60 metros na detecção com escoamento. Dois transdutores de pressão foram instalados na tubulação e enviam seus sinais de leitura a um computador através de uma placa conversora analógica / digital. Os vazamentos foram simulados através de uma saída lateral onde foi posicionado um orifício com diâmetro variando de 0,0007 a 0,005 metros. A pressão de operação variou de 100 a 600 kPa. Um programa de aquisição de dados foi desenvolvido para ler e filtrar os valores de pressão enviados pelos transdutores.

Os resultados experimentais mostram que é possível detectar na tubulação com escoamento vazamentos maiores de 10% do fluxo nominal. A característica do perfil do transiente de pressão observado para o trecho de tubulação é a mesma daquele encontrado para a tubulação com escoamento contínuo, onde a ocorrência de vazamento provoca uma queda contínua no valor da pressão, um comportamento diferente do observado para tubulações operando com líquidos. A velocidade da onda de pressão foi determinada em aproximadamente 375 metros por segundo. Os resultados simulados foram semelhantes aos experimentais, demonstrando a possibilidade de detecção do vazamento através da análise dos transientes de pressão.

Sinha (2005) demonstra que é possível detectar diversos tipos de defeitos internos a uma tubulação utilizando métodos básicos de análise acústica. As medidas realizadas não contemplam dutos de extensão elevada e não foram

abarcados todos os tipos possíveis de defeitos. A seguir destacam-se as vantagens analisadas por Sinha (2005):

- ✓ As medidas são realizadas a uma distância de 0,0254 metros entre o sensor e a parte interior da tubulação;
- ✓ A técnica permite detectar falhas em todos os tipos dos materiais e tamanhos;
- ✓ As medidas podem ser realizadas ao longo da circunferência da tubulação sem a necessidade de girar a “cabeça” do sensor;
- ✓ A técnica de *swept frequency acoustic interferometry* (SFAI) fornece uma relação sinal / ruído proeminente comparada a outras técnicas convencionais de pulso-eco.
- ✓ A técnica SFAI permite uma operação com consumo baixo de energia, sendo necessário o fornecimento de potência inferior a 1 Watt para o transdutor;
- ✓ Os defeitos na tubulação com profundidade inferior a 0,0005 metros podem ser detectados para uma espessura de parede da tubulação de 0,007 metros. Desta maneira, esta sensibilidade é para a detecção de falhas no lado oposto de uma tubulação perante o lado da medida. O resultado será melhor se o defeito estiver no mesmo lado;
- ✓ Possibilidade de obtenção de uma imagem tri-dimensional da falha na tubulação a partir da “cabeça” do sensor que é movida ao longo da linha central de uma tubulação;
- ✓ Os resultados identificados pela técnica, mesmo sob a pressão ambiente, obtiveram excelente qualidade;

- ✓ Baseado na simulação experimental, as áreas com corrosão na superfície da tubulação podem também ser detectadas;

- ✓ A eletrônica utilizada pode ser miniaturizada. Todos os componentes estão comercialmente disponíveis. Todo o sistema pode ser acomodado dentro de dois módulos de um “robô do explorador”.

No estudo realizado por Sousa (2007) foi detectado e analisado os transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro causados por vazamentos em uma tubulação operando com ar comprimido sem e com alimentação contínua.

Toda a detecção foi realizada através do transdutor de pressão e do microfone localizados em dois pontos ao longo do sistema, primeiramente localizado no interior do vaso de pressão e posteriormente à entrada da tubulação e em ambos os casos os experimentos foram submetidos a várias condições de operação.

Os equipamentos utilizados por Sousa (2007), para a detecção de vazamento foram um transdutor de pressão e um microfone que estavam acoplados a um computador através de uma placa conversora analógica-digital. A pressão interna do sistema variou de 200 a 700 kPa e o diâmetro do orifício (magnitude do vazamento) variou de 0,0004 a 0,0050 metros.

Na conclusão de Sousa (2007), para os experimentos realizados em laboratório através do método acústico e da análise de transiente de pressão, o método acústico apresentou uma melhor eficiência na detecção do vazamento em relação ao método da análise do transiente de pressão. Para toda faixa de diâmetro de orifícios utilizada, as variações das amplitudes dos ruídos sonoros gerados pelo vazamento foram nitidamente detectadas enquanto que os transientes de pressão não apresentaram variações que comprovem o vazamento para orifícios menores que 0,002 metros.

Para Zirnig (2001) todo sistema a ser utilizado para o monitoramento

remoto dos gasodutos deve encaixar-se em duas exigências operacionais:

- ✓ Os dados das rotas monitoradas devem estar disponíveis em intervalos regulares logo após a gravação;
- ✓ A especificação e a qualidade dos dados devem permitir identificar objetos em situações que representam perigo ao gasoduto, baseado num processo automático e que proporcione uma rápida avaliação.

Nos estudos realizados por Ziring (2001), os resultados confirmam que modelos de monitoramento remoto utilizando sensores para avaliação interna e externa de gasodutos, podem ser realizados:

- ✓ Para detecção de falhas externas em gasodutos, podem ser utilizados sensores de imagem latente e técnicas da avaliação da imagem para a detecção automática do objeto, como também, acoplar o sistema *Synthetic Aperture Radar* (SAR) para monitoramento de gasoduto com um grau elevado de independência das condições climáticas;
- ✓ Para detecção de falhas internas e de pequenas dimensões é preeminente a utilização de transmissores e receptores *laser*.

Para o monitoramento utilizando satélites de alta resolução, Ziring (2001) destaca os satélites comerciais ópticos e o SAR, devido a precisão (detecção de objetos de 1 a 3 metros), disponibilidade e confiabilidade dos dados captados. Um pré-requisito fundamental para a avaliação automatizada dos dados (imagem) é a posição dos sistemas da transmissão do gás natural, os quais são definidos com exatidão suficiente no formulário digital num sistema de informação geográfico para transferência ao sistema da avaliação. Os programas que realizam o processamento da imagem, devem adaptar-se as aplicações de monitoramento e detecção de falhas. Finalmente, os dados resultantes necessitam ser interligados nos sistemas de comunicação dos operadores do gasoduto, criando assim os planos de manutenção corretiva e preventiva.

2.2 Pipeline inspection gauge (PIG)

O anagrama é resultante das palavras *pipeline inspection gauge* (PIG), dispõem-se de um dispositivo que é inserido no interior de uma tubulação, usualmente com o objetivo de remover depósitos indesejados e existentes nas paredes. Os PIGs instrumentados doravantes do mesmo conceito, são elementos utilizados na inspeção interna dos dutos.

Com a malha dutoviária de muitos países envelhecida, muitas vezes tendo sofrido pouca manutenção e considerando a crescente preocupação com o meio ambiente, as operadoras de dutos têm investido em programas de reabilitação e de gerenciamento da integridade com o objetivo de estender a vida útil de seus dutos.

A melhoria na qualidade das ferramentas de inspeção interna, tais como PIGs instrumentados de alta resolução, tem colaborado para se obter um retrato mais fiel da existência de corrosão, trincas, defeitos de fabricação, amassamentos entre outras anomalias.

Se por um lado, a informação proveniente da inspeção, permite uma avaliação mais precisa dos defeitos, evitando reparos desnecessários, por outro lado, pode-se mostrar um retrato crítico das condições de integridade do duto, levando à necessidade de executar um grande número de reparos.

As inspeções periódicas com ferramentas do tipo PIG instrumentado definem apenas o estado atual do duto em relação à sua integridade, ficando limitada pelo fato das características do gás natural poderem variar com o tempo e a repetição das inspeções em curtos intervalos de tempo ser antieconômica. Assim, os sistemas de monitoramento se apresentam como uma opção complementar. A inserção de cupons de perda de massa em pontos específicos do duto permite verificar as formas de corrosão. Os cupons devem ser do mesmo material utilizado na fabricação dos sistemas que são monitorados. A Figura 10 demonstra o equipamento utilizado para a instalação dos referidos sistemas, sendo bastante comum o uso de cupons tangenciais à parede interna do duto. A taxa de corrosão é

calculada como se a corrosão fosse exclusivamente uniforme (NÓBREGA, 2005).



Figura 10: Caixa de inspeção com sistemas de monitoramento instalado em campo

Fonte: Nóbrega, 2005

Neste mesmo contexto, Nóbrega (2005), destaca o uso de sensores de resistência elétrica que são feitos também do mesmo material do duto e que complementa os resultados obtidos com cupons. A intensidade da corrosão é associada ao aumento de resistência elétrica e as medidas podem ser obtidas com uma frequência bem maior e mais facilmente, além de permitir calcular a taxa de corrosão instantânea, possibilitando um acompanhamento bem mais preciso de alguma anormalidade na taxa de corrosão. Uma das limitações deste método é que não permite que seja feita uma distinção entre o processo corrosivo localizado e o generalizado, podendo também vir a ter seus resultados mascarados pela presença de depósitos condutores, como sais em geral e sulfeto de ferro, como abordado por

Carvalho (1995).

Os PIGs de alta resolução (baseados no princípio de “fuga de fluxo magnético”) são ferramentas que evoluíram na tentativa de dimensionar, com precisão, os defeitos, para possibilitar os cálculos de avaliação de integridade, evitando falsos alarmes. Basicamente essa evolução se deu pela utilização de sensores de efeito Hall, com dimensão reduzida e que pudessem ocupar toda circunferência, deixando pouquíssima região descoberta. A eficiência desse sistema está atrelada à utilização de magnetos com potência elevada e maior capacidade de saturação da parede do duto, e a um sistema de gravação digital (BUENO, 2006).

Os PIGs considerados de primeira geração apresentam os resultados de forma qualitativa e demandam uma verificação adicional de campo para a certificação da gravidade das indicações. Eles, obviamente, não são aplicáveis a dutos submarinos, nos quais os custos de intervenção são altos e a retirada de cotas das referências poderia demandar vários dias de mergulho na busca das indicações.

A inspeção de dutos que não possibilitem a normal inserção de PIGs, assim classificados por possuírem algum impedimento à sua realização com elemento instrumentado em operação (*in-line inspection*), devido a características construtivas e ao arranjo submarino, tais como mudanças de diâmetros nominais, ramais conectados a “tês” e curvas de raio curto, pode utilizar-se de uma alternativa para a inspeção interna inserindo um tipo específico de PIG instrumentado e ligado por um cabo ao ponto de origem. Esse tipo de inspeção, embora seja a única opção para esses dutos, ainda não foi realizado em razão de apresentar algumas desvantagens. A principal é a necessidade da parada total do escoamento para que seja possível a abertura do duto para introdução da ferramenta. O tempo de parada está diretamente relacionado com a velocidade de deslocamento da ferramenta no duto em torno de 0,28 metros por segundo, computando-se a ida e a volta da ferramenta. Dessa forma, para um duto de 17 quilômetros, seria preciso, no mínimo, que se fizesse uma parada de 17 horas.

Como esse método utiliza a técnica de ultra-som, há necessidade de preenchimento do duto com um fluido líquido. Para os oleodutos, pode-se utilizar o próprio petróleo desde que tomadas às devidas precauções de segurança. Para os gasodutos, existe a necessidade de utilização de um líquido tal como água ou um derivado de petróleo. A utilização de água, além de exigir pré-tratamento e pós-tratamento para remoção de contaminantes, requeria também uma operação de secagem do duto antes da sua entrada em operação, retardando ainda mais o retorno do seu escoamento normal. A superfície interna do duto deve estar limpa, de modo que não barre a passagem do feixe sônico; caso contrário, não haverá leitura nessas áreas. As disposições circunferências dos cabeçotes, normalmente, não permitem uma cobertura total do diâmetro, exigindo-se que se opte por uma distribuição concentrada na geratriz inferior, ou uma distribuição uniforme.

Métodos de inspeção dos dutos

De acordo com diversos fatores do duto como: ambiente, intensidade de utilização, produto transportado, entre outros, devem ser planejados os métodos de inspeção dos dutos ou combinações entre deles, assim como sua periodicidade.

Os principais métodos de inspeção dos dutos são:

- ✓ Inspeção visual: pode ser através do deslocamento de operadores ao longo dos trechos de dutos. A dificuldade deste método são as grandes distâncias a percorrer, incluindo trechos de difícil acesso, e a vantagem é a proximidade de inspeção da parte externa dos dutos e o que a cerca.

- ✓ PIGs: possuem grande capacidade de captação de dados por sensores. Os sensores podem ser mecânicos, magnéticos ou ultra-sônicos, por exemplo. Possuem também a facilidade de acesso a dutos enterrados ou submarinos. A Figura 11 apresenta um PIG de fluxo magnético. Principais funções dos PIGs:

- ✓ inspecionar visualmente, obtendo imagens do interior do duto;
 - ✓ localizar trincas e medir a perda de material de corrosão;
 - ✓ localizar restrições ou válvulas parcialmente abertas;
 - ✓ localizar curvas e determinar o seu raio de curvatura;
 - ✓ levantar a configuração espacial do duto;
 - ✓ detectar vazamentos.
- ✓ Testes hidrostáticos: são realizados na instalação do duto. É colocada água dentro do duto sob pressões maiores que a de trabalho.
- ✓ Monitoramento estático: por meio de extensômetros colocados externamente nos dutos, conhecem-se as tensões e deformações a que o duto está submetido. A Figura 12 mostra um exemplo de um duto instrumentado com extensômetro.
- ✓ Detecção de vazamento: são posicionados sensores ao longo dos dutos para a detecção de vazamentos do produto transportado, bem como monitora-se a pressão interna em cada instante.



Figura 11: PIG de fluxo magnético
Fonte: Battelle, 2006



Figura 12: Duto instrumentado com extensômetro
Fonte: Cesec, 2006

2.3 Processamento Digital de Sinais (PDS)

O Processamento Digital de Sinais (PDS) consiste na análise de sinais de forma a extrair informações dos mesmos e torná-los mais apropriados para alguma aplicação específica.

Existem muitas vantagens no uso de técnicas digitais no tratamento de sinais. Estas vantagens aplicam-se para as mais específicas funções, que não podem ser implementadas em sistemas analógicos. As vantagens do uso de técnicas digitais no processamento de sinais são divididas nas seguintes categorias: programabilidade, estabilidade e facilidade de implementação de algoritmos adaptativos. Pode-se considerar a transmissão de dados, armazenamento e compressão como áreas onde o tratamento digital possui vantagens sobre o processo analógico.

O processamento digital de sinais inicia-se pela digitalização do sinal elétrico, o qual corresponde a conversão de um sinal analógico em um sinal digital. A transformação se faz necessária basicamente, por duas razões: a primeira, as técnicas digitais facilitam bastante o sofisticado processamento do sinal que deve-se realizar, que não seria possível utilizando técnicas de processamento de sinais analógicos; segundo, o processamento digital é mais seguro e pode ser alcançando utilizando circuitos compactos. Todo o processo da digitalização, consiste na amostragem, quantização e codificação do sinal. Conforme Acharya (2005) amostragem é o processo de representar a variação continua do sinal no tempo por amostras, sendo que o número mínimo de amostras é definido pelo critério de Nyquist, o qual define que a frequência de amostragem deve ser maior ou igual a duas vezes a máxima componente de frequência existente no sinal a ser processado. Quando amostra-se um sinal existem infinitos valores que este pode assumir no exato momento em que retira-se uma amostra, sendo assim o processo de quantização envolve a representação aproximada da forma do sinal por valores finitos. A quantidade de valores que este sinal pode assumir, depende do número de *bits* que será utilizado para representar a amostra.

Segundo Acharya (2005), a codificação contempla duas aproximações para análise dos sinais e sistemas. A primeira trabalha com a forma de onda em tempo real, utilizando a média temporal e argumentos de tempo para obter os resultados desejados. A segunda trabalha com o método espectral o qual verifica as propriedades estacionárias e ergóticas. Nas Figuras, 13 a 15, detalham-se todas as etapas do processamento digital de sinais.

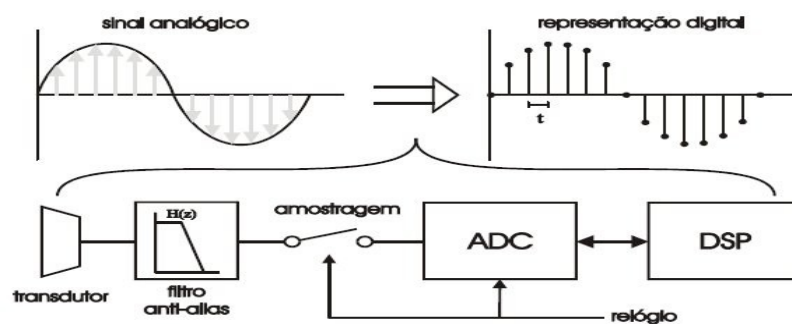


Figura 13: Conversão Analógica/Digital (A/D)

Fonte: Acharya, 2005



Figura 14: Diagrama em bloco de um sistema de Processamento Digital de Sinais

Fonte: Acharya, 2005

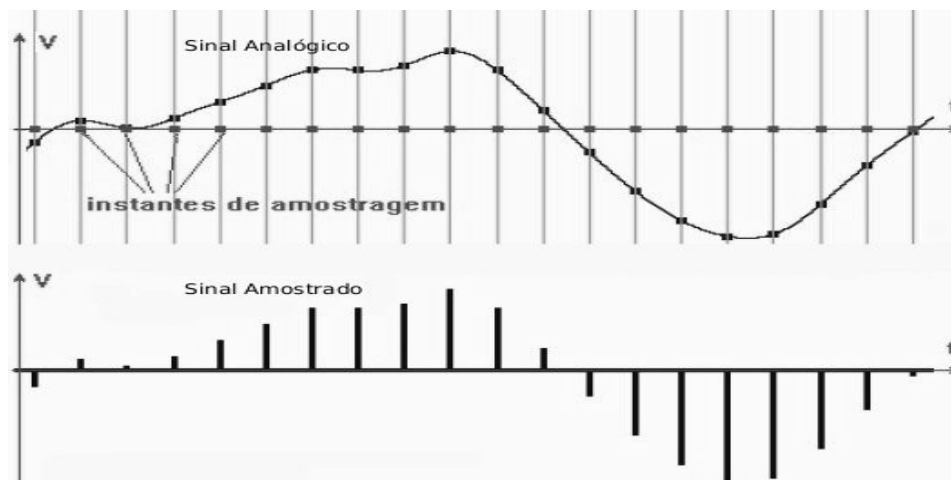


Figura 15: Amostragem de sinal

Fonte: Acharya, 2005

Aplicando os conceitos de processamento digital de sinais, Jähne (2002) aborda com propriedade o Processamento Digital de Imagens (PDI), que contempla como princípio a captura de uma imagem, a qual, normalmente, corresponde à iluminação que é refletida na superfície dos objetos, realizada através de um sistema de aquisição. Após a captura por um processo de digitalização, uma imagem precisa ser representada de forma apropriada para tratamento computacional. Imagens podem ser representadas em duas ou mais dimensões. O primeiro passo efetivo de processamento é comumente conhecido como pré-processamento, o qual envolve passos como a filtragem de ruídos introduzidos pelos sensores e a correção de distorções geométricas causadas pelo sensor.

Uma cadeia maior de processos é necessária para a análise e identificação de objetos.

Primeiramente, características ou atributos das imagens precisam ser extraídos, tais como as bordas, texturas e vizinhanças. Outra característica importante é o movimento. Em seguida, objetos precisam ser separados do plano de fundo, o que significa que é necessário identificar, através de um processo de segmentação, características constantes e descontinuidades. Esta tarefa pode ser simples, se os objetos são facilmente destacados da imagem de fundo, mas normalmente este não é o caso, sendo necessárias técnicas mais sofisticadas como regularização e modelagem. Essas técnicas usam várias estratégias de otimização para minimizar o desvio entre os dados de imagem e um modelo que incorpora conhecimento sobre os objetos da imagem. Essa mesma abordagem matemática pode ser utilizada para outras tarefas que envolvem restauração e reconstrução. A partir da forma geométrica dos objetos, resultante da segmentação, pode-se utilizar operadores morfológicos para analisar e modificar essa forma bem como extrair informações adicionais do objeto, as quais podem ser úteis na sua classificação. A classificação é considerada como uma das tarefas de mais alto nível e tem como objetivo reconhecer, verificar ou inferir a identidade dos objetos a partir das características e representações obtidas pelas etapas anteriores do processamento.

Não obstante, deve-se observar que, para problemas mais complexos, são necessários mecanismos de retro-alimentação entre as tarefas de modo a ajustar parâmetros como aquisição, iluminação, ponto de observação, para que a classificação se torne possível (JÄHNE, 2002).

Uma imagem monocromática é uma função bidimensional contínua $f(x,y)$, na qual x e y são coordenadas espaciais e o valor de f em qualquer ponto (x,y) é proporcional à intensidade luminosa no ponto considerado. Como os computadores não são capazes de processar imagens contínuas, mas apenas *arrays* de números digitais, é necessário representar imagens como arranjos bidimensionais de pontos.

Cada ponto na grade bidimensional que representa a imagem digital é denominado elemento de imagem ou *pixel*. Na Figura 16, apresenta-se a notação matricial usual para a localização de um *pixel* no arranjo de *pixels* de uma imagem bidimensional. O primeiro índice denota a posição da linha, m , na qual o *pixel* se encontra, enquanto o segundo, n , denota a posição da coluna. Se a imagem digital contiver M linhas e N colunas, o índice m variará de 0 a $M-1$, enquanto n variará de 0 a $N-1$. Observe-se o sentido de leitura e a convenção usualmente adotada na representação espacial de uma imagem digital.

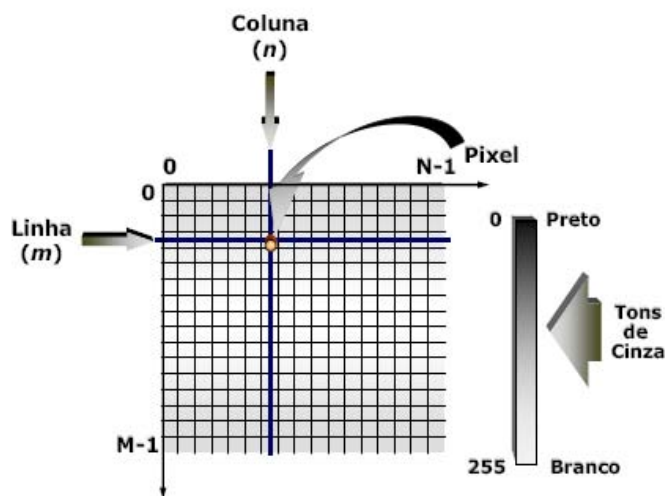


Figura 16: Representação de uma imagem digital bidimensional
Fonte: Jähne, 2002

A intensidade luminosa no ponto (x,y) pode ser decomposta em: (i) componente de iluminação, $i(x,y)$, associada à quantidade de luz incidente sobre o ponto (x,y) ; e a componente de reflectância, $r(x,y)$, associada à quantidade de luz refletida pelo ponto (x,y) (GONZALEZ, 2002). O produto de $i(x,y)$ e $r(x,y)$ resulta na equação 3:

$$f(x,y) = i(x,y).r(x,y) \quad (3)$$

na qual $0 < i(x,y) < \infty$ e $0 < r(x,y) < 1$, sendo $i(x,y)$ dependente das características da fonte de iluminação, enquanto $r(x,y)$ dependente das características das superfícies dos objetos.

Em uma imagem digital colorida no sistema RGB, um pixel pode ser visto como um vetor cujas componentes representam as intensidades de vermelho, verde e azul de sua cor. A imagem colorida pode ser vista como a composição de três imagens monocromáticas, conforme descrita na equação 4:

$$f(x,y) = f_R(x,y) + f_G(x,y) + f_B(x,y) \quad (4)$$

na qual $f_R(x,y)$, $f_G(x,y)$, $f_B(x,y)$ representam, respectivamente, as intensidades luminosas das componentes vermelha, verde e azul da imagem, no ponto (x,y) . Na Figura 17, são apresentados os planos monocromáticos de uma imagem e o resultado da composição dos três planos. Os mesmos conceitos formulados para uma imagem digital monocromática aplicam-se a cada plano de uma imagem colorida.

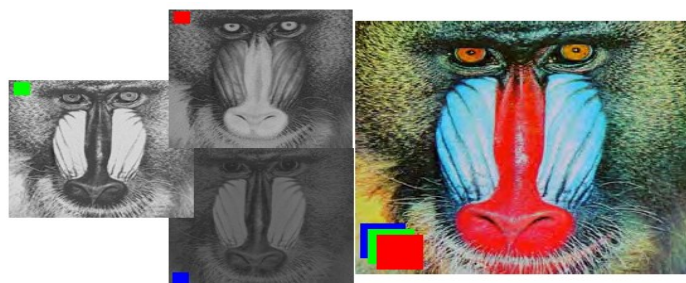


Figura 17: Representação dos planos monocromáticos de uma imagem digital
Fonte: Gonzalez, 2002

Mediante a necessidade de armazenamento e processamento das imagens em um computador, torna-se necessária sua discretização tanto nas coordenadas espaciais quanto de valores de brilho. O processo de discretização das coordenadas espaciais denomina-se amostragem, enquanto a discretização dos valores de brilho denomina-se quantização (ACHARYA, 2005). Usualmente, ambos os processos são uniformes, o que implica a amostragem da imagem $f(x,y)$ em pontos igualmente espaçados, distribuídos na forma de uma matriz $M \times N$, na qual cada elemento é uma aproximação do nível de cinza da imagem no ponto amostrado para um valor no conjunto $\{0, 1, \dots, L - 1\}$, conforme a equação 5.

$$F \approx \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M,0) & f(M,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Costuma-se associar o limite inferior (0) da faixa de níveis de cinza de um pixel ao preto e ao limite superior ($L-1$) ao branco. *Pixels* com valores entre 0 e $L-1$ serão visualizados em diferentes tons de cinza, os quais serão tão mais escuros quanto mais próximo de zero forem seus valores. Uma vez que os processos de amostragem e quantização implicam a supressão de informação de uma imagem analógica, seu equivalente digital é uma aproximação, cuja qualidade depende essencialmente dos valores de M , N e L . Usualmente, o número de valores de brilho, L , é associado a potências de 2 verificado na equação 6:

$$L = 2^l \quad (6)$$

com l pertencente ao conjunto dos números naturais. Assim sendo, a equação 7 demonstra o número de *bits* (b) necessário para representar uma imagem digital de dimensões $M \times N$.

$$b = M \times N \times l \quad (7)$$

Percebe-se, a partir da equação (7), que embora o aumento de M, N e l implique a elevação da qualidade da imagem, isto também implica o aumento do número de *bits* necessários para a codificação binária da imagem e, por conseguinte, o aumento do volume de dados a serem armazenados, processados e/ou transmitidos (ACHARYA, 2005). A Tabela 4 contém o número de *bytes* empregado na representação de uma imagem digital monocromática para alguns valores típicos de M e N, com 2, 5 e 8 níveis de cinza.

Tabela 4: Número de *bytes* para uma imagem monocromática

Fonte: Acharya, 2005

M	N	Número	de	<i>bytes</i>
		L = 2	L = 32	L = 256
480	640	38400	192000	307200
600	800	60000	300000	480000
768	1024	98304	491520	786432
1200	1600	240000	1200000	1920000

O número de amostras e o número de níveis de cinza necessários para a representação de uma imagem digital de qualidade adequada é função tanto de características da imagem, tais como suas dimensões e a complexidade dos alvos nela contidos, quanto da aplicação à qual se destina. Nas Figuras 18(A) a 18(D), ilustra-se a influência dos parâmetros de digitalização na qualidade visual de uma imagem monocromática.



Figura 18: Influência da variação do número de amostras e de níveis de quantização na qualidade de uma imagem digital: (A) 200 x 200 *pixels*/ 256 níveis; (B) 100 x 100 *pixels*/ 256 níveis; (C) 25 x 25 *pixels* / 256 níveis; e (D) 200 x 200 *pixels* / 2 níveis

Fonte: Acharya, 2005

Em geral, costuma-se amostrar de forma idêntica os diferentes planos de uma imagem colorida. O número de cores que um pixel pode assumir em uma imagem RGB com L_R níveis de quantização no plano R, L_G no plano G e L_B no plano B.

Considerando a equação (8), se $l_R = \log_2(L_R)$, $l_G = \log_2(L_G)$ e $l_B = \log_2(L_B)$, o número de *bits* por *pixel* necessário para representar as cores será igual a $l_R + l_G + l_B$ e o número de *bits* necessário para representar uma imagem digital de dimensões $M \times N$ será:

$$b = M \times N \times (l_R + l_G + l_B) \quad (8)$$

Seja, por exemplo, $L_R = L_G = L_B = 2^8 = 256$ níveis de cinza possíveis em cada banda. Assim sendo, cada *pixel* da imagem colorida poderá assumir uma das 16.777.216 cores da paleta, uma vez que será representado por $3 \times 8 = 24$ *bits*. A Tabela 5 contém o número de bytes empregados na representação de uma imagem digital colorida para alguns valores típicos de M e N , com 2, 5 e 8 níveis de cinza.

Tabela 5: Número de *bytes* para uma imagem colorida
 Fonte: Acharya, 2005

M	N	Número	de	bytes
		L = 2	L = 32	L = 256
480	640	115200	576000	921600
600	800	180000	900000	1440000
768	1024	294912	1474560	2359296
1200	1600	720000	3600000	5760000

A representação do hardware e o diagrama em blocos da Figura 19 ilustram os componentes de um sistema de uso geral tipicamente utilizado para o processamento digital de imagens (JÄHNE, 2002). No tocante à aquisição de imagens digitais, afiguram-se relevantes dois elementos, a saber:

- ✓ o dispositivo físico sensível à faixa de energia irradiada pelo alvo de interesse;
- ✓ o dispositivo conversor da saída do o dispositivo físico de sensoramento em um formato digital.

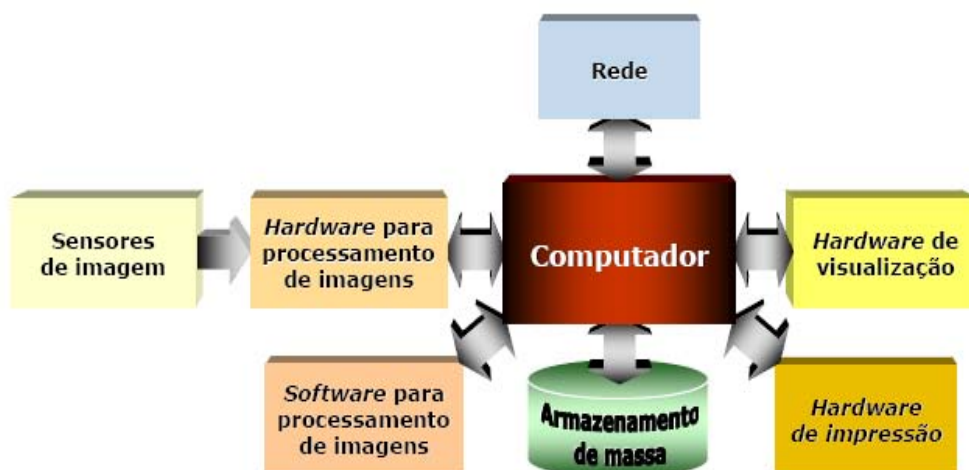


Figura 19: Diagrama em blocos de um sistema típico para processamento de imagens
 Fonte: Jähne, 2002

Segundo Jähne (2002), o armazenamento é um dos grandes desafios para a área de processamento de imagens, uma vez que os sistemas de aquisição vêm sendo cada vez mais aprimorados para a captura de elevados volumes de dados. Neste ínterim, a requisição por dispositivos com maior capacidade de armazenamento é imprescindível, além da alteração nas taxas de transferência de dados e nos índices de robustez e confiabilidade do processo de armazenamento.

Nas operações realizadas sobre as imagens destacam-se:

- ✓ Operações no domínio do espaço;
- ✓ Modificação histográfica;
- ✓ Filtragem espacial;
- ✓ Morfologia matemática;
- ✓ Segmentação;
- ✓ Extração de características e reconhecimento.

As operações no domínio do espaço são caracterizadas pela manipulação direta dos *pixels* da imagem. Pode-se representar uma operação genérica sobre uma seqüência de n imagens (f_{e_n}), conforme Figura 20(A), produzindo uma imagem de saída f_s .

Operações desta natureza são denominadas n -árias, uma vez que a imagem de saída resulta de uma combinação de duas ou mais imagens de entrada. Quando $n = 1$, uma operação unária, a partir da qual uma única imagem de entrada produz uma imagem de saída demonstrada na Figura 20(B).

As operações no domínio do espaço podem ser classificadas, no tocante ao escopo de ação, como pontuais ou locais. Nas operações pontuais, cada *pixel* da imagem de saída depende apenas do mesmo correspondente na imagem de entrada. Assim, qualquer operação pontual pode ser interpretada como um mapeamento de *pixels* da imagem de entrada para a imagem de saída. A Figura 21 ilustra genericamente uma operação pontual unária.

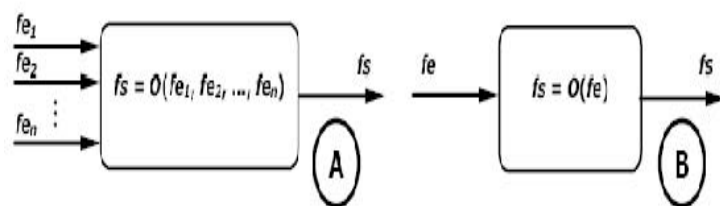


Figura 20: Operação no domínio do espaço: (A) n-árias; (B) unárias
Fonte: Jähne, 2002

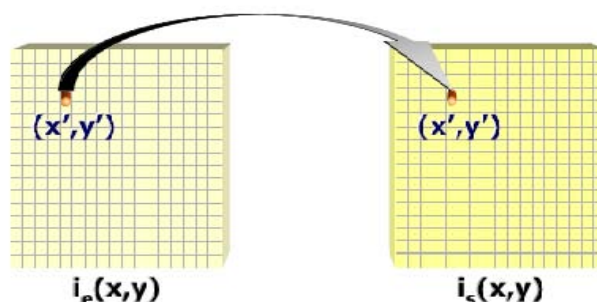


Figura 21: Operação pontual unária
Fonte: Jähne, 2002

Cada ponto da imagem de saída, $f_s(x,y)$, é obtido por: uma operação entre os pontos de coordenadas homólogas das imagens de entrada, $f_{e1}(x,y)$, $f_{e2}(x,y)$, $f_{en}(x,y)$; ou transformação do ponto de coordenadas homólogas da imagem de entrada, $f_e(x,y)$.

No tocante à operação, esta pode ser qualquer operação aritmética, lógica, de comparação entre outras, admitida pela natureza dos valores dos pontos das

imagens. A transformação deverá ser uma função unívoca com um domínio equivalente à faixa de valores permitidos para a imagem de entrada (ACHARYA, 2005). Transformações dessa natureza são comumente realizadas a partir de tabelas de transformação (LUT - *look-up tables*) e interpretadas a partir de diagramas como aquele ilustrado na Figura 22.

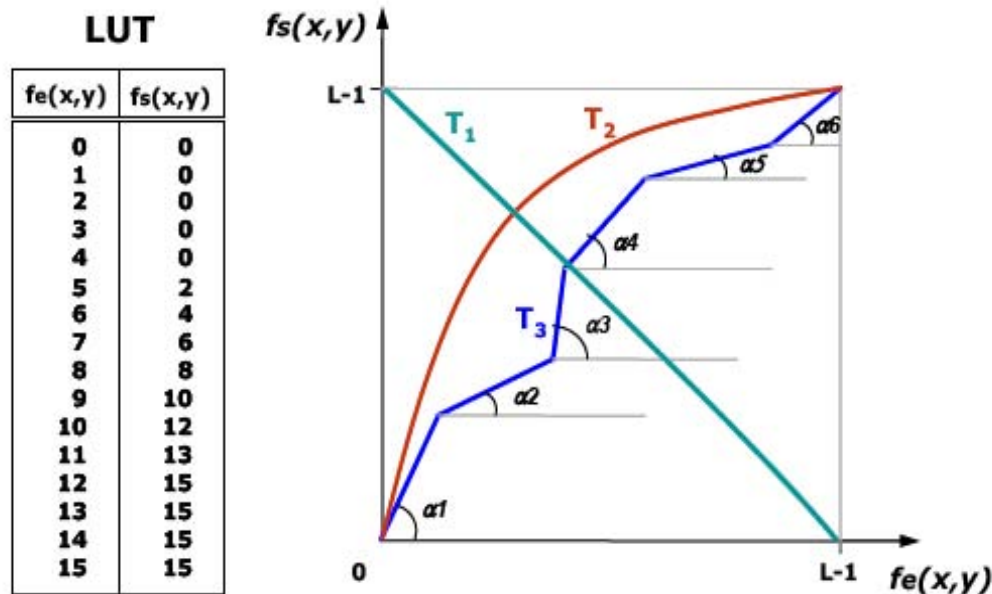


Figura 22: Exemplo de LUT e diagramas de transformação
Fonte: Acharya, 2005

Por outro lado, nas operações locais, o valor de saída em uma coordenada específica depende de valores de entrada daquela coordenada e sua vizinhança. As vizinhanças tipicamente utilizadas em operações locais estão na Figura 23. A vizinhança 4-conectada envolve os vizinhos mais próximos do *pixel* considerado, enquanto a vizinhança 8-conectada envolve tanto os vizinhos mais próximos quanto os mais distantes do *pixel* considerado. É conveniente mencionar é possível processar grades de *pixels* hexagonais, é, que neste caso, operações locais envolverão apenas os 6 vizinhos mais próximos (ACHARYA, 2005).

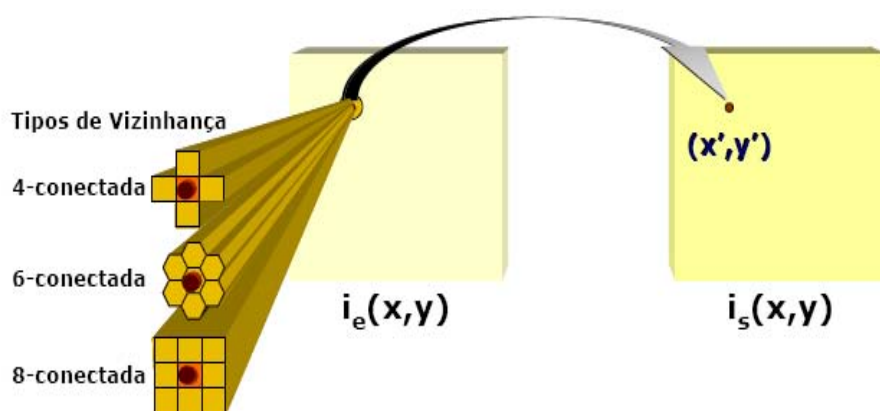


Figura 23: Exemplo de vizinhanças utilizadas em operadores locais
 Fonte: Acharya, 2005

A modificação Histogrâmica, destacada pelo realce do contraste, visa a melhoria da qualidade das imagens sob o ponto de vista subjetivo do olho humano, sendo usualmente empregada como uma etapa de pré-processamento em aplicações de reconhecimento de padrões. O contraste entre dois alvos de uma cena pode ser definido como a razão entre os seus níveis de cinza médios.

Fundamentada neste conceito, a manipulação do contraste dos objetos presentes em uma imagem digital consiste em um re-mapeamento radiométrico de cada *pixel* da imagem, a fim de aumentar a discriminação visual entre eles. Embora a escolha do mapeamento adequado seja, em princípio, essencialmente empírica, uma análise prévia do histograma da imagem se afigura, em muitos casos, bastante útil.

O histograma de uma imagem traduz a distribuição estatística dos seus níveis de cinza. Trata-se, pois, de uma representação gráfica do número de *pixels* associado a cada nível de cinza presente em uma imagem, podendo também ser expressa em termos do percentual do número total de *pixels* na imagem. Assim sendo, dada uma imagem digital $f(x,y)$ com M linhas e N colunas, seu histograma, $H_f(C)$, pode ser definido pela equação 9:

$$H_f(C) = \frac{n_c}{(M \times N)} \quad (9)$$

sendo n_c o número de vezes em que o nível de cinza C se apresenta na imagem. A Figura 24 ilustra alguns exemplos de histogramas.

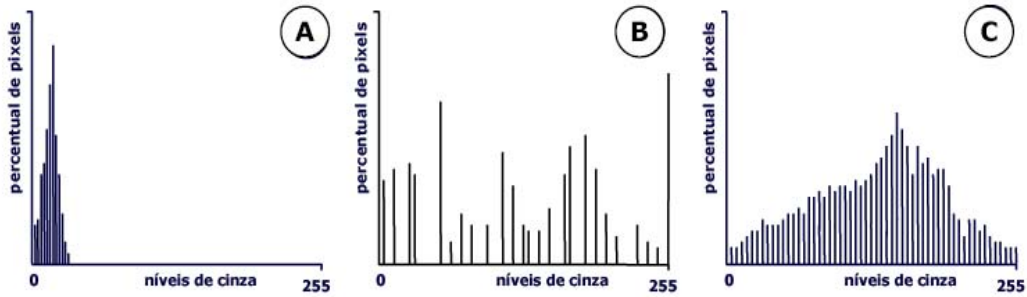


Figura 24: Histogramas: (A) imagem com baixo contraste; (B) imagem usando toda a faixa de tons de cinza, com dois tons de cinza dominantes; e (C) imagem usando toda a faixa de tons de cinza, com componentes ocupando a faixa de modo mais equidistante
Fonte: Acharya, 2005

O processo de equalização de histograma visa o aumento da uniformidade da distribuição de níveis de cinza de uma imagem, sendo usualmente empregado para realçar diferenças de tonalidade na imagem e resultando, em diversas aplicações, em um aumento significativo no nível de detalhes perceptíveis. Um modo simples de equalizar o histograma de uma imagem de dimensões $M \times N$ com L níveis de cinza advém da transformação verificada na equação 10:

$$T(n_{ce}) = rnd \left\left[\left[\frac{(L-1)}{((M \cdot N) \cdot H_f(n_{ce}))} \right] \right] \right\} \quad (10)$$

na qual rnd representa o arredondamento do resultado da expressão para o inteiro mais próximo. Na Figura 25, exemplifica-se processo da equalização histogrâmica.

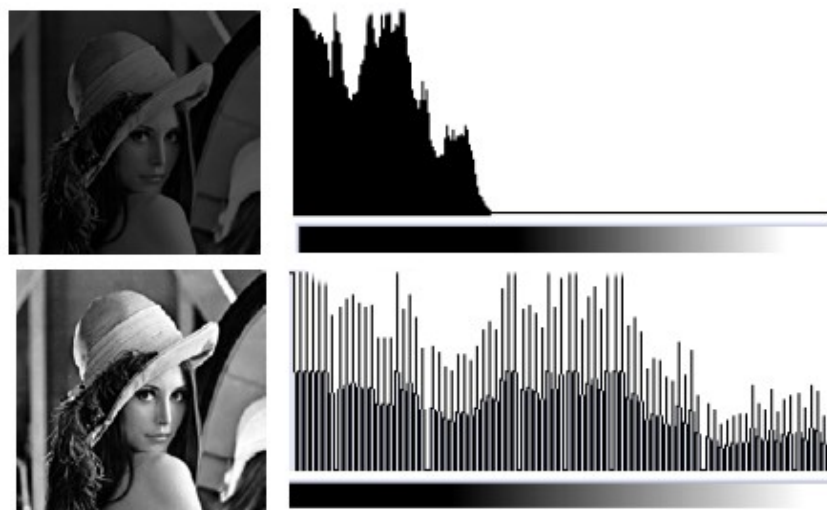


Figura 25: Exemplo de equalização histogrâmica
 Fonte: Acharya, 2005

Imagens apresentam áreas com diferentes respostas espectrais, delimitadas por áreas geralmente estreitas denominadas bordas (GONZALEZ, 2002). Tais limites usualmente ocorrem entre objetos distintos presentes na imagem, podendo também representar o contato entre áreas com diferentes condições de iluminação, em função dos ângulos formados entre a radiação incidente e os planos da cena imageada. Assim sendo, as bordas representam, em imagens monocromáticas, alterações bruscas entre intervalos de níveis de cinza. Sua representação gráfica é caracterizada por gradientes acentuados. Correspondem usualmente as feições de alta frequência - limites entre áreas iluminadas e sombreadas, redes naturais e artificiais, dentre outras. Em contraponto, os alvos que variam mais uniformemente com a distância apresentam-se, em geral, sob a forma de regiões homogêneas, correspondendo a áreas uniformes em imagens.

Similarmente às técnicas de manipulação de contraste, as técnicas de filtragem de uma imagem implicam transformações *pixel a pixel*. Todavia, diferem daquelas à medida que a alteração efetuada em um *pixel* da imagem filtrada

depende não apenas do nível de cinza do *pixel* correspondente na imagem original, mas também dos valores dos níveis de cinza dos *pixels* situados em sua vizinhança. Sendo uma operação local, a filtragem espacial é uma transformação dependente do contexto em que se insere cada *pixel* considerado (GONZALEZ, 2002).

Gonzalez (2002) descreve, também, que a filtragem espacial se fundamenta em uma operação de convolução de uma máscara e da imagem digital considerada. A máscara é um arranjo matricial de dimensões inferiores às da imagem a ser filtrada e, em geral, quadrado, cujos valores são definidos como fatores de ponderação a serem aplicados sobre *pixels* da imagem. A operação é executada progressivamente sobre os *pixels* da imagem, coluna a coluna, linha a linha, como ilustrado na Figura 26.

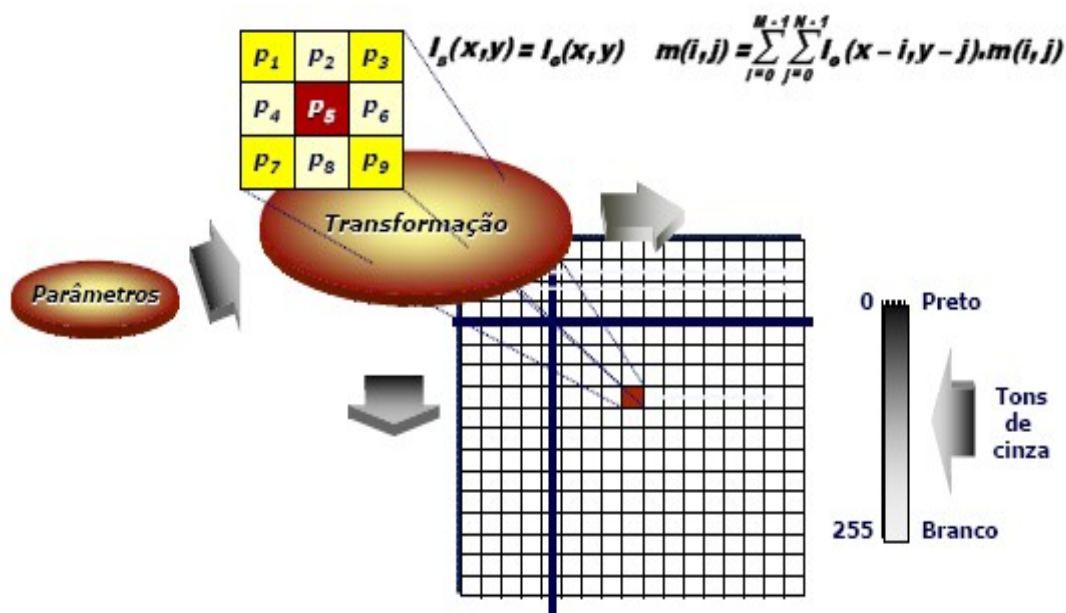


Figura 26: Representação gráfica do processo de filtragem espacial
Fonte: Gonzalez, 2002

Dentre os filtros mais comuns utilizados em processamento digital de imagens encontram-se os da média, da mediana e da moda, todos destinados à suavização da imagem. Estes filtros atenuam variações abruptas nos níveis de cinza

da imagem, o que possibilita sua aplicação à redução de ruído de origens diversas.

O filtro da média de ordem n produz como valor do *pixel* processado, a cada iteração da convolução da máscara de filtragem com a matriz de imagem original, a média aritmética dos valores dos *pixels* em uma vizinhança de (i, j) contendo n *pixels*. Assim sendo, a suavização produzida é função do tamanho da vizinhança considerada: quanto maiores as dimensões da máscara utilizada, mais forte será a suavização das bordas das regiões na imagem filtrada. Na Figura 27, ilustra-se o efeito de filtragem de uma imagem ruidosa com máscaras 3x3 e 5x5.



Figura 27: Filtro da média: (A) imagem original; (B) imagem ruidosa; (C) imagem filtrada com máscara 3x3; e (D) imagem filtrada com máscara 5x5
Fonte: Gonzalez, 2002

Enquanto os filtros da média, da moda e da mediana são empregados na suavização de imagens, outra categoria de filtros espaciais, tais como os operadores de gradiente, produzem a acentuação de regiões de uma imagem nas quais ocorrem variações significativas de níveis de cinza. Na equação 11 define-se como gradiente de uma função f , contínua em (i, j) , o vetor:

$$G[f(i, j)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial i} \\ \frac{\partial f}{\partial j} \end{bmatrix} \quad (11)$$

O vetor $G[f(i, j)]$ aponta no sentido da maior taxa de variação de $f(i, j)$, sendo sua amplitude, $G[f(i, j)]$, dada pela equação 12:

$$G[f(i, j)] = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial i} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial j} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

que é uma representação da taxa de variação de $f(i, j)$ por unidade de distância no sentido de G . A equação (11) embasa uma série de abordagens de diferenciação de imagens digitais.

Uma propriedade importante da amplitude do gradiente é a sua isotropia (independência em relação à direção do gradiente), o que possibilita a detecção de bordas independentemente da sua orientação. As desvantagens apresentadas por este operador são ser não-linear e perder a informação da direção das bordas, devido ao cálculo dos quadrados (ACHARYA, 2005).

O cálculo do gradiente pode ser obtido através de aproximações numéricas. Na horizontal, a aproximação é dada pela diferença dos níveis de cinza de dois *pixels* consecutivos, $G_x = f(i, j) - f(i+1, j)$ e, similarmente, na vertical por $G_y = f(i, j+1) - f(i, j)$.

Ao estimar o gradiente, a partir de aproximações numéricas, apresenta como desvantagem o cálculo da derivada horizontal e a vertical em pontos diferentes, conforme equação 13:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } G_y = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

a equação 14 demonstra uma maneira de contornar a partir da utilização de janelas

quadradas:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Pode-se obter a segunda derivada a partir do Laplaciano dos níveis de cinza da imagem $f(x, y)$, conforme equação 15:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial i^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial j^2} \quad (15)$$

Além da isotropia, a segunda derivada possibilita a preservação da informação de qual o lado mais claro ou escuro da borda. Contrariamente ao gradiente, cujas amplitudes elevadas traduzem a existência de bordas, no Laplaciano são os cruzamentos por zero (alternância de sinal entre *pixels* adjacentes) que o fazem, conforme observa-se na Figura 28.

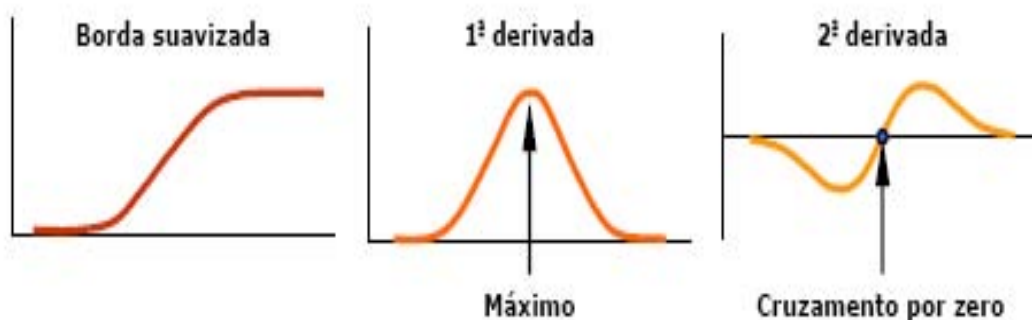


Figura 28: Verificação da existência de uma borda a partir do gradiente e do Laplaciano
Fonte: Acharya, 2005

No espaço 2-D, as aproximações numéricas resultam na seguinte janela de convolução, apresentadas pela equação 16:

$$\nabla^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Embora haja uma grande variedade de operadores de gradiente, serão mencionados aqui apenas os operadores de Roberts, Prewitt e Sobel. Na equação 17 o operador de Roberts (2 x 2) executa o gradiente cruzado, sendo o cálculo das diferenças dos níveis de cinza é executado em uma direção rotacionada de 45°, ao invés do cálculo nas direções horizontal e vertical.

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ e } G_y = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Pela equação 18, além da diferenciação, sem o enviesamento do gradiente digital, o operador de Prewitt suaviza a imagem, atenuando o ruído.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Similar ao operador de Prewitt, a equação 19 demonstra que o operador de Sobel difere apenas no tocante aos pesos conferidos aos vizinhos mais próximos não nulos do *pixel* central, apresentando sobre aquele a vantagem de produzir bordas diagonais menos atenuadas.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A morfologia digital ou matemática é uma modelagem destinada à descrição ou análise da forma de um objeto digital. O modelo morfológico para a análise de imagens fundamenta-se na extração de informações a partir de transformações morfológicas, nos conceitos da álgebra booleana e na teoria dos conjuntos e reticulados. O princípio de morfologia digital se embasa no fato de que a imagem é um conjunto de pontos elementares que formam subconjuntos elementares bi ou tridimensionais. Os subconjuntos e a inter-relação entre eles formam estruturalmente a morfologia da imagem. Determinadas operações matemáticas em conjuntos de *pixels* podem ser usadas para ressaltar aspectos específicos das formas permitindo que sejam contadas ou reconhecidas.

As operações básicas da morfologia digital são:

- ✓ erosão, a partir da qual são removidos da imagem e *pixels* que não atendem a um dado padrão;
- ✓ dilatação, a partir da qual uma pequena área relacionada a um *pixel* é alterada para um dado padrão.

Todavia, dependendo do tipo de imagem sendo processada (preto e branco, tons de cinza ou colorida) a definição destas operações muda, de forma que cada tipo deve ser considerado separadamente. Todas as demais operações e transformações são expressões baseadas nos operadores básicos dos conjuntos, algumas interativas, e nos dois operadores básicos da morfologia matemática.

Seja a imagem da Figura 29, na qual há dois objetos ou conjuntos de *pixels* A e B. Observe-se a utilização do sistema de coordenadas (n, m). Considere-se que os valores que os *pixels* podem assumir são binários. Assim, é possível restringir a análise ao espaço discreto Z^2 .

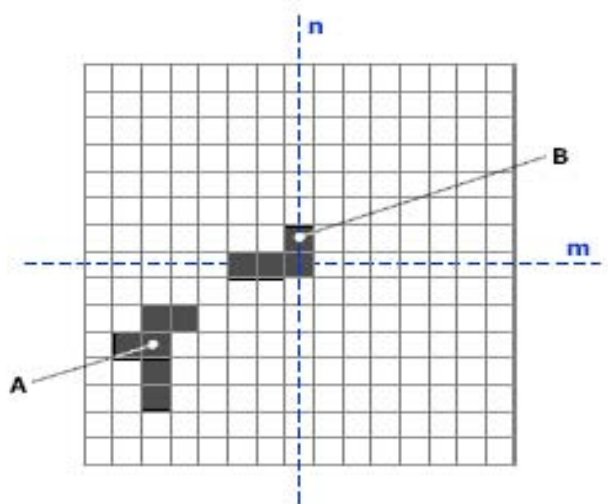


Figura 29: Imagem binária contendo 2 objetos (2 conjuntos de pontos)
 Fonte: Acharya, 2005

Em processos de análise de imagens, faz-se necessária a extração de medidas, características ou informação de uma dada imagem por métodos automáticos ou semi-automáticos. A primeira etapa da análise de imagem é, em geral, caracterizada por sua segmentação, que consiste na subdivisão da imagem em partes ou objetos constituintes. Em geral, a segmentação é uma das tarefas mais difíceis no âmbito do processamento de imagens, sendo determinante para o eventual sucesso ou fracasso de todo o processo de análise. Algoritmos de segmentação possibilitam a identificação de diferenças entre dois ou mais objetos, assim como a discriminação das partes tanto entre si quanto entre si e o plano de fundo da imagem. No tocante à segmentação de imagens monocromáticas, os algoritmos fundamentam-se, em essência, na descontinuidade e na similaridade dos níveis de cinza. A fundamentação na descontinuidade consiste no particionamento da imagem em zonas caracterizadas por mudanças bruscas dos níveis de cinza. O interesse recai usualmente na detecção de pontos isolados, de linhas e de bordas da imagem. Por outro lado, a fundamentação na similaridade consiste na limiarização e no crescimento de regiões (ACHARYA, 2005).

Uma vez que a imagem foi segmentada, a próxima tarefa é reconhecer os objetos ou regiões resultantes. Assim, o objetivo do reconhecimento de padrões é identificar objetos na cena a partir de um conjunto de medições. Cada objeto é um padrão e os valores medidos são as características desse padrão. Um conjunto de objetos similares, com uma ou mais características semelhantes são considerados como pertencentes à mesma classe de padrões. Existem várias características, para tanto existe uma técnica específica para obtenção destas características específicas. Em adição, características de mais alta ordem são formadas pela combinação de características mais simples. Como exemplo, cada letra do alfabeto é composta por um conjunto de características como linhas verticais, horizontais e inclinadas, bem como segmentos curvilíneos. Enquanto a letra A pode ser descrita por duas linhas inclinadas e outra horizontal, a letra B pode ser descrita por uma linha vertical e 2 curvilíneas conectadas em pontos específicos. Outras características relevantes para um objeto de duas ou três dimensões são a área, volume, perímetro, superfície, dentre outras, as quais podem ser medidas a partir da contagem de *pixels* (ACHARYA, 2005).

De forma similar, a forma de um objeto pode ser descrita em termos de suas bordas. Outros atributos mais específicos para a forma podem ser obtidos através de invariantes de Momentos, descritores de Fourier, eixos medianos dos objetos, dentre outros (ACHARYA, 2005). Para realizar o reconhecimento de objeto, existe uma grande variedade de técnicas de classificação. Uma representação geral para o processo de classificação é ilustrada na Figura 30.

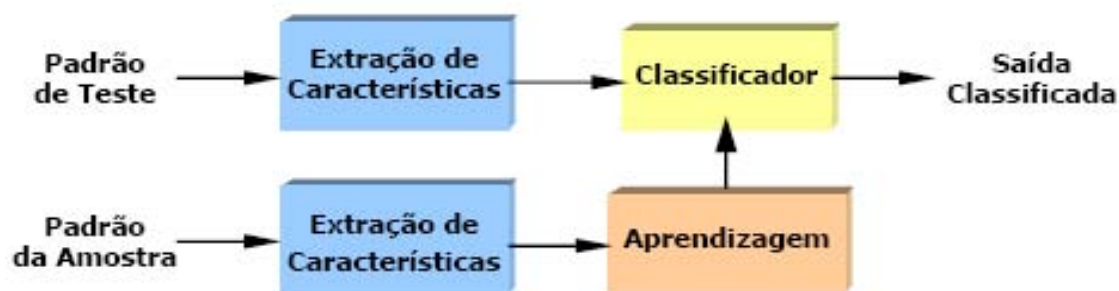


Figura30: Representação geral para o processo de classificação
Fonte: Acharya, 2005

As técnicas de reconhecimento de padrões podem ser divididas em 2 tipos principais: classificação baseada em aprendizagem supervisionada e não-supervisionada. Por sua vez, os algoritmos de classificação supervisionada podem ser subdivididos em paramétricos e não-paramétricos.

Na classificação paramétrica, o classificador é treinado com uma grande quantidade de amostras rotuladas para que possa estimar os parâmetros estatísticos de cada classe de padrão. Os classificadores de distância mínima e o classificador de máxima verossimilhança são alguns exemplos supervisionados. Por outro lado, na classificação não paramétrica, os parâmetros estimados do conjunto de treinamento não são levados em consideração. O classificador dos K-vizinhos mais próximos é um exemplo de técnica não paramétrica. Na classificação não supervisionada, o classificador particiona o conjunto de dados de entrada a partir de algum critério de similaridade, o que resulta num conjunto de grupos, em que cada grupo está normalmente associado a uma classe. Na área de reconhecimento de objetos, destacam-se os algoritmos e técnicas baseadas em redes neurais, os quais possuem variantes tanto para classificação supervisionada como para classificação não-supervisionada (ACHARYA, 2005).

2.4 Corrosão, falhas e degradação nos metais

A corrosão deve ser levada em conta nas etapas de projeto, construção e acompanhamento posterior constante dos dutos. Assim fazendo, garante-se uma vida útil dos dutos maximizada e o risco de acidentes minimizado. Isto proporciona também uma redução nos custos decorrentes da corrosão, podendo estes ser diretos ou indiretos. Como custos diretos, por exemplo, estão à aplicação de revestimentos e proteção catódica ou a substituição de tubos corroídos, e como custos indiretos as perdas econômicas devido à paralisação da linha para troca de um tubo corroído ou multas e medidas de recuperação do meio ambiente devido a um acidente.

O termo corrosão pode ser definido como a reação do metal com os elementos do seu meio, na qual o metal é convertido a um estado não metálico. Quando isto ocorre, o metal perde suas qualidades essenciais, tais como resistência mecânica, elasticidade, ductilidade e o produto de corrosão formado é extremamente pobre em termos destas propriedades (RAMANATHAN, 2004).

A corrosão pode ser devido à ação química ou eletroquímica do meio. Um duto enterrado, por exemplo, possui corrosão de localização externa tipicamente eletroquímica, e corrosão interna podendo ser química devido aos produtos que são transportados, como também a partir da eletroquímica se houver água condensando. A corrosão externa eletroquímica normalmente é mais severa se houver falha das proteções.

O ar atmosférico contém umidade, sais em suspensão, gases industriais, poeira. O eletrólito constitui-se da água que condensa na superfície metálica, na presença de sais ou gases presentes no ambiente. Outros constituintes como poeira e poluentes diversos podem acelerar o processo corrosivo. Os solos contêm umidade, sais minerais e bactérias. Alguns solos apresentam também, características ácidas ou básicas. O eletrólito constitui-se principalmente da água com sais dissolvidos (ABRACO, 2006).

A corrosão eletroquímica ocorre porque os potenciais elétricos podem variar de um ponto da tubulação para outro, como resultado da existência de áreas anódicas e catódicas. Estas áreas de diferentes potenciais elétricos são as bases para uma célula de corrosão, conforme as Figuras 31 e 32. A formação de áreas anódicas e catódicas pode ser devido ao contato de metais diferentes na construção do duto ou pela passagem do duto por solos diferentes. A substituição de um tubo velho corroído por um novo também fará com que existam metais diferentes no duto.

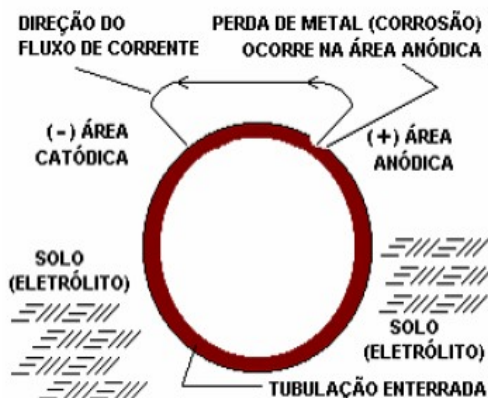


Figura 31: Célula de corrosão básica
Fonte: Abraco, 2006

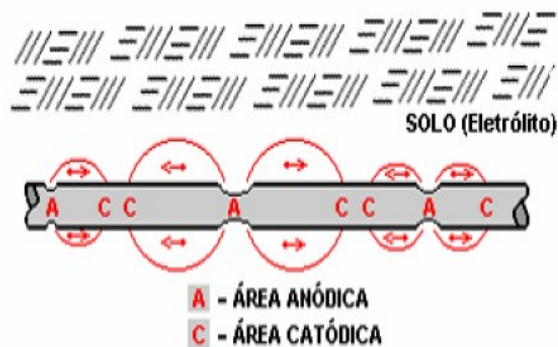


Figura 32: Múltiplas células de corrosão ao longo de tubulação enterrada
Fonte: Abraco, 2006

Formas e localização da corrosão

De maneira geral, as formas de corrosão dividem-se em generalizada ou localizada. Nos dutos, a corrosão aparece por falha das proteções, sendo as suas formas mais comuns as do tipo localizado em placas conforme analisado por Chouchaoui (1996), em torno de solda perante experimento de Endo (1997) e transgranular (corrosão sob tensão) a partir dos conceitos abordados por Cerný (2004). A Figura 33 apresenta diversas formas de corrosão. Quanto mais um defeito for bem localizado e profundo, como o tipo *pite*, maior é a tendência de

causar vazamento nos dutos antes de ocorrer colapso estrutural generalizado. Estas formas podem aparecer associadas ou os defeitos possuem geometrias complexas, tal como citado por Benjamin (2004) e Souza (2003).

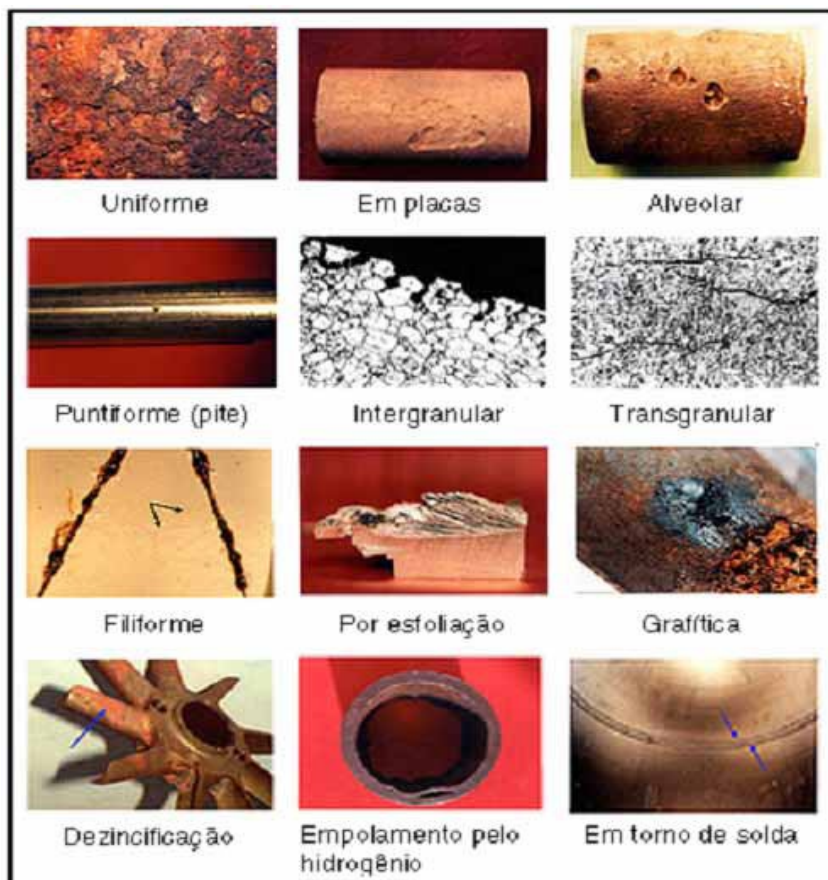


Figura 33: Formas de corrosão

Fonte: Gentil, 2003

Quanto à localização nos dutos, os defeitos de corrosão podem ser internos ou externos, e longitudinais ou circunferências. Estes defeitos podem aparecer isolados ou em colônias. Para a análise da resistência residual dos dutos, existe uma distância de afastamento limite para considerar defeitos em colônias como isolados ou não ou realizar estudos específicos para esse fim como Chen (2001) e Chouchaoui (1996).

Taxas de corrosão

Para a avaliação da vida útil provável dos dutos devem-se considerar as taxas de corrosão. As taxas de corrosão expressam a velocidade do desgaste na superfície metálica. Os valores das taxas de corrosão podem ser expressos por meio da redução de espessura do material por unidades de tempo, como em milímetros por ano, ou em perda de massa por unidade de área por unidade de tempo. As taxas também podem variar ao longo do tempo. Na corrosão eletroquímica a taxa de corrosão é diretamente proporcional à taxa do fluxo de corrente. A taxa do fluxo de corrente é afetada por diversos fatores, entre estes: resistividade do solo, eficiência do revestimento da tubulação (ABRACO, 2006).

Na avaliação da vida útil dos dutos é utilizada a redução de espessura por unidade de tempo, ou seja, o aumento de profundidade, largura e comprimento dos defeitos de corrosão ao longo do tempo. As taxas de corrosão são então associadas aos métodos tradicionais de avaliação da resistência residual dos dutos, normalmente estando relacionadas também a métodos estatísticos, ajudando a compor a avaliação de risco de um duto, como citado por Ahammed (1998), Caleyó (2002), Lin (2004), Brown (2005) e Gartland (2006).

A falha de materiais é quase sempre um evento indesejável por vários motivos: vidas humanas que são colocadas em perigo, perdas econômicas e a interferência na disponibilidade de produtos e serviços. Embora as causas de falha e comportamento de materiais possam ser conhecidos, a prevenção de falhas é uma condição difícil de ser garantida. As causas usuais são a seleção e o processamento dos materiais de uma maneira não apropriada, e o projeto inadequado do componente ou de sua má utilização (CALLISTER, 2002).

Fundamentos da fratura

A fratura simples consiste na separação de um corpo em dois ou mais

pedaços em resposta a uma tensão imposta que possua natureza elástica e a temperatura que são baixas quando comparadas à temperatura de fusão do material. A tensão aplicada pode ser de tração, compressão, cisalhamento ou torcional. Para materiais, são possíveis dois modos de fratura: dúctil ou frágil. A classificação está baseada na habilidade de um material em experimentar uma deformação plástica (CALLISTER, 2002).

Callister (2002) comenta que as superfícies de fratura dúctil irão possuir as suas próprias características distintas, tanto no nível macroscópico quanto no microscópico. A Figura 34 mostra representações esquemáticas para dois perfis macroscópicos característicos de fratura.

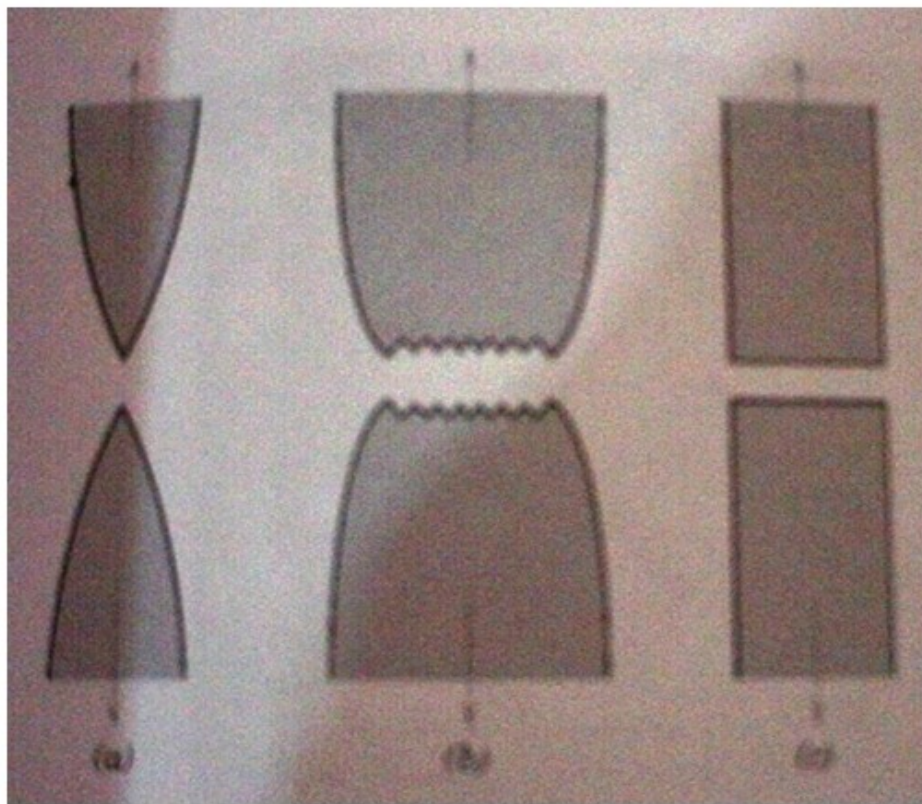


Figura 34: (a) Fratura dúctil e estrição. (b) Fratura moderadamente dúctil após estrição. (c) Fratura frágil.

Fonte: Callister, 2002

Admitindo-se que uma trinca possui um formato elíptico (ou que possui formato circular) e está orientada de acordo com uma direção perpendicular à tensão aplicada, a equação 20 apresenta a tensão máxima na extremidade da trinca, σ_m , é igual a

$$\sigma_m = \sigma_0 \left[1 + 2 \left(\frac{a}{\rho_e} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (20)$$

onde σ_0 representa a magnitude da tensão de tração nominal aplicada, ρ_e representa o raio de curvatura da extremidade da trinca e a representa o comprimento de uma trinca superficial, ou metade do comprimento de uma trinca interna (CALLISTER, 2002). A Figura 35 caracteriza a geometria das trincas e o diagrama esquemático do perfil.

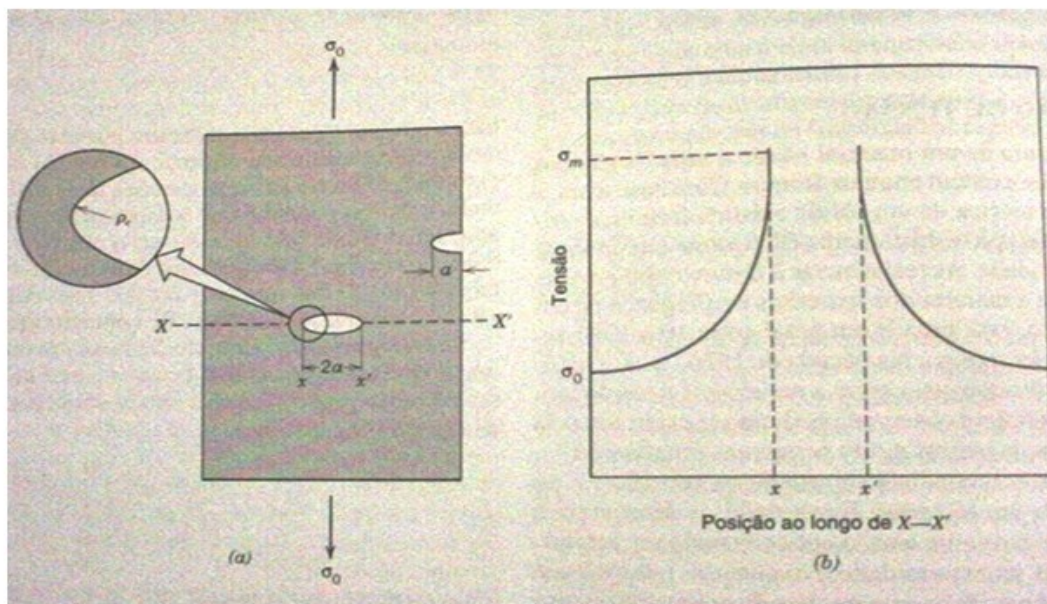


Figura 35: (a) Geometria das trincas de superfície e internas. (b) Diagrama esquemático do perfil de tensão ao longo da linha $X - X'$ em (a), demonstrando a amplificação de tensão nas extremidades da trinca

Fonte: Callister, 2002

3 Gás natural e gasoduto

O gás natural é, como o próprio nome indica, uma substância em estado gasoso nas condições ambiente de temperatura e pressão. Por seu estado e suas características físico-químicas naturais, qualquer processamento dessa substância, seja compressão, expansão, evaporação, variação de temperatura, liquefação ou transporte, exigirá um tratamento termodinâmico, como qualquer outro gás (GASNET, 2007).

3.1 Propriedades do gás natural

O gás natural é encontrado em reservatórios subterrâneos em muitos lugares do planeta, tanto na terra quanto no mar, assim como o petróleo, sendo considerável o número de reservatórios que contêm gás natural associado ao petróleo. Nesses casos, o gás recebe a designação de gás natural associado. Quando o reservatório contém pouca ou nenhuma quantidade de petróleo, o gás natural é chamado de não-associado.

A degradação da matéria orgânica por bactérias anaeróbias, da matéria orgânica e do carvão por temperatura e pressão elevadas ou da alteração térmica dos hidrocarbonetos líquidos fazem parte de processos naturais de formação do gás natural.

Assim, o gás natural, como é encontrado na natureza, trata-se de uma mistura variada de hidrocarbonetos gasosos cujo componente preponderante é sempre o metano. Enquanto o gás natural não-associado apresenta os maiores teores dessa substância, o gás natural associado compõe-se de proporções mais significativas de etano, propano, butano e hidrocarbonetos mais pesados. Além dos hidrocarbonetos, fazem parte da composição do gás natural bruto outros componentes, tais como dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2), hidrogênio sulfurado (H_2S), água (H_2O), ácido clorídrico (HCl), metanol e impurezas

mecânicas. A presença e a proporção desses elementos dependem, fundamentalmente, da localização do reservatório, se em terra ou no mar, de sua condição de associado ou não, do tipo de matéria orgânica ou mistura do qual se originou, da geologia do solo e do tipo de rocha onde se encontra o reservatório (GUO, 2005).

A composição comercial do gás natural é variada e depende da composição do gás natural bruto, do mercado atendido, do uso final e do produto gás que se deseja. Apesar dessa variabilidade, esses são considerados parâmetros fundamentais, pois determinam a especificação comercial do gás natural, os teores de enxofre total, de gás sulfídrico, de gás carbônico, de gases inertes, o ponto de orvalho da água e dos hidrocarbonetos e o poder calorífico.

Para adquirir as características comerciais desejadas, o gás natural bruto passa por tratamento em uma Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), que faz a retirada de impurezas e a separação dos hidrocarbonetos pesados (GASNET, 2007).

São importantes características do gás natural sua densidade inferior à do ar, seu baixo ponto de vaporização e o limite de inflamabilidade em mistura com o ar superior a outros gases combustíveis. O gás natural é o único cuja densidade relativa é inferior a um, sendo mais leve que o ar, característica essa que é de fundamental importância para segurança. Já o ponto de vaporização é identificado pela mudança de fase do estado líquido para o gasoso em uma certa combinação de temperatura e pressão. Nota-se que na pressão atmosférica a vaporização do gás natural ocorre à temperatura de -162° Celsius. Os limites de inflamabilidade podem ser definidos como percentagens mínima e máxima de gás combustível em composição com o ar, a partir das quais a mistura não se inflamará, mas permanecerá em combustão. O comportamento das variáveis pressão, temperatura e volume dos gases reais é bastante difícil de descrever e para modelá-lo utiliza-se a Lei do Gás Perfeito ou Ideal. Com base nessas observações experimentais, estabeleceu-se que o comportamento das variáveis pressão, temperatura e volume

dos gases à baixa densidade pode ser representado precisamente pela Equação de Estado dos Gases Ideais (BOYCE, 2001).

Os cálculos teóricos de uma compressão adiabática resultam no máximo trabalho teórico necessário para comprimir o gás entre dois níveis de pressão. Por outro lado, os cálculos teóricos de uma compressão isotérmica, ou seja, na qual a temperatura do gás comprimido não se altera com a elevação de pressão, determinam o valor do mínimo trabalho necessário para se efetuar a compressão.

A expansão do gás natural tem algumas aplicações importantes, tais como a sua liquefação em pequenas proporções e a realização de trabalho recuperando energia do gás natural liquefeito, quando da sua vaporização.

No processo de expansão adiabática, as variáveis de estado (pressão, volume e temperatura) comportam-se de tal forma que a temperatura final é significativamente menor que a inicial, permitindo sua aplicação em processos de liquefação.

A compressão do gás natural desempenha um papel importante em toda sua cadeia, desde a produção até o consumo, seja para desenvolver as atividades de transporte, armazenagem ou alimentação de equipamentos (GASNET, 2007).

Quando um gás real é comprimido em um único estágio, a compressão se aproxima de um processo adiabático, ou seja, praticamente sem troca de calor entre o gás comprimido e o ambiente.

Os processos termodinâmicos são semelhantes, com a única diferença de que a expansão libera energia enquanto a compressão consome energia.

3.2 Fluido-dinâmica do gás natural

O modelamento matemático para resolver de forma acoplada o escoamento transiente de um fluido compressível, sendo este o gás natural, e a movimentação de PIG em um duto, parte da premissa do escoamento deste fluido, desde que separado por um PIG. O fluido é considerado Newtoniano e assume-se escoamento isotérmico.

As equações diferenciais que governam o escoamento transiente são obtidas a partir da aplicação das equações de conservação de massa e da quantidade de movimento linear a um pequeno segmento de fluido em um duto. As variáveis dependentes são pressão e velocidade na seção transversal e as independentes são o tempo e a coordenada ao longo da tubulação.

A Figura 36 representa o transporte de um ponto material numa seção elementar de um tubo de área transversal fixa. Considerou-se as propriedades uniformes na seção transversal, de modo que o escoamento pode ser considerado como sendo essencialmente unidimensional.

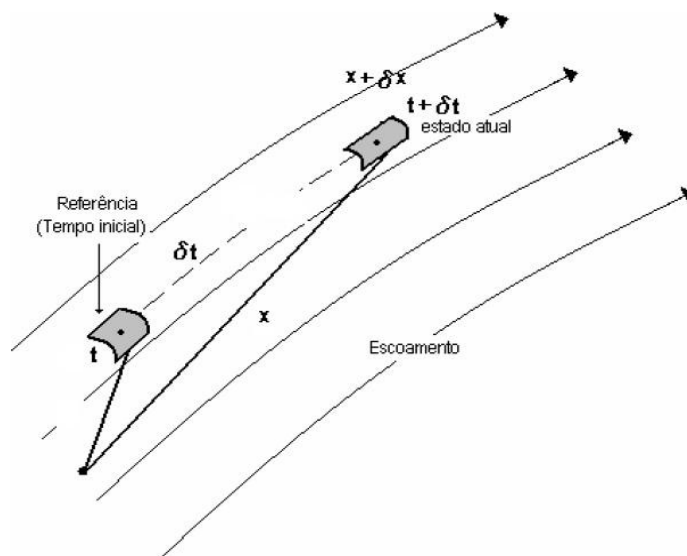


Figura 36: Transporte de um ponto material

Na Figura 37, representa-se o volume de controle de uma seção elementar de um duto de área transversal uniforme. Admite-se que a área do duto sofra variação, infinitesimal, mediante a dilatação por pressão do gás.

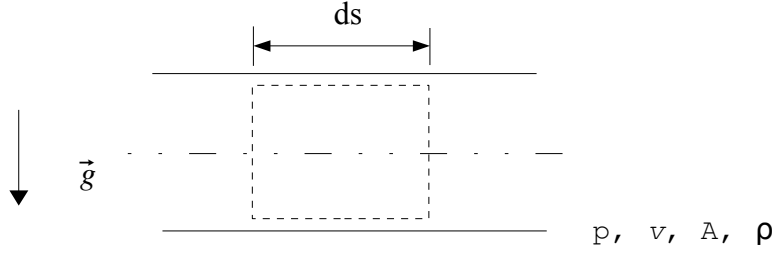


Figura 37: Volume de controle de uma seção elementar

Aplicando-se a conservação da massa no volume de controle de uma seção elementar, conforme representa na Figura 35, é permissível descrever a equação da continuidade como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A ds) + \frac{\partial}{\partial s}(\rho A v) ds = 0 \quad (21)$$

onde ρ é a massa específica, v é a velocidade, A é a área da seção transversal, s e t são coordenadas axial e tempo, respectivamente.

Expandindo a equação (21) e dividindo pelo termo $\rho A ds$, obtém-se a equação 22:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial s} + \frac{v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial s} = 0 \quad (22)$$

Utilizando-se da definição de derivada material, que descreve o movimento

dos fluídos ou qualquer componente (temperatura, concentração etc.) de forma estacionária, tem-se a equação 23:

$$\frac{1}{A} \frac{DA}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \frac{\partial v}{\partial s} = 0 \quad (23)$$

O primeiro termo da equação (23) refere-se às variações da área ao longo da tubulação, devido a alterações no diâmetro mediante a diferenças na espessura (tolerâncias construtivas), bem como pela dilatação devido à pressão exercida pelo gás. O segundo termo considera a compressibilidade do fluido e o terceiro termo está associado à variação de velocidade do PIG ao longo do duto.

Para descrever a variação da área da tubulação, devido às forças exercidas pela pressão do gás e pelas alterações na geometria do duto, tem-se a equação 24:

$$dA = \frac{\partial A}{\partial p} dp + \frac{\partial A}{\partial s} ds \quad (24)$$

onde p é a pressão do gás.

A relação entre a área e pressão, descrita na equação (25), é dada por Wylie e Streeter (1978), para uma tubulação totalmente ancorada.

$$\frac{\partial A}{\partial p} = \frac{AD}{eY} (1 - n^2) \quad (25)$$

onde D e e são, respectivamente, o diâmetro e a espessura da parede da tubulação. O parâmetro Y é o módulo de elasticidade (Young) do material da tubulação e n é o coeficiente de Poisson. A partir destes conceitos, o re-arranjo das equações (22) e (24) gera:

$$\frac{1}{A} \frac{DA}{Dt} = \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial p} \frac{Dp}{Dt} + \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial s} \quad (26)$$

Substituindo as equações (25) na equação (26), obtém-se:

$$\frac{1}{A} \frac{DA}{Dt} = \frac{D}{eY} (1 - n^2) \frac{Dp}{Dt} + \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial s} \quad (27)$$

A partir da premissa adotada, aonde o escoamento é isotérmico e a variação da massa específica ao longo do duto depende somente da pressão, descreve-se:

$$d\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T dp \quad (28)$$

Visando analisar as forças que atuam nas superfícies do volume de controle, as quais são doravantes da pressão exercida pelo gás e tensão de cisalhamento, como também a força do PIG analisada pelo campo gravitacional atuando no fluido, vem:

$$\sum F_s = \rho A \frac{Dv}{Dt} ds \quad (29)$$

$$\sum F_s = pA - \left[pA + \frac{\partial}{\partial s}(pA) ds \right] + p \frac{\partial A}{\partial s} ds - \sigma \pi D ds - \rho g A ds \quad (30)$$

onde σ é a tensão viscosa.

Substituindo a equação (30) na equação (29) e dividindo-se pela massa do volume de controle ($\rho A ds$), obtém-se:

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{4\sigma}{\rho D} - g \quad (31)$$

A tensão viscosa é interdependente do coeficiente de atrito (μ), para tanto:

$$\sigma = \frac{\mu}{8} \rho v^2 \quad (32)$$

Substituindo a equação (32) na equação (31) e expandindo o termo da aceleração da gravidade (g), a equação da quantidade de movimento linear torna-se:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{\mu v^2}{2D} - g \quad (33)$$

No que tange a especificação do coeficiente de atrito (μ), considera-se escoamento hidrodinâmico e para cada escoamento determina-se o valor em função do número de Reynolds (Re).

$$R_e = \frac{\rho |v| D}{\nu_a} \quad (34)$$

onde ν_a é viscosidade absoluta do fluido.

Com relação à viscosidade absoluta ou dinâmica, considera-se:

$$\nu_a = \nu_{ref} \cdot e^{c_{\nu,p}(p - p_{ref})} \quad (35)$$

sendo, ν_{ref} a viscosidade absoluta de referência na pressão de referência, $c_{\nu,p}$ o coeficiente de pressão para a viscosidade e p_{ref} a pressão de referência.

Para caracterização do fluido (gás natural), considerou-se somente a dependência das propriedades dos fluídos em relação à pressão, uma vez que a análise é isotérmica.

Neste caso, utilizou-se a equação de estado do gás ideal, avaliada a temperatura de referência (T_{ref}).

$$\rho = \frac{p}{zRT_{ref}} \quad (36)$$

sendo, R a constante do gás e z o fator de compressibilidade.

Para a análise do escoamento transiente devido à passagem de um PIG é necessário definir a condição inicial no instante da introdução do PIG no gasoduto. Neste ínterim, considerou-se duas possibilidades:

- ✓ Fluido em repouso, correspondendo a vazão nula ao longo da

tubulação;

- ✓ Fluido escoando em regime permanente.

Quando o fluido está em repouso, a velocidade ao longo da tubulação é nula e portanto a distribuição de pressão hidrostática, depende da elevação da pressão ao longo do duto. Salienta-se que a pressão inicial é especificada no ponto de maior elevação do duto.

A partir da equação (33) aplicada para a situação de equilíbrio hidrostático, tem-se:

$$\frac{dp}{\rho} + gds = 0 \quad (37)$$

A distribuição de pressão é obtida, integrando-se a equação (37) de s a $s + ds$. Assim, a distribuição de pressão ao longo do duto com gás é expressa conforme:

$$p_{s+ds} = \frac{p_s}{e^{g\Delta s}} \quad (38)$$

A modelagem dinâmica do movimento do PIG com o escoamento do fluido no gasoduto é obtido através de um balanço de forças atuando no PIG, o qual pode descrito como:

$$m \frac{dv_{pig}}{dt} = (p_1 - p_2) A - F_{at} \quad (39)$$

onde, v_{pig} é a velocidade, m a massa e p_1 e p_2 são as pressões nas faces à montante e à jusante do PIG.

O termo F_{at} representa a força de contato entre o PIG e a parede do gasoduto. Quando o PIG não está em movimento, a força de contato varia de zero à força estática máxima (F), a fim de equilibrar a força de pressão devido ao escoamento do fluido. Como o PIG não é simétrico, a força de contato estático depende do sentido da iminência do movimento. No caso do gradiente de pressão negativo a força máxima é F_{neg} . Se o gradiente de pressão for positivo a força máxima é F_{pos} .

A resistência de contato do PIG com o fluido em movimento em geral é diferente da resistência quando o PIG está parado. Como no caso do PIG parado, a força de contato dinâmico admite diferente, forças referentes ao gradiente de pressão, dependendo do sentido do movimento do PIG.

Na determinação do escoamento de fluidos em dutos, a pressão máxima de operação admissível é um parâmetro importante a ser considerado, pois é a referência para avaliar as pressões obtidas na simulação dentro do limite de operação seguro dos gasodutos.

A pressão máxima de operação admissível é definida como a maior pressão na qual um gasoduto pode ser operado em concordância com a norma adotada para o projeto e construção, e determinada como sendo o menor valor de pressão admissível obtido em função de critérios, sendo:

1) Pressão do projeto:

De acordo com as normas ASME B31.4 (2004) e ASME B31.8 (2003) o cálculo da pressão do projeto é baseado na fórmula de Barlow.

$$p_{proj} = \frac{2\tau_s e}{D_e} FET \quad (40)$$

onde, τ_s é a tensão de escoamento do material do duto, e a espessura da parede do duto, D_e o diâmetro externo do duto e F , E e T respectivamente os fatores de projeto, tipo de solda longitudinal e temperatura.

Para gasodutos, o fator de projeto pode variar de 0,40 a 0,80 de acordo com a classe de locação do trecho do gasoduto, a qual é determinada em função do número e proximidade de construções destinadas à ocupação humana.

2) Teste hidrostático:

Todos os pontos de um gasoduto devem ser testados a uma pressão mínima acima da pressão de operação. Assim, a pressão máxima de operação devido ao teste hidrostático é determinado

$$p_{pth} = \frac{P_{th}}{F_{th}} \quad (41)$$

onde, p_{th} é a pressão exercida em cada ponto do duto durante o teste hidrostático e F_{th} o fator de teste hidrostático.

Para gasodutos, este fator pode variar de 1,1 a 1,8 de acordo com a classe de locação do trecho do gasoduto.

4 Resultados e discussão

A seguir são apresentadas e analisadas as falhas geradas por inserção manual na parte interna da tubulação. Nas Figuras 38 e 39 verificam-se as falhas detectadas pela câmera digital para diferentes desenhos.

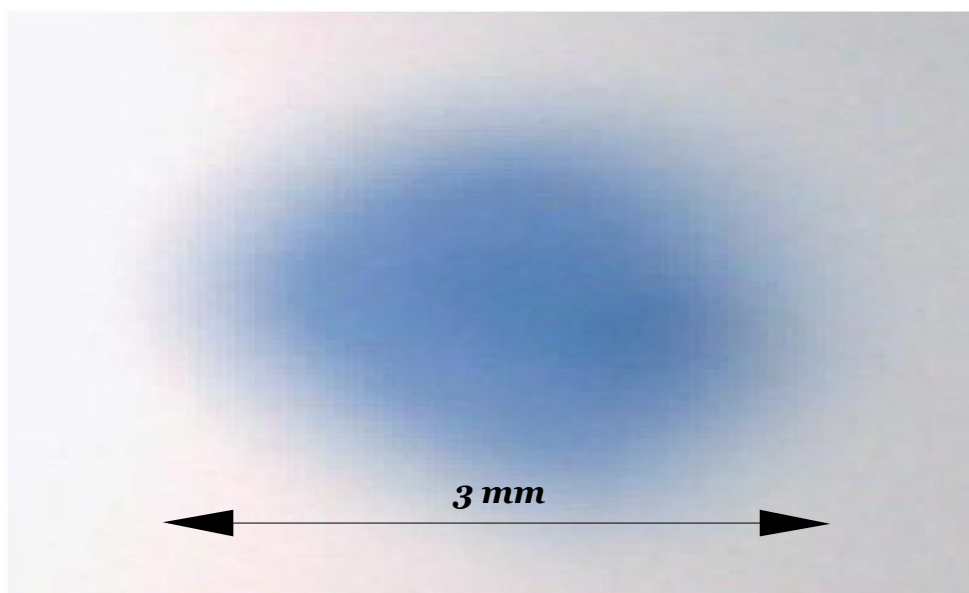


Figura 38: Falha interna na tubulação com 0,003 metros de diâmetro detectada pela câmera digital

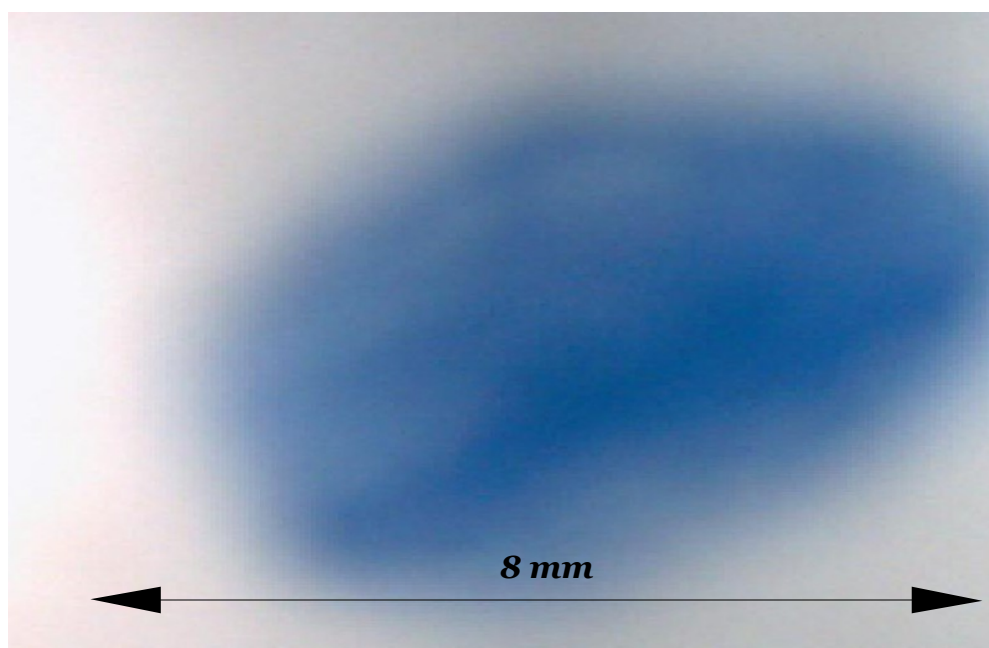


Figura 39: Falha interna na tubulação com 0,008 metros de diâmetro detectada pela câmera digital

A Figura 38 caracteriza-se pelo instante em que a câmera digital, acoplada na parte superior do PIG, detecta uma falha na área interna da tubulação. Verifica-se uma excelente resolução, mediante a captação digital de imagens da câmera que contempla 30 *frames* a cada segundo. Outro detalhe a ser destacado é detecção de tamanhos e formatos diferenciados, o que analisa-se nas Figuras 38 e 39. Neste ínterim, foi possível captar formas com área de $9 \cdot 10^{-6}$ metros quadrados.

Visando à modelagem matemática do movimento dinâmico do PIG, com o escoamento do fluido (gás natural) no gasoduto, descreveu-se as equações a partir: da aplicação da conservação da massa no volume de controle de uma seção elementar, equação (21); da variação da área da tubulação, devido às forças exercidas pela pressão do gás e pelas alterações na geometria do duto, equação (24); das forças que atuam nas superfícies do volume de controle, as quais são doravantes da pressão exercida pelo gás e tensão de cisalhamento, como também a força do PIG analisada pelo campo gravitacional atuando no fluido, equações (29) e (30); e o movimento do PIG com o escoamento do fluido no gasoduto é obtido através de um balanço de forças atuando no PIG, equação (39).

Como a força de atrito (F_{at}) entre o PIG e o fluido (gás natural) é descrita a partir de uma constante ($K = 6 \cdot \pi \cdot R \cdot h$) que depende da forma do corpo, de uma viscosidade dinâmica (η) e da velocidade de deslocamento (v), temos:

$$F_{at} = K \cdot \eta \cdot v \quad (42)$$

Incluindo a equação de movimento, vem:

$$m \frac{dv}{dt} = (m - m_f) \cdot g - K \cdot \eta \cdot v \quad (43)$$

aonde m é a massa do PIG e m_f a massa do gás natural.

Integrando a equação (42), a velocidade pode ser analisada como:

$$v = \left[\frac{(m - m_f) * g}{K * \eta} \right] \left[1 - e^{-\left(\frac{k * \eta}{m}\right)t} \right] \quad (44)$$

Como a distribuição de pressão e campos de velocidade do escoamento, assim como a velocidade e posição do PIG, para cada instante de tempo, são obtidos a partir de uma solução acoplada das equações de conservação do fluido e do PIG, as equações foram resolvidas por um procedimento implícito, usando o método das diferenças finitas em sua discretização. Para solução, utilizou-se a seguinte parametrização: $m = 70 \text{ g}$; $R = 0,08 \text{ m}$; $h = 0,37 \text{ m}$; $\eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$; $t_{\text{final}} = 5000 \text{ s}$; $\Delta p > 0$ ($p_2 > p_1$).

A partir das equações (39) e (44) gerou-se as simulações computacionais do deslocamento do PIG na tubulação, para:

1. deslocamento horizontal do PIG, na tubulação, impulsionado pelo ar comprimido, com Δp variando de 10 a 100 kPa; (Figura 40)
2. deslocamento com inclinações ascendentes de 15° , 30° e 45° do PIG, na tubulação, impulsionado pelo ar comprimido, com $\Delta p = 100 \text{ kPa}$; (Figura 41)
3. deslocamento com inclinações descendentes de 15° , 30° e 45° do PIG, na tubulação, impulsionado pelo ar comprimido, com $\Delta p = 100 \text{ kPa}$; (Figura 42)

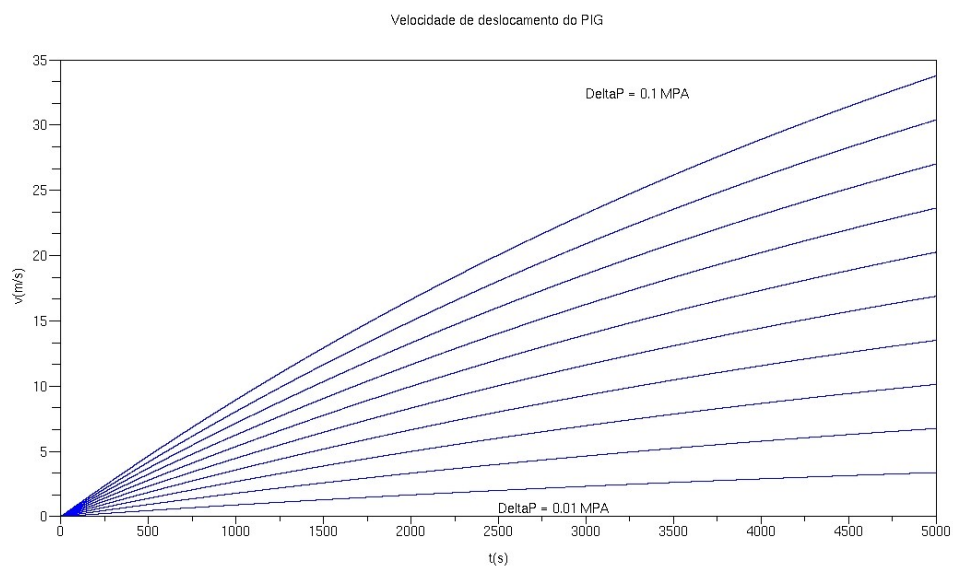


Figura 40: Velocidade de deslocamento do PIG

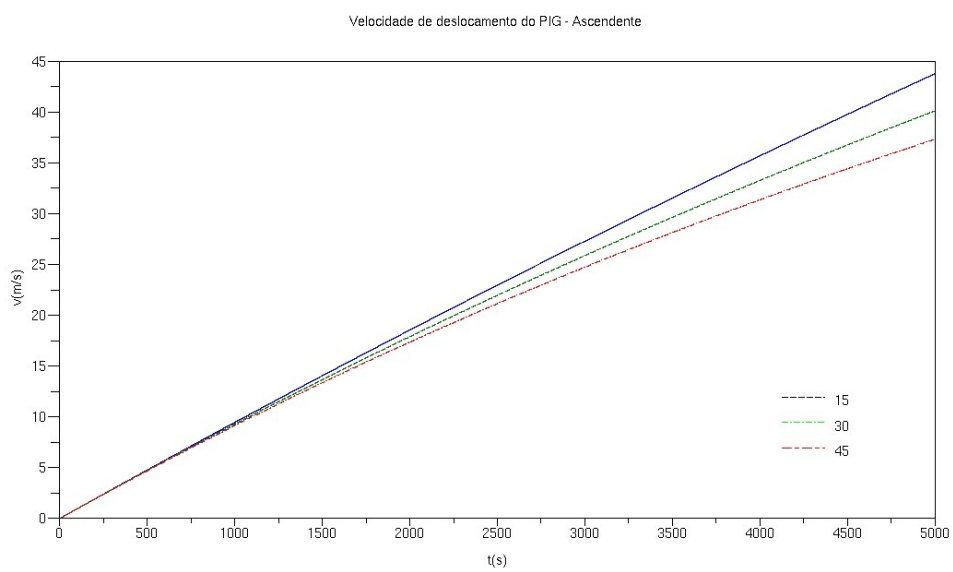


Figura 41: Velocidade de deslocamento do PIG – ascendentes – 15°, 30°e 45°

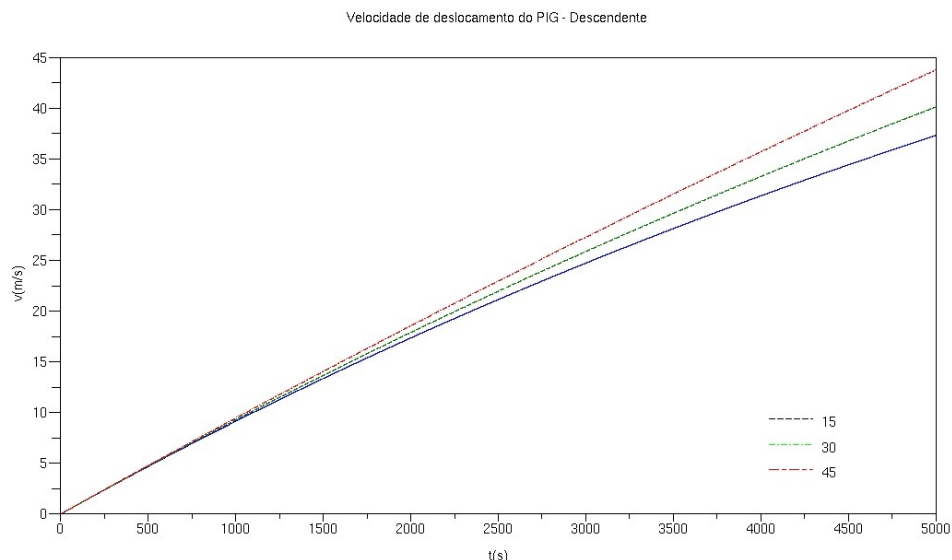


Figura 42: Velocidade de deslocamento do PIG – descendentes – 15°, 30° e 45°

Comparando-se os resultados obtidos pela simulação computacional com os resultados experimentais obtidos com o protótipo, as velocidades médias são de 1,8 metros por segundo para o deslocamento horizontal com Δp igual a 20 kPa. Salienta-se que a menor variação de pressão entre as faces à montante e à jusante do PIG não deve ser inferior a 10 kPa, pois, abaixo deste valor o PIG não desloca-se.

Os dados apresentados na Tabela 6 consolidam a comparação entre os resultados obtidos pela simulação computacional (teórica) e no protótipo (prática). Devido a dificuldade em realizar diversas medidas experimentais, os deslocamentos ascendente e descendente foram simulados com o protótipo no ângulo de 30°. Já a simulação computacional contemplou os ângulos de 15°, 30° e 45°. As variações entre as velocidades de deslocamento ascendente e descendente observadas nas duas simulações, prática e teórica, deve-se ao fato de uma caracterização da força de atrito que destoa-se na modelagem matemática.

Tabela 6: Comparativo entre simulação teórica e prática

Direção	Simulação		
	Teórica	Prática	$\pm \Delta\%$
	Velocidade de deslocamento do PIG [m/s]		
Horizontal	1,8	1,8	0
30° ascendente	1,2	1,0	20
30° descendente	5,0	3,0	40

Outro detalhe a ser fomentado é a variação exponencial de velocidade, o qual modifica-se sensivelmente ao logo do tempo. Neste íterim, a dificuldade de determinar o local correto da falha na tubulação será afetada, impedindo a precisão na localização. Nas Figuras 41 e 42 verificam-se os resultados da simulação do deslocamento ascendente e descendente, com inclinações de 15°, 30° e 45° referente ao plano horizontal. O perfil da variação exponencial de velocidade é destacado e agravado mediante a inclinação.

Mediante a necessidade de identificar o ponto de falha com precisão o uso de um sistema com malha móvel se torna conveniente, de tal forma que o sistema de coordenada coincida com a posição do PIG. A mudança para o sistema de coordenada móvel das equações da continuidade (21) e da conservação de quantidade de movimento linear (33), resulta:

$$s = s(x, t) \quad (45)$$

aonde (x, t) são coordenadas do sistema de controle.

Aplicando a regra da cadeia na equação (45) e uma vez que a derivada material de x é nula para um observador localizado sobre a malha, obtém-se :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial x}{\partial s} \left| \frac{\partial s}{\partial t} \right|_x + \frac{\partial x}{\partial t} \Big|_s = 0 \quad (46)$$

$$\left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_s = -v_c \left. \frac{\partial x}{\partial s} \right|_t \quad (47)$$

$$v_c = \left. \frac{\partial s}{\partial t} \right|_x \quad (48)$$

aonde v_c é a velocidade do PIG com o sistema de controle.

A velocidade absoluta (v) do deslocamento do PIG é

$$v = v_r + v_c \quad (49)$$

aonde v_r é a velocidade relativa ao sistema de coordenada móvel.

Definindo um fator de escala (h) para o sistema de coordenada móvel e substituindo nas equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento linear podem ser escritas para o sistema de referência do PIG como,

$$h = \frac{\partial s}{\partial x} \quad (50)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{v_r}{h} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho a^2}{\mu} \frac{1}{h} \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{-\rho a^2}{\mu A} \frac{v_r}{h} \frac{\partial A}{\partial x} \quad (51)$$

Como o domínio computacional é subdividido em elementos e estes possuem características distintas da tubulação é possível subdividir em volumes de controle, com a pressão no centro e velocidade nas faces. Neste método o número total de pontos nodais dentro da tubulação é mantido constante durante os cálculos numéricos. Porém, quando o PIG se desloca ao longo de um determinado elemento, a malha se move para se ajustar à nova posição do PIG. Portanto, no

elemento onde o PIG se encontra, a malha é não-uniforme. Adicionalmente, como o número de volumes de controle é fixo, no elemento onde o PIG se encontra, ocorre uma migração de pontos de montante para jusante do mesmo, para evitar a formação de uma malha não uniforme. Durante o movimento do PIG, este troca de elementos, logo a malha só é móvel no elemento onde o PIG se encontra, voltando a ser uniforme após a sua passagem.

Para ajustar computacionalmente as equações de movimento e controle, estas foram discretizadas pelo método de diferenças finitas, conforme verifica-se nas equações (52) e (53). Para a aplicação deste método, foi escolhida uma malha em que as faces dos volumes de controle estão posicionadas a meia distância dos pontos nodais. A malha deslocada é utilizada neste caso para evitar soluções oscilatórias irreais. As derivadas espaciais foram aproximadas pelo método de diferenças centrais em volta do ponto da malha. As equações foram integradas no tempo usando um método semi-implícito. Isso significa que um procedimento implícito foi adotado, porém os coeficientes foram determinados localmente, baseados no passo de tempo anterior, em uma forma explícita.

Equação do movimento discretizada.

$$\begin{aligned} & \frac{(p_i - p_i^o)}{\Delta t} + \frac{v_r}{h_i} \left[f_{xi} \left(\frac{p_{i+1} - p_i}{\delta x_{i+1}} \right) + f_{xmi} \left(\frac{p_i - p_{i-1}}{\delta x_i} \right) \right] \\ & + \left(\frac{\rho_i a_i^2}{\mu_i} \right) \frac{(v_i - v_{i+1})}{h_i \Delta_{xi}} + \left(\frac{\rho_i a_i^2}{A_i \mu_i} \right) \frac{v_r}{h_i} \left[f_{xi} \left(\frac{A_{i+1} - A_i}{\delta x_{i+1}} \right) + f_{xmi} \left(\frac{A_i - A_{i-1}}{\delta x_i} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (52)$$

aonde:

$$f_{xi} = \frac{\mu_{xi}}{2 \Delta_{xi}}$$

$$f_{xmi} = 1 - f_{xi}$$

Equação do controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) discretizado.

$$u_{(x)} = K_p \left[e_{(x)} + \frac{T_0}{\tau_i} \sum_{i=0}^x e_{(x-1)} + \frac{\tau_d}{T_0} (e_{(x)} - e_{(x-1)}) \right] \quad (53)$$

aonde, K_p é o ganho proporcional, τ_i é a constante de tempo integral, τ_d é a constante de tempo derivativa, $u_{(x)}$ é a variável manipulada, $e_{(x)}$ é o erro no tempo medido e $e_{(x-1)}$ é o erro anterior.

Um motor elétrico de corrente contínua classe de isolamento B e proteção IP44, conforme a norma IEC 60079-7:2006, o qual mantém inerte a propagação de faíscas, foi acoplado ao sistema de tração do PIG em conjunto com o controlador PID. Após simulação computacional, o deslocamento tornou-se constante a partir de 7,5 segundos da inserção do PIG na tubulação. A Figura 43 demonstra a simulação do controlador PID atuando no deslocamento horizontal, ascendente (inclinação de 30°) e descendente (inclinação de 30°).

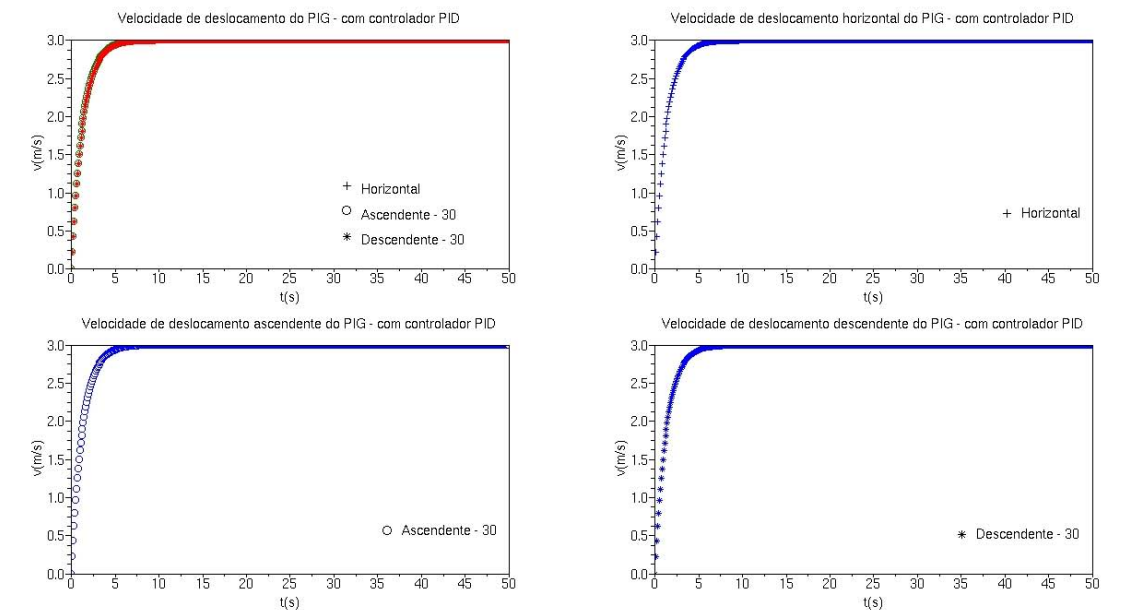


Figura 43: Velocidade de deslocamento do PIG – com controle PID

No que tange à consolidação dos resultados verificados na simulação, realizou-se um experimento em que o PIG foi tracionado por um motor elétrico acoplado por um fio na parte externa da tubulação. O controlador PID foi implementado por um sistema eletrônico e microcontrolado. Com os parâmetros do controlador PID calculados pela simulação, o protótipo foi conduzido pela tubulação de 2 metros com velocidade constante para diferentes inclinações. Neste ínterim, a localização da falha torna-se precisa mediante a captação das imagens pela câmera digital.

Para a resolução da câmera digital de 720x480 *pixels* e 30 *frames* por segundo (trinta “fotos” a cada segundo), são captadas dez imagens (fotos) a cada metro. Como a área de captação da câmera refere-se a um quadrado de 0,1 metro de aresta, cada imagem (foto) armazenada, no tempo de 1 segundo, contempla um trecho linear da tubulação de 0,1 metro. Mediante a restrição da resolução da câmera digital, a velocidade de deslocamento do PIG não pode superar 3 metros por segundo, pois, acarretaria em ampliação da captação linear e perda de precisão na detecção do tipo de falha.

Todas as imagens foram gravadas, diretamente, no disco rígido do computador mediante a utilização de uma câmera digital que disponibiliza as informações no formato *Digital Video* (DV) com compressões realizadas pelos métodos *Discrete Cosine Transform* (DCT) e *Moving Picture Experts Group* (MPEG).

As Figuras 44 e 45 demonstram, respectivamente, a imagem captada pela câmera digital, acoplada ao PIG, de uma falha simulada na tubulação e o sinal temporal gerado a partir das matrizes DCT.

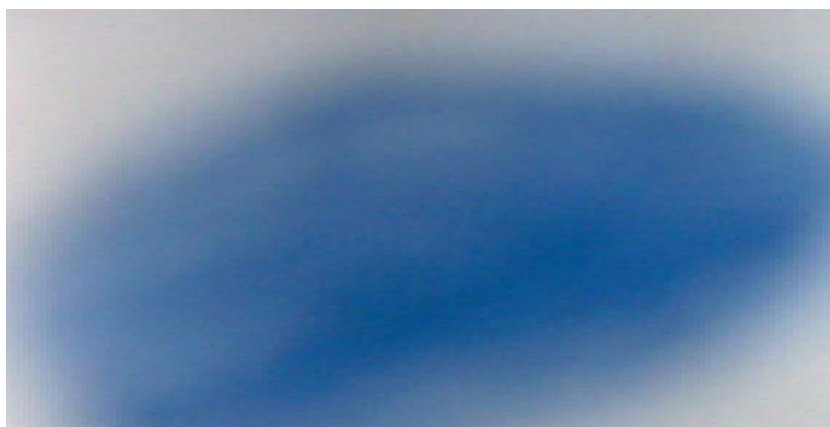


Figura 44: Imagem de uma falha captada pela câmera acoplada no PIG na tubulação

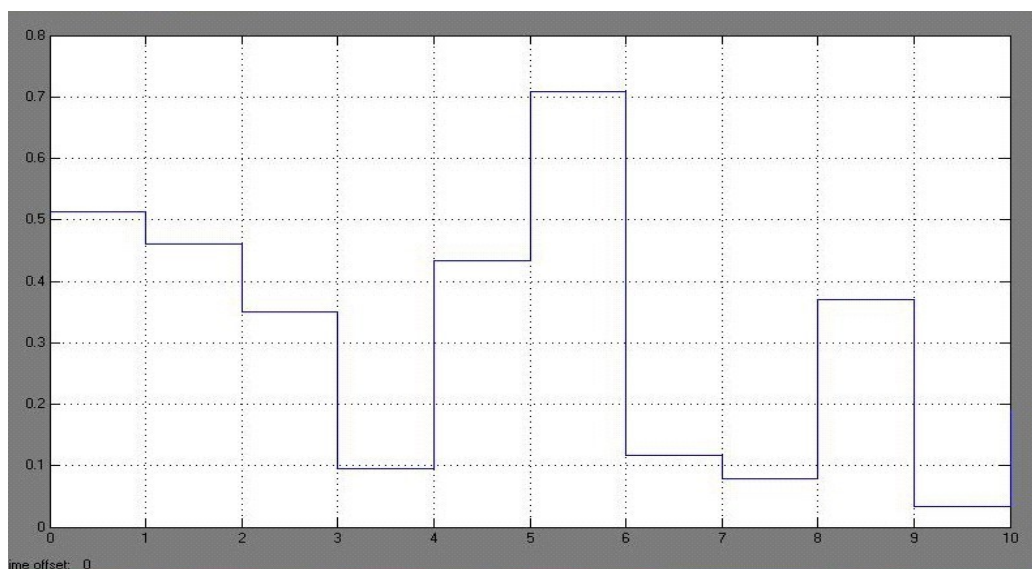


Figura 45: Sinal temporal da imagem de uma falha na tubulação gerando a partir das matrizes DCT

Com o mapeamento dos diversos sinais temporais das falhas, em matrizes DCT, é possível comparar os sinais captados pela câmera com os padrões de falhas e detectar o local que deve-se realizar a manutenção. A localização espacial da falha é calculada a partir da velocidade de deslocamento constante do PIG concomitante ao sincronismo de tempo gerado na captação da imagem e a devida compressão em matrizes DCT.

No intuito de extrapolar os resultados obtidos na simulação computacional e experimental, para os dados reais de operação no gasoduto, implementou-se uma simulação com os seguintes dados: $m = 10 \text{ kg}$; $R = 0,402 \text{ m}$; $h = 0,80 \text{ m}$; $\eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$; $t_{\text{final}} = 50 \text{ s}$; $\Delta p > 0$ ($p_2 > p_1$).

Foi implementado o controlador PID para manter a velocidade do PIG, no gasoduto, constante em 3 metros por segundo. A partir da Figura 46 verificam-se os resultados obtidos para a simulação dos parâmetros reais no que tange o deslocamento horizontal, ascendente e descendente.

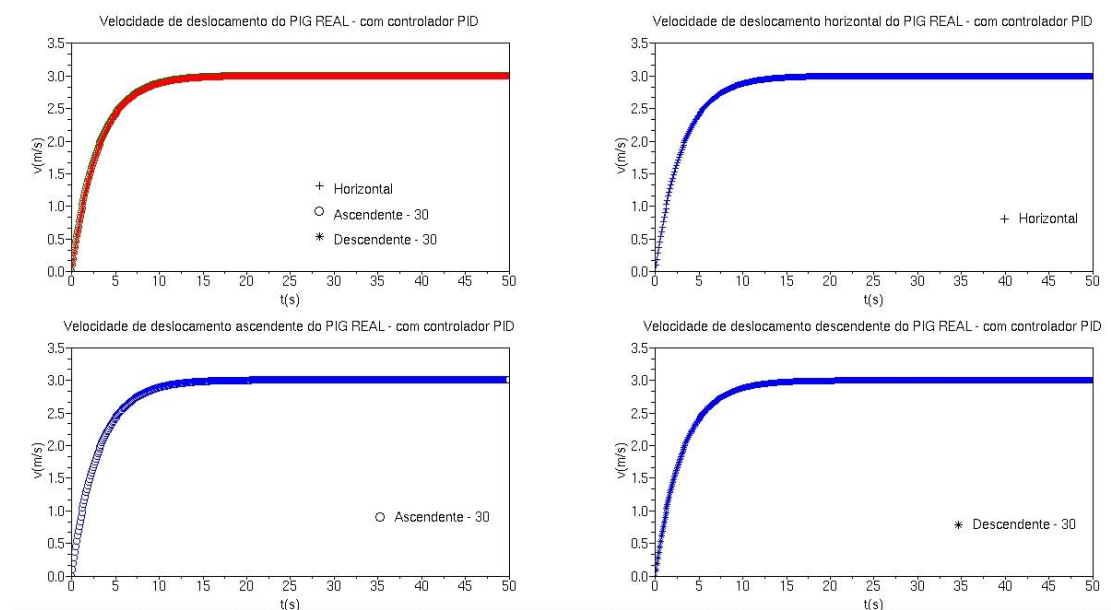


Figura 46: Velocidade de deslocamento do PIG “real” – com controle PID

Comparando os dados experimentais (protótipo) com a simulação do deslocamento do PIG em situação real analisa-se que a única alteração é o tempo para atingir a velocidade de 3 metros por segundo o qual manteve-se em 15 segundos independente da posição angular da tubulação. Com esta informação, os

cinco metros iniciais da tubulação não serão analisados com precisão para detecção da localização exata da falha.

O estudo inicial focou-se em um PIG acoplado de uma câmera analógica com deslocamento a partir da força exercida pelo gás natural. Após o equacionamento da velocidade de deslocamento e a devida simulação computacional e testes com o protótipo, verificou-se que a pequena diferença de pressão entre as faces à montante e à jusante do PIG impediriam o deslocamento horizontal. Também, detectou-se problemas referentes as variações de velocidade nos planos ascendentes e descendentes, o qual dificultaria a localização exata da falha.

Neste ínterim, a inserção de um motor elétrico de corrente contínua em conjunto do controlador PID no sistema de tração do PIG mostrou-se adequado por manter a velocidade de deslocamento constante independente do trajeto. Também, foi possível manipular a velocidade de modo a manter constante em 3 metros por segundo, pois, é o limite de captação de imagem da câmera digital adotada.

No tocante a captação de imagem, as definições atuais das câmeras digitais proporcionam excelente visualização do objeto, o que descarta a necessidade de captação analógica da imagem e posterior digitalização. Neste aspecto, facilita-se o processo como também agiliza a transferência das informações para a memória não volátil interna ao PIG.

5 Conclusões

Comparando o método proposto, ou seja, um sistema de monitoramento implementado por um PIG inteligente acoplado com câmeras, com os métodos atuais de monitoramento de falhas nas tubulações, os quais são:

- ✓ PIG de monitoramento acústico (Sandberg, 1989);
- ✓ Sensores térmicos e ópticos utilizados em patrulhas aéreas (Sandberg, 1989);
- ✓ Sensores de hidrocarbonetos (Sandberg, 1989);
- ✓ PIG com sensor ultra-sônico (Black, 1992);
- ✓ Análise da corrosão por meio de sensores de resistência elétrica (Nóbrega, 2005);
- ✓ Monitoramento de um gasoduto por sensor acústico (Sinha, 2005);
- ✓ PIG de alta resolução com sensores de efeito Hall (Bueno, 2006);
- ✓ PIG com sensores de fluxo magnético (Battelle, 2006).

A detecção de uma falha por meio de processamento da imagem contempla maior precisão na identificação real do tipo desta falha a partir da imagem gerada. Todo este processo melhora o planejamento da manutenção preditiva e corretiva dos gasodutos, segundo o conceito de monitoramento sem interrupções no abastecimento de gás natural.

Salienta-se que existem diversos métodos de detecção de vazamentos, contudo, o método proposto dedica-se a detecção da falha antes que ocorra um vazamento.

O método é plenamente viável mediante a implementação do PIG com câmeras acopladas, pois, o deslocamento controlado possibilita a captação precisa das imagens. Isto leva a uma maior confiabilidade do sistema de detecção de falhas o que acarreta melhoria no nível de serviço prestado.

6 Referências bibliográficas

ACHARYA, T., RAY, A. K. *Image Processing- Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Inc. NY: 2005.

ABRACO. Associação Brasileira de Corrosão. *Corrosão*. SP: Abraco, 2006. Disponível em <<http://www.abraco.org.br/corros10.htm>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2006.

ABREU, P.L., MARTINEZ, J.A., *Gás Natural*, Revista Amanhã nº 146, Porto Alegre, 1999.

AHAMMED, M., *Probabilistic Estimation of Remaining Life of a Pipeline in the Presence of Active Corrosion Defects*, Int. J. Pres. Ves Piping, v.75, p. 321-329, 1998.

ALVES, J. L., *Avaliação Numérica da Capacidade de Carga de Dutos Corroídos*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Boletim anual de reservas*. Rio de Janeiro: ANP - Superintendência de Planejamento e Pesquisa, 2005.

ANP, Agência Nacional do Petróleo. Anuário 2006. SP: ANP, 2006. Disponível em : <http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2004.asp>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2006.

ANSYS, *ANSYS Release 8.0 Documentation*, 2003.

API, *Specification for Line Pipe – Specification 5L*, 42Pth Pediton, American Petroleum Institute, Washington, 2000.

ASME, *Gas Transmission and Distribution Piping Systems - ASME B31.8*, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1995.

BATHE, K.J.; LEE, P.S., *Insight into Finite Element Shell Discretizations by Use of the Basic Shell Mathematical Model*, *Computers and Structures*, v.83, p.69-90, 2005.

BATTELLE, Battelle Science and Technology International. *PIG*. SP: Battelle, 2006. Disponível em: <<http://www.battelle.org>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2006.

BENJAMIN, A. C.; ANDRADE, E. Q., *Structural Evaluation of Corrosion Defects in Pipelines: Comparision of FE Analyses and Assesment Methods*, Proc. 14P th P International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, 2004.

BENJAMIN, A.C.; SOUZA, R.D.; FREIRE, J.L.F.; VIEIRA, R.D.; DINIZ, J.L.C., *Burst Tests on Pipeline Containing Long Real Corrosion Defects*, Proc. 5P th P International Pipeline Conference, ASME IPC 2004, Calgary, 2004.

BELSITO, S., LOMBARDI, P., ANDREUSSI, P., BANERJEE, S. *Leak detection in liquefied gas pipeline by artificial neural networks*. *AIChE Journal*, v.44, n.12, p. 2675- 2688, 1998.

BILLMANN, L., ISERMANN, R. *Leak detection methods for pipelines*. *Automatica*, v.23, n.3, p. 381-385, 1987.

BLACK, P. *A review of pipeline leak detection technology*. *Pipeline System*, v.7, Fluid Mechanics and its Applications, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.p. 287-298, 1992.

BRAGA, C. F. *Detecção de vazamentos por computador on-line em tubulações transportando misturas gás-líquido*. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas,

Campinas.

BOYCE, M. P. *Handbook for cogeneration and combined cycle power plants*. New York, American Society of Mechanical Engineers, 2001.

BUENO, S. *Monitoração e preservação de dutos submarinos: a experiência da Petrobras/E&P-BC*. SP: GasNet, 2006. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/artigos/artigos_view2.asp?cod=206>. Acesso em: 24 de julho de 2006.

BUIATTI, C. M. *Monitoramento de tubulações por técnicas computacionais on-line*. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BROWN, N.; LIM, A., *The Techno-Economic Benefits of Performing a Rigorous Risk Assessment, Prior to Executing Repairs on an Internally Corroded Pipeline*, Proc. WTIA Annual Pipeline Conference – International Conference on Pipeline Repairs, 2001.

CALEYO, F.; *A Study on the Reliability Assesment Methodology for Pipelines with Active Corrosion Defects*, Int. J. Pres. Ves Piping, v.79, p.77-86, 2002.

CERNÝ, I; LINHART. V, *An Evaluation of the Resistance of Pipeline Steels to Initiation and Early Growth of Stress Corrosion Cracks*, Engineering Fracture Mechanics, v.71, p.913–921, 2004.

CESEC, Centro de Estudos de Engenharia Civil – UFPR. *PIG*. RS: Cesec, 2006. Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br/~dinelpar/>>. Acesso em: 4 de março de 2006.

CHEN, H. F.; SHU, D., *Simplified Limit Analysis of Pipelines with Multi Defects*, Engineering Structures, v.23, p.207-213, 2001.

CHOI, J. B.; GOO, B. K.; KIM, J.C.; *Development of Limit Load Solutions for Corroded Gas Pipelines*, Int. J. Pres. Ves. Piping, v.80, p.121-128, 2003.

CHOUCHAOUI, B. A.; PICK, R. J., *Behaviour of Longitudinally Aligned Corrosion Pits*, Int. J. Pres. Ves. Piping, v.67, p.17-35, 1996.

CARIATI, S. A. *Detecção de vazamentos por computador on-line em tubulações transportando líquido e misturas gás-líquido*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CARVALHO, A. M. C., *Avaliação da Integridade Interna de Sistema de Oleodutos da PETROBRAS (E&P – RNCE)*, 18º Congresso Brasileiro de Corrosão – IMCORR 95, Vol. II pp. 969-982, 1995.

CHUNG, W.-Y., LEE, D.-D. *Real time multi-channel gas leakage monitoring system using CPLD chip*. Sensors and actuators B, v. 77, p. 186-189, 2001.

CIST, D. B., SCHUTZ, A.E. *State of the art for pipe & leak detection*, Geophysical Survey Systems, Inc., N. Salem, USA, Nov 2001.

DEMPSEY, J., AL-HABIB, R. *Scada computer system controls major Saudi Aramco crude oil pipeline*. 5th World Congress on Chemical Engineering, v. 1, p. 973-980, San Diego, California, USA, 1996.

FUKUSHIMA, K., MAESHIMA, R., KINOSHITA, A., SHIRAISHI, H., KOSHIJIMA, I. *Gas pipeline leak detection system using the online simulation method*. Computers and Chemical Engineering, v. 24, n.2-7, p.453-456, 2000.

GÁS E ENERGIA. *Gás Natural*. SP: Gás e energia, 2006. Disponível em: <<http://www.gasenergia.com.br>>. Acesso em: 4 de março de 2006.

GASNET. *Gás Natural*. SP: Gasnet, 2007. Disponível em:

<<http://www.gasnet.com.br>>. Acesso em: 20 de outubro de 2007.

GASNET. *Gasoduto Brasil-Bolívia (Gasbol)*. SP: Gasnet, 2007. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/novo_gasoduto/gasbol.ASP>. Acesso em: 20 de outubro de 2007.

GASNET. *Gasoduto Brasil 2007*. SP: Gasnet, 2007. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/novo_gasoduto/operacao.ASP>. Acesso em: 20 de outubro de 2007.

GASPETRO. *Rede Gas e Energia – Petrobrás*. SP: Gaspetro, 2007. Disponível em: <<http://www.gaspetro.com.br>>. Acesso em: 20 de outubro de 2007.

GENTIL, V. *Corrosão*. LTC. RJ: 2003.

GONZALEZ, R., WOODS, P. *Digital Image Processing*. 2 nd. Prentice Hall. NY: 2002.

GUO, B.; GHALAMBOR, A. *Natural gas engineering handbook*. Houston: Gulf Publishing Company, 2005.

International Pipeline Conference, ASME IPC 2002, IPC02 27191, Calgary, 2002.

JÄHNE, B. *Digital Image Processing*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, NY: 2002.

JONSSON, L., LARSON, M. *Leak detection through hydraulic transient analysis. Pipeline System*, v. 7, Fluid Mechanics and its Applications, p. 273-286, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers, 1992.

KE, S.L., TI, H.C. *Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network*. Chemical Engineering Journal, v. 76, p. 169-177, 2000.

KENNEDY, J. L. *Oil and Gas pipeline fundamentals*, 2.ed., PennWell Publishing

Company, Tulsa, USA, 1993.

LOPES, L. M., CONSULARO, L. A. A RBFN *Perceptive Model for Image Thresholding*, Proc. of SIBGRAPI, pp 225-232, 2005.

LOURENÇO, S. R.; TAMBOURGI, E. B., *The consolidation of the natural gas in the brazilian energy traid, analysis of the current situation and perspective* , 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasília, DF, 2007.

MACIAS, I. B. *Detecção de vazamentos em tubulações transportando gás*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MATKO, D., GEIGER, G., GREGORITZA, W. *Pipeline simulation techniques*. Mathematics and Computer in Simulation, v.52, p. 211-230, 2000.

NATURAL GAS. *Natural Gas Infrastructure*. SP: Natural Gas, 2006. Disponível em: <<http://netl.doe.gov/seng/transdist/distribute.html>>. Acesso em: 15 de abril de 2006.

NAVES, G. J. *Técnicas de computação em tempo real em controle e supervisão de tubulações*. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PUDAR, R. S., LIGGETT, J. A. *Leaks in pipe networks*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 118, n. 7, p.1031-1046, 1992.

RAMANATHAN, L.V., *Corrosão e seu Controle*, Embracop, São Paulo, 2004.

SANDBERG, C., HOLMES, J., MCCOY, K., E KOPPITSCH, H. *The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment*. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 25, n. 5, p. 906-909, 1989.

SILVA, A. R. *Supervisão de tubulações por computador on-line*. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SINHA, D. N. *Acoustic sensor for pipeline monitoring*. Gas Technology Management Division Strategic Center for Natural Gas and Oil National Energy Technology Laboratory . Los Alamos National Laboratory, 2005.

SOUSA, E. O. *Detecção de vazamentos em tubulações através de método acústico e da análise de transientes de pressão*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SOUZA, A. L. *Detecção de vazamentos em tubulações através da Análise Espectral*. 2002. Tese (Doutoramento em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TRANSPETRO. Petrobras Transporte S/A. *Site Transpetro*, 2007. Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br/portugues/negocios/dutosTerminais/gasodutos.html>>. Acesso em: 13 de outubro de 2007.

VERDE, C. *Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines*. Control Engineering Practice, v. 9, p. 673-682, 2001.

WIKE, A. *Liquid pipelines can use many varieties of Scada-based leak detection systems*. Pipeline & Gas Journal, v.213, n. 6, p.16-20, 1986.

ZHANG, J. *Statistical pipeline leak detection for all operating conditions*. Pipeline & Gas Journal Online, 2001.

ZIRNIG, W. *A concept for natural gas transmission pipeline monitoring based on new high-resolution remote sensing technologies*. IGRC Summary Report, Amsterdam, 2001.