



CARLOS ANTONIO BERTO JUNIOR

**SOFTWARE PARA IDENTIFICAÇÃO DE CORROSÃO  
INTERNA NAS TUBULAÇÕES DOS GASODUTOS A PARTIR  
DE IMAGENS GRAVADAS POR UM ROBÔ DE INSPEÇÃO**

CAMPINAS

2013





UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

CARLOS ANTONIO BERTO JUNIOR

**SOFTWARE PARA IDENTIFICAÇÃO DE CORROSÃO INTERNA NAS  
TUBULAÇÕES DOS GASODUTOS A PARTIR DE IMAGENS  
GRAVADAS POR UM ROBÔ DE INSPEÇÃO**

Orientador: Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA  
PELO ALUNO CARLOS ANTONIO BERTO JUNIOR E ORIENTADO  
PELO PROF. DR. ELIAS BASILE TAMBOURGI

A handwritten signature in black ink, appearing to be "E. Tambourgi", is written over a light gray rectangular background.

Assinatura do Orientador

CAMPINAS

2013

III

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -  
UNICAMP

B462s	<p>Berto Junior, Carlos Antonio Software para identificação de corrosão interna nas tubulações dos gasodutos a partir de imagens gravadas por um robô de inspeção / Carlos Antonio Berto Junior. --Campinas, SP: [s.n.], 2013.</p> <p>Orientador: Elias Basile Tambourgi. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.</p> <p>1. Corrosão. 2. Tubulações. 3. Gás - Tubulações. 4. Operações unitárias (Engenharia Química). I. Tambourgi, Elias Basile, 1957-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: Software for identifying internal corrosion in pipelines from images recorded by an inspection robot

Palavras-chave em Inglês: Corrosion, Pipelines, Gas - Pipelines, Unit operations (Chemical Engineering)

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia

Banca examinadora: Jabra Haber, Sergio Ricardo Lourenço, Patrícia Bernardi Leite da Silva, Flávio Vasconcelos da Silva

Data da defesa: 19-02-2013

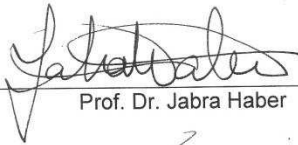
Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Tese de Doutorado, defendida por Carlos Antonio Berto Junior, em 19 de fevereiro de 2013 e aprovada pela banca examinadora:



---

Prof. Dr. – Elias Basile Tambourgi – orientador




---

Prof. Dr. Jabra Haber



---

Prof. Dr. Sergio Ricardo Lourenço



---

Dr<sup>a</sup>. Patricia Bernardi Leite da Silva



---

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

## **Resumo**

O trabalho apresenta a metodologia aplicada à automação de partes do processo de inspeção das tubulações de gasodutos, utilizando técnicas de processamento de imagem para identificar corrosão. Como o gás natural possui alguns contaminantes que, além de serem corrosivos, comprometem a qualidade para o consumo, dessa forma, a condensação de água residual presente no gás pode iniciar um processo corrosivo localizado, que acarreta 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, provenientes de efeitos corrosivos foram avaliadas imagens, que são processadas digitalmente e analisadas por um software desenvolvido para tal finalidade que é utilizado na verificação das imagens e, ao mesmo tempo, na identificação das não-conformidades presentes e na orientação do processo de manutenção.

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 ultrassom, 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:** Falhas em tubulações. Técnicas de monitoramento de tubulações. Processamento e análise digital de imagens.

## **Abstract**

This thesis presents a methodology applied to automate the pipeline inspection process, using image processing techniques to identify the corrosion. As natural gas has some contaminants, besides being corrosive, affect the quality for consumption, thus the condensation of residual water present in the gas corrosion process can initiate a localized, which results in damage to the pipeline structure. Due to the large extension of the ducts, the corrosive affect the quality of the gas and cause major disruptions in operational order. To evaluate the reduction of the wall thickness of the metal, from the corrosive effects were evaluated images which are digitally processed and analyzed by software developed for this purpose which is used to verify the images and at the same time, the identification the problems and guidance of maintenance process.

Currently the techniques adopted for this assessment consist to insert a robot, known as pipeline inspection gauge (PIG) with scanning through ultrasound, thermography, optical sensors, Hall Effect sensors and sensors for electrical resistance analysis, plus special field surveys conducted on the soil surface. Thus, the present study was guiding to reduce the costs for maintenance and provide a precise identification of failures. It was implemented a standalone PIG for continuous monitoring of the internal region of the ducts, that fitted with infra-red cameras, what distinguishes this machine from the current for the same purpose. The cameras provide images that are digitally processed and stored in a nonvolatile memory in this machine. The software is used to verify the images and at the same time, identify nonconformities present. This information will be used as a guide in making decisions about the maintenance process that should be used for the solvency of the problems encountered.

**Key-words:** Failures in pipelines. Monitor pipeline. Digital Images Processing and Analysis (DIPA).

## **Sumário**

Resumo	VI
Abstract	VII
1. Introdução	1
1.1. Problema	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Justificativa	3
1.4. Metodologia adotada nos ensaios	4
2. Processamento e análise digital de imagens	6
3. Corrosão, falhas e degradação de metais	28
3.1. Formas e localização da corrosão	30
3.2. Taxas de corrosão	31
3.3. Falhas – trincas	32
4. Análise do PDI a partir das informações coletadas pelo robô de inspeção	36
5. Resultados e discussão	40
6. Considerações finais	54
7. Referências bibliográficas	56
8. Anexos	63



## **1. Introdução**

Com mais de nove mil quilômetros de extensão (ANP, 2012), a rede de dutos brasileira é composta de tubulações metálicas de vários diâmetros, por onde circula o gás natural. Manter essa malha em pleno funcionamento requer complexos sistemas de monitoramento aliados aos planejamentos de reparo, o que incentiva investimentos em tecnologia nessa área.

No intuito de monitorar internamente os gasodutos, foi criado um PIG (do inglês *pipeline inspection gauge*; em português dispositivo para inspeção de dutos) inteligente, que pode ser comparado a um robô, utilizado para limpar tubulações e 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 meio de um sistema microcontrolado durante o percurso da inspeção.

Impulsionado pelo gás no interior da tubulação, o robô se move a uma velocidade de 3 metros por segundo, por uma extensão de até 150 km, devido à autonomia das baterias. Para cada duto inspecionado, é preciso construir um robô que se encaixe perfeitamente em seu diâmetro. O equipamento serve tanto para a avaliação de um duto antes do início de sua operação quanto para sua manutenção. A verificação regular pode ser realizada anualmente, o que reduz a possibilidade de falhas estruturais irreparáveis, além de diminuir o risco de vazamento a médio ou longo prazo.

Denota-se que um sistema de detecção deve ser sensível o suficiente para fornecer notificação precisa e rápida e ao mesmo tempo ter baixa frequência 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.

A área de visão computacional, em geral, e processamento de imagens, em particular, tem um papel importante na vida humana. Atualmente, o campo de processamento de imagens tem inúmeras aplicações comerciais, científicas, industriais, médicas, militares, de entretenimento e outras. Todas essas aplicações resultam da interação entre pesquisas científicas fundamentais, e o desenvolvimento de novas tecnologias de alto padrão. Essa interação contínua levou a uma área de pesquisa ativa e bastante ampla. Alguns tópicos bem conhecidos em processamento de imagens são melhoria da qualidade da imagem (filtragem,

redução de ruídos, realce, restauração), análise de imagem (detecção de borda, segmentação, reconhecimento de objetos, interpretação), compressão de imagem e reconstrução de imagem.

O Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI) é uma ferramenta relativamente recente que cresce acompanhando o desenvolvimento dos recursos computacionais. Consiste na utilização de operações matemáticas para alterar os valores dos pixels de imagens digitais, modificando-as, para facilitar sua visualização e/ou para proceder à extração de dados quantitativos. A utilização de PADI abre novas perspectivas para a caracterização de materiais, pois permite fazer medidas impossíveis de serem realizadas manualmente e confere maior reprodutibilidade, confiabilidade e velocidade ao processo. Além disso, possibilita o uso de técnicas de reconhecimento de padrões e inteligência artificial para automatizar procedimentos de classificação.

De fato, quando se pensa na utilização de técnicas de PADI para a caracterização de materiais, vem à mente a automação, de modo que, a partir de uma amostra adequadamente preparada ou de uma imagem digital desta, aperte-se um botão e o computador forneça o resultado. Para isto, as rotinas de PADI seguem uma seqüência padrão de etapas, através da qual pode-se ir de amostras ou imagens digitais a dados quantitativos interpretados.

### 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.

A inspeção interna dos gasodutos é realizada por análise físico - químicas e PIG. Diversos PIG inteligentes são usados extensivamente para inspecionar gasodutos e a sua utilização está aumentando mediante os benefícios comprovados, expandindo as capacidades e requisitos legais. O resultado de uma inspeção por um PIG inteligente é um relatório com uma lista de defeitos, o qual se destaca como benefício integral de uma inspeção para o operador do gasoduto, uma lista de defeitos que auxilia na manutenção para a integridade do gasoduto.

Falhas graves incluem:

- ✓ Corrosão (ou qualquer perda de metal) mais do que 80%, através da parede do tubo.
- ✓ “Ondulações” superiores a 6% do diâmetro do tubo.
- ✓ “Ondulações” com perda de metal ou fissuras.

- ✓ “Ondulações” sobre as soldas de má qualidade.
- ✓ Trincas.

## 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 técnica 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.

Estas imagens são analisadas utilizando o processamento digital que consiste na extração e tratamento de dados quantitativos de imagens digitais. Através da análise digital da imagem pode-se realizar medições mais rápidas, precisas e acuradas, possibilitando ainda a realização de medidas impossíveis de se executar manualmente.

## 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 conseqüências 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 adotada nos ensaios

Neste trabalho foi utilizado PIG 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 câmara digital com *light emitting diode* (LED) infra-vermelhos para auxiliar na captação das imagens em ambientes com baixa luminosidade. A comunicação de dados entre a câmara digital e o computador é realizada por uma interface universal serial bus (USB), que simula o processamento digital de imagem.

Na simulação este PIG deslocou-se em um trecho de tubulação de aço de 2 metros de comprimento, utilizando um motor elétrico de corrente contínua acoplada ao PIG para tracioná-lo com velocidade constante.

A tubulação é constituída de tubo de aço de 0,102 metros de diâmetro e 2 metros de comprimento.

O sistema utilizado para a realização dos ensaios na detecção de falhas na tubulação está apresentado na Figura 1, onde se observa: (a) PIG com a câmara digital (b) e (c) trecho da tubulação e (d) PIG com a tubulação.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1: Sistema realizado nos ensaios de detecção de falhas. (a) PIG com câmara, (b) e (c) trecho da tubulação e (d) PIG e tubulação.

As falhas na tubulação foram imagens gravadas na parte interior, conforme mostra a Figura 2. Na Figura 2 (a) destaca-se uma falha junto a solda e na Figura 2 (b) observa-se uma corrosão generalizada.

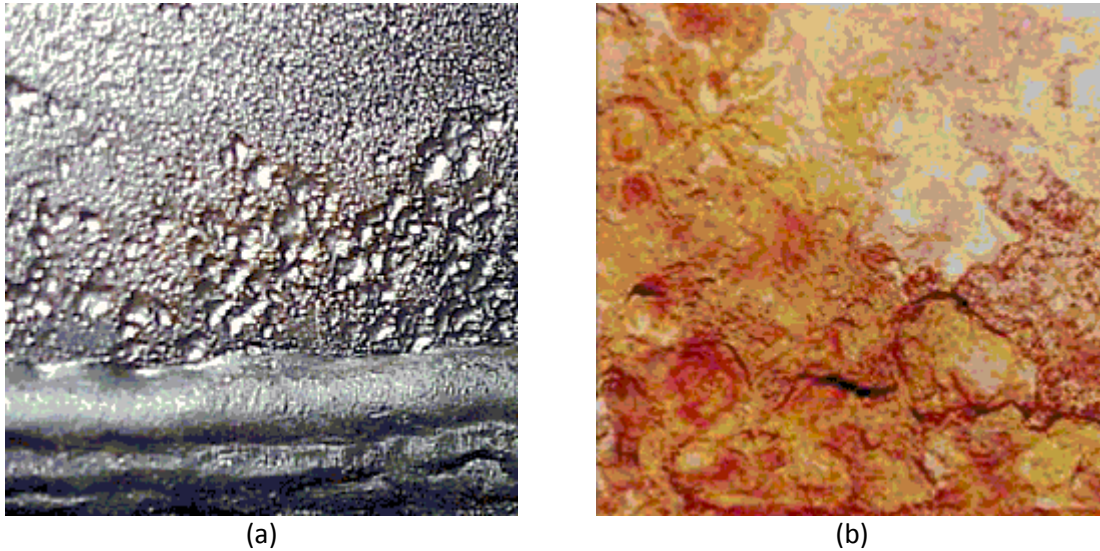


Figura 2: Falhas na tubulação. (a) falha na solda e (b) corrosão generalizada.

O deslocamento horizontal do PIG, através da tubulação de 2 metros de comprimento, foi realizado experimentalmente, na tubulação, tracionado pelo motor elétrico acoplado ao sistema de tração. As imagens gravadas pela câmera digital, que e por sua vez estava conectada ao computador foram armazenadas no disco rígido para análise posterior.

As simulações no software desenvolvido para processamento e análise digital das imagens, contemplam as seguintes etapas: aquisição, processamento digital da imagem e análise digital desta imagem. A aquisição tem, como entrada, uma amostra adequadamente preparada e engloba a formação da imagem e sua digitalização, fornecendo, como saída, um arquivo digital de imagem. A partir daí, o processo torna-se inteiramente digital. O processamento digital da imagem consiste no pré-processamento, segmentação e pós-processamento. Sendo assim, este processo recebe a imagem original, oriunda da aquisição, e fornece uma imagem processada. No entanto, a análise digital da imagem, trata da extração de atributos e reconhecimento de padrões e classificação, o qual recebe a imagem processada e fornece dados numéricos, constituindo-se na fase quantitativa do processo.

No pré-processamento e na segmentação, opera-se diretamente sobre os pixels da imagem, gerando-se uma imagem com objetos, representados por regiões de pixels contíguos de mesmo valor. No pós-processamento e na extração de atributos, trabalha-se sobre os objetos, acabando por medi-los. A partir daí, na etapa de reconhecimento de padrões e classificação, trabalha-se com estas medidas, gerando-se dados de mais alto nível.

## **2. Processamento e análise digital de imagens**

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 3, 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.

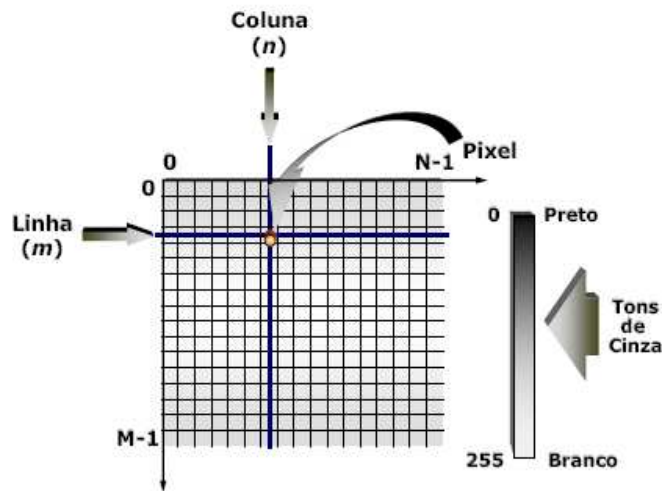


Figura 3: Representação de uma imagem digital bidimensional  
Fonte: Jähne, 2002

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 refletância,  $r(x,y)$ , associada à quantidade de luz refletida pelo ponto  $(x,y)$  (GONZALEZ, 2002). O produto de  $i(x,y)$  e  $r(x,y)$  resulta em:

$$f(x,y) = i(x,y).r(x,y) \quad (1)$$

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:

$$f(x,y) = f_R(x,y) + f_G(x,y) + f_B(x,y) \quad (2)$$

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 4, 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.

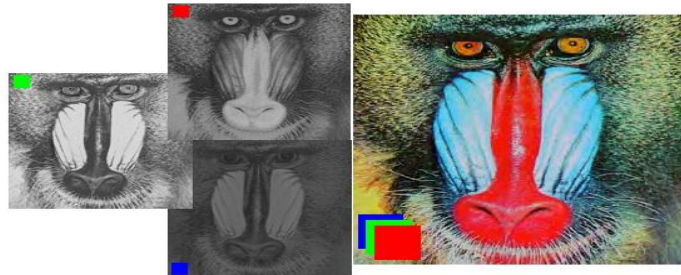


Figura 4: Representação dos planos monocromáticos de uma imagem digital  
Fonte: Gonzalez, 2002

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  $\{0, 1, \dots, L - 1\}$ .

$$F \approx \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M,0) & f(M,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

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:

$$L = 2^l \quad (4)$$

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

$$b = M \times N \times l \quad (5)$$

Percebe-se, a partir da equação  $b = M \times N \times l$ , 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 1 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 1: Número de *bytes* para uma imagem monocromática  
 Fonte: Acharya, 2005

<b>M</b>	<b>N</b>	<b>Número de bytes</b>		
		<b>L = 2</b>	<b>L = 32</b>	<b>L = 256</b>
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 5(A) a 5(D), ilustra-se a influência dos parâmetros de digitalização na qualidade visual de uma imagem monocromática.



Figura 5: 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  $I_R = \log_2(L_R)$ ,  $I_G = \log_2(L_G)$  e  $I_B = \log_2(L_B)$ , o número de *bits* por *pixel* necessário para representar as cores será igual a  $I_R + I_G + I_B$  e o número de *bits* necessário para representar uma imagem digital de dimensões  $M \times N$  será:

$$b = M \times N \times (I_R + I_G + I_B) \quad (6)$$

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 2 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 2: Número de *bytes* para uma imagem colorida  
Fonte: Acharya, 2005

<b>M</b>	<b>N</b>	<b>Número de bytes</b>		
		<b>L = 2</b>	<b>L = 32</b>	<b>L = 256</b>
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 6 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 sensoriamento em um formato digital.

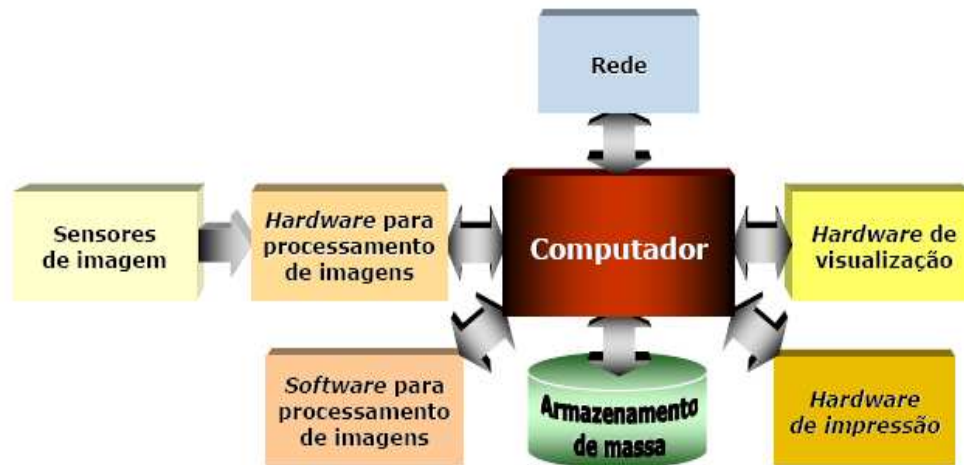


Figura 6: Diagrama em blocos de um sistema típico para processamento de imagens  
 Fonte: Jähne, 2002

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 histogrâmica;

- ✓ 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 ( $f_{e_i}$ ), conforme Figura 7(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 7(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 8 ilustra genericamente uma operação pontual unária.

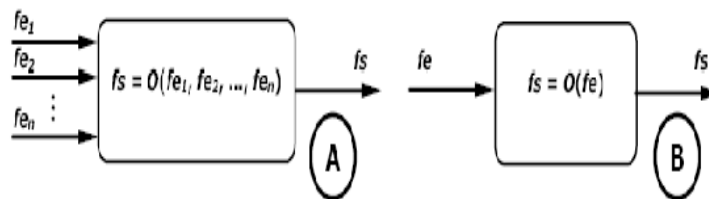


Figura 7: Operação no domínio do espaço: (A) n-árias; (B) unárias  
 Fonte: Jähne, 2002

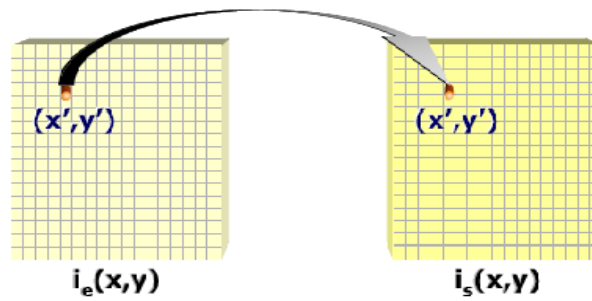


Figura 8: Operação pontual unária  
 Fonte: Jähne, 2002

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,  $f_{e_1}(x,y)$ ,  $f_{e_2}(x,y)$ ,  $f_{e_n}(x,y)$ ; 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 9.

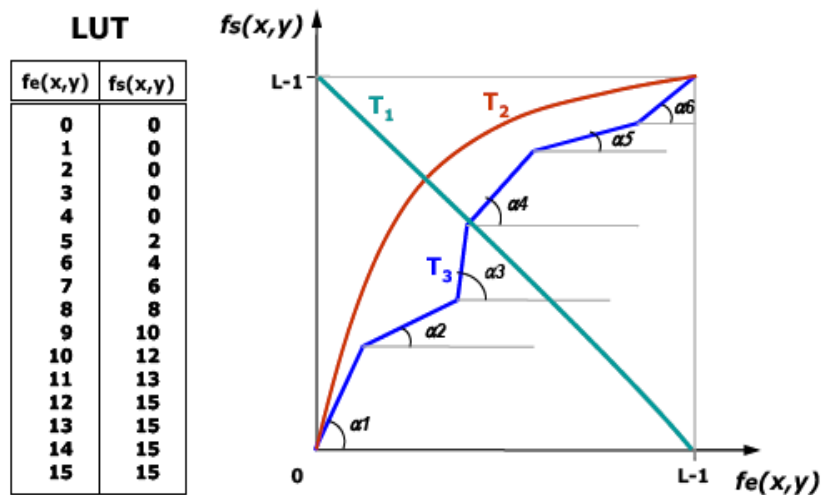


Figura 9: Exemplo de LUT e diagramas de transformação  
 Fonte: Acharya, 2005

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 10. 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).

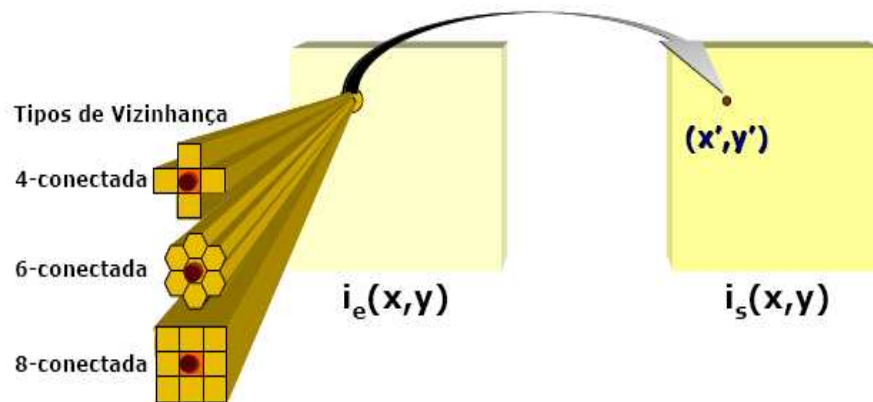


Figura 10: Exemplo de vizinhanças utilizadas em operadores locais  
 Fonte: Acharya, 2005

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 por:

$$H_f(C) = \frac{n_c}{(M \times N)} \quad (7)$$

sendo  $n_c$  o número de vezes em que o nível de cinza C se apresenta na imagem. A Figura 11 ilustra alguns exemplos de histogramas.

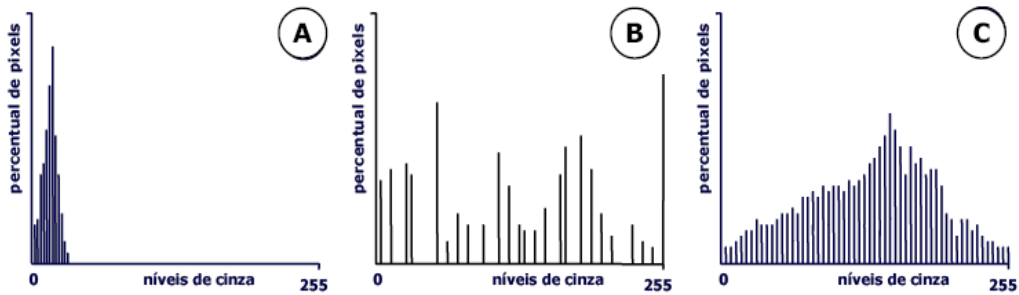


Figura 11: Histogramas: (A) imagem com baixo contraste; (B) imagem usando toda a faixa de tons de cinza, com dois tons de cinza dominantes; e (C) imagem usando toda a faixa de tons de cinza, com componentes ocupando a faixa de modo mais equidistante

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:

$$T(n_{ce}) = rnd \left\{ \left[ \frac{(L-1)}{((M \cdot N) \cdot H_f(n_{ce}))} \right] \right\} \quad (8)$$

na qual *rnd* representa o arredondamento do resultado da expressão para o inteiro mais próximo. Na Figura 12, exemplifica-se processo da equalização histogrâmica.

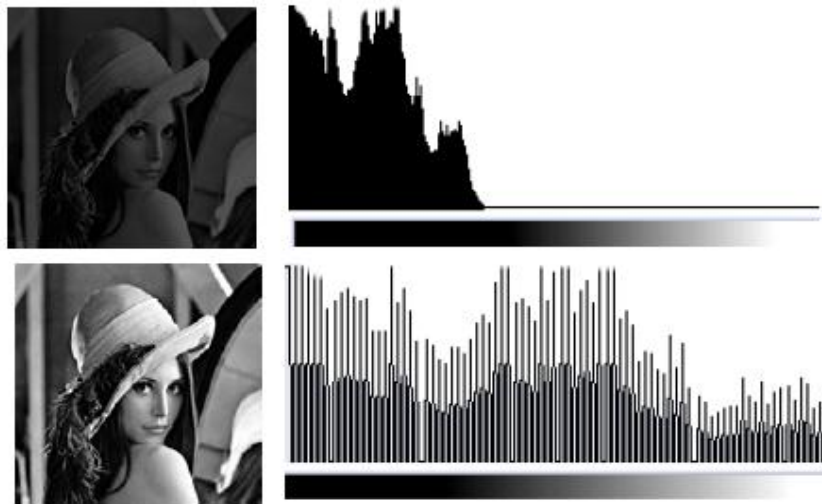


Figura 12: Exemplo de equalização histogrâmica  
Fonte: Acharya, 2005

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 13.

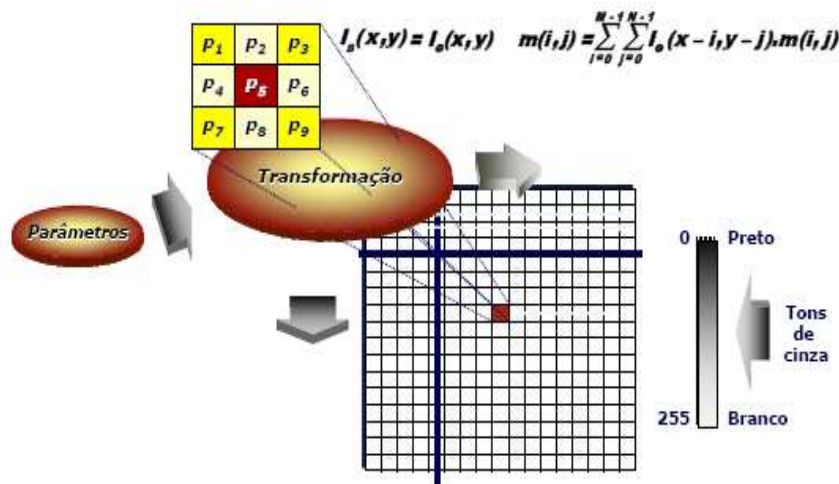


Figura 13: Representação gráfica do processo de filtragem espacial

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 14, ilustra-se o efeito de filtragem de uma imagem ruidosa com máscaras 3x3 e 5x5.



Figura 14: 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. Define-se como gradiente de uma função  $f$ , contínua em  $(i, j)$ , o vetor:

$$G[f(i, j)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial i} \\ \frac{\partial f}{\partial j} \end{bmatrix} \quad (9)$$

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 expressão:

$$G[f(i, j)] = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial i} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial j} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

que é uma representação da taxa de variação de  $f(i, j)$  por unidade de distância no sentido de  $G$ .

A equação  $G[f(i, j)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial i} \\ \frac{\partial f}{\partial j} \end{bmatrix}$  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:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } G_y = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

o que pode ser contornado a partir da utilização de janelas quadradas:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

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

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial i^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial j^2} \quad (13)$$

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 15.

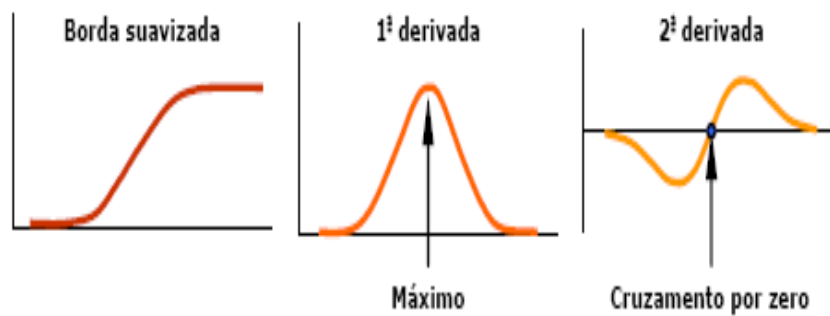


Figura 15: Verificação da existência de uma borda a partir do gradiente e do Laplaciano  
Fonte: Acharya, 2005

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

$$\nabla^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Embora haja uma grande variedade de operadores de gradiente, serão mencionados aqui apenas os operadores de Roberts, Prewitt e Sobel. 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.

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad e \quad G_y = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Além da diferenciação, sem o enviesamento do gradiente digital, o operador de Prewitt suaviza a imagem, atenuando o ruído.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad e \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Similar ao operador de Prewitt, o operador de Sobel é diferente 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.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad e \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

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 16, 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  $Z^2$ .

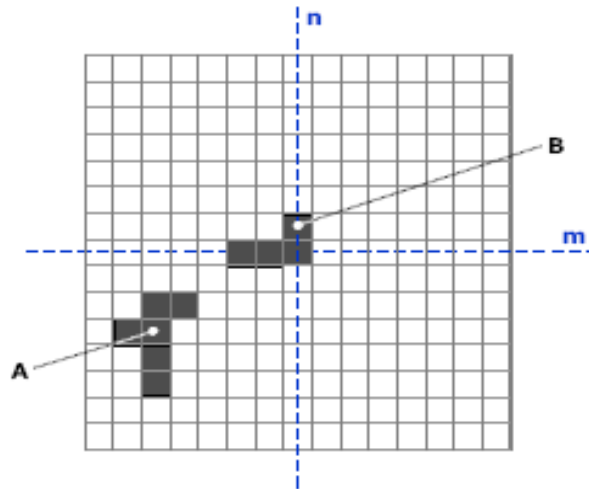


Figura 16: Imagem binária contendo 2 objetos (2 conjuntos de pontos)  
 Fonte: Acharya, 2005

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 17.

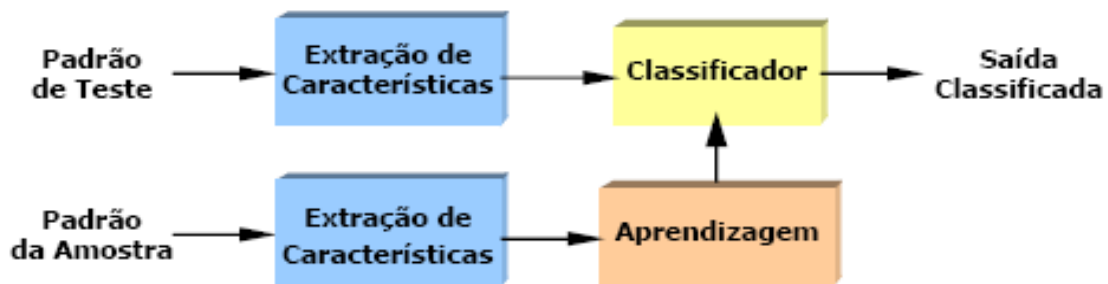


Figura 17: Representação geral para o processo de classificação  
Fonte: Acharya, 2005

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).

### ***3. 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 18 e 19. 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.

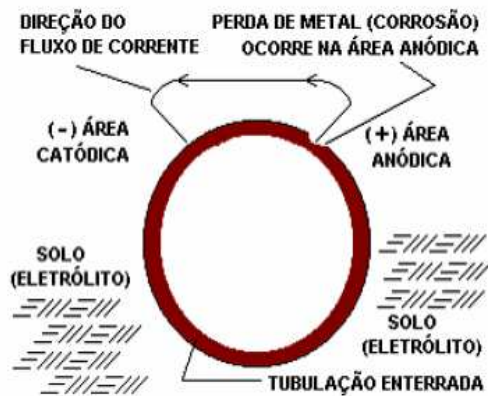


Figura 18: Célula de corrosão básica  
Fonte: Abraco, 2006

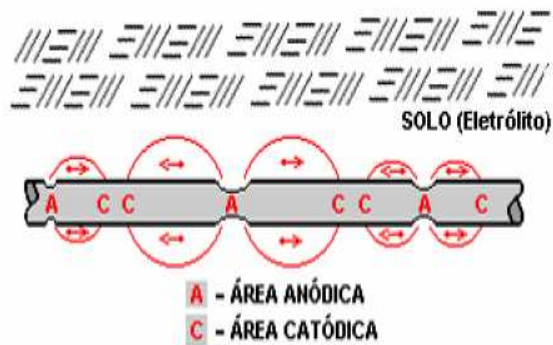


Figura 19: Múltiplas células de corrosão ao longo de tubulação enterrada  
Fonte: Abraco, 2006

### 3.1. 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 e Pick (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 20 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 e Andrade (2004) e Souza (2003).

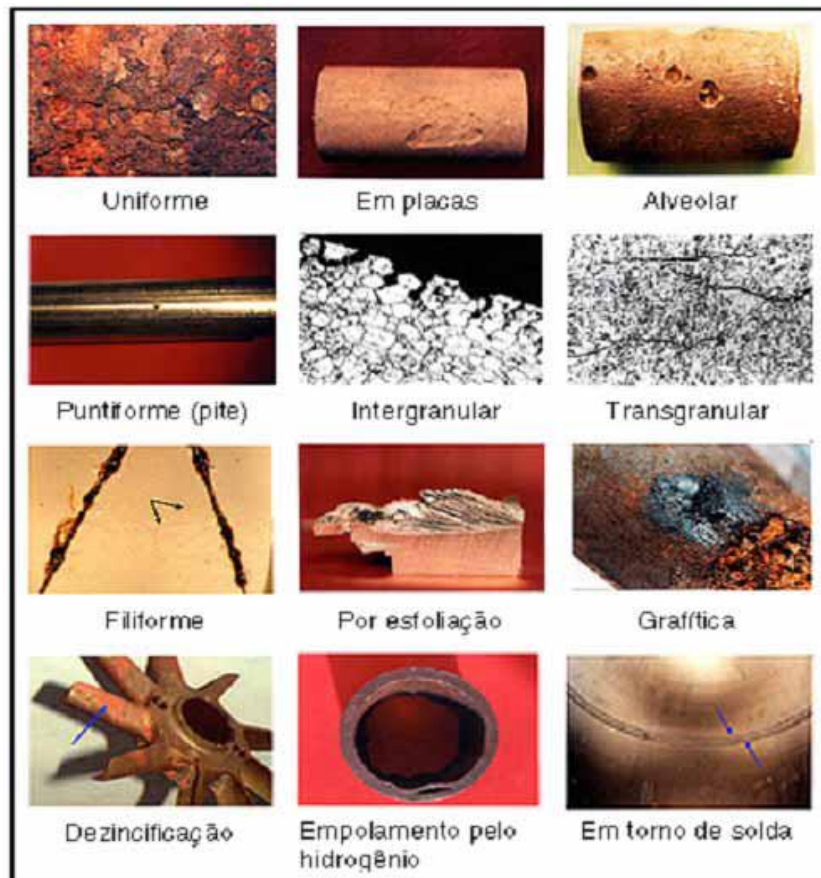


Figura 20: Formas de corrosão

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).

### 3.2. 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).

Nóbrega 2008 descreve a dificuldade em se identificar os locais onde a corrosão interna ocorre e assim torna inevitável a ocorrência de falhas não previstas, com possíveis conseqüências danosas a pessoas e ao meio ambiente; embora a importância da corrosividade interna em dutos seja muitas vezes subestimada. Vale a pena salientar que o perfil de escoamento do fluido é uma característica de grande importância para o estudo da corrosão em gasodutos, pois dependendo da velocidade do fluido, é possível encontrar diferentes perfis de escoamento. O fato de os gasodutos poderem vir a operar com produtos diferentes e mais corrosivos ou vazões e pressões maiores do que as de projeto, associadas a exigências da legislação de segurança e de preservação ambiental, determinam a importância de ações eficazes na garantia de sua integridade.

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 monitoração se apresentam como uma opção complementar.

A utilização de imagens atraídas ao processamento e análise digital permite verificar qual a forma de corrosão apresentada (uniforme, generalizada etc). A intensidade da corrosão é associada a diversos fatores 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 vantagens do método de processamento e análise digital da imagem é permitir que seja feita uma distinção entre o processo corrosivo localizado e o generalizado, podendo também caracterizar a presença de depósitos condutores, como sais em geral e sulfeto de ferro abordado por Carvalho (1995).

### 3.3. Falhas - trincas

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 21 mostra representações esquemáticas para dois perfis macroscópicos característicos de fratura.

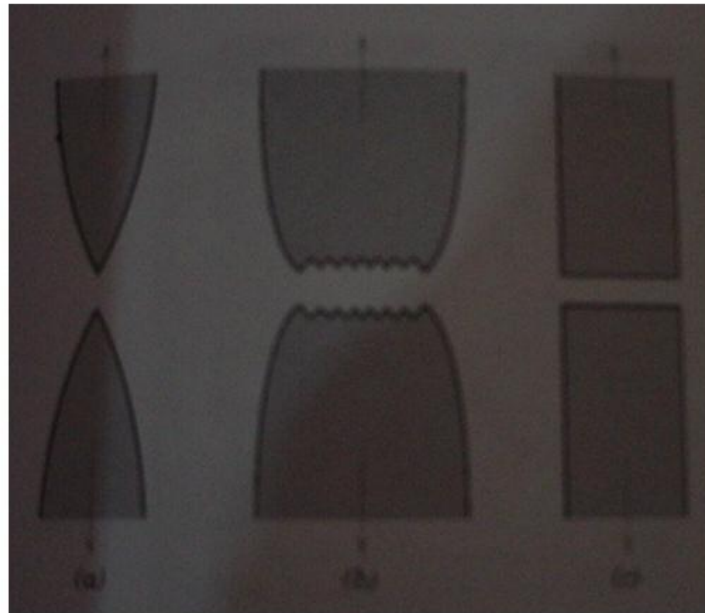


Figura 21: (a) Fratura altamente dúctil na qual a amostra empescoça até um único ponto. (b) Fratura moderadamente dúctil após algum empescoçamento. (c) Fratura frágil sem qualquer deformação plástica  
Fonte: Callister, 2002

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 tensão máxima na extremidade da trinca,  $\sigma_m$ , é igual a



$$\sigma_m = \sigma_0 \left[ 1 + 2 \left( \frac{a}{\rho_e} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (18)$$

onde  $\sigma_0$  representa a magnitude da tensão de tração nominal aplicada,  $\rho_e$  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 22 caracteriza a geometria das trincas e o diagrama esquemático do perfil.

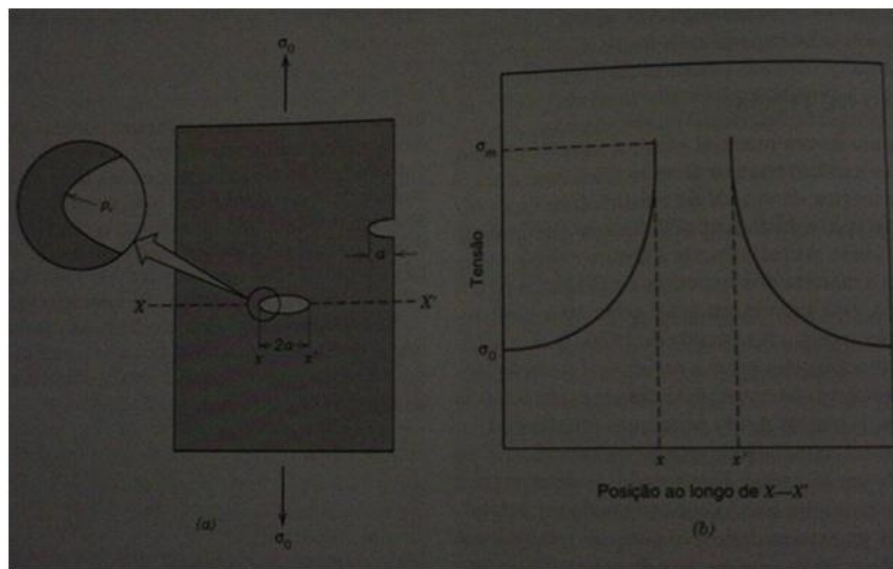


Figura 22: (a) Geometria das trincas de superfície e internas. (b) Diagrama esquemático do perfil de tensão ao longo da linha X – X' em (a), demonstrando a amplificação de tensão nas extremidades da trinca  
Fonte: Callister, 2002

Por Corimaya (2011), a tecnologia de soldagem de tubulações para o transporte de petróleo, gás e outros produtos tem levado a um constante desenvolvimento de novos aços com o propósito de atender todos os requisitos de fabricação de estruturas com alta resistência e baixo peso. Para tal caso, novos aços com maiores limites de resistência e maiores valores de tenacidade têm sido desenvolvidos, nestes últimos anos os aços da classe API X120, X80, entre

outros foram recentemente desenvolvidos pela indústria para aplicação em tubos para gasoduto, oleoduto e construções navais, submetidos à alta pressão, onde a economia em peso é muito importante para o projeto. Portanto, este constante desenvolvimento de aços com propriedades mecânicas melhoradas e a necessidade por uma maior produção tem levado também a diversos produtores e pesquisadores a procurar novas alternativas para a soldagem destes aços. Atualmente a soldagem de tubulações é bastante aplicada em projetos de grande envergadura, e o processo de soldagem mais conhecido e utilizado até agora é o processo a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) o a combinação deste com outros processos. Embora este processo, venha sendo substituído ultimamente pelo processo de soldagem com arame tubular (Flux Cored Arc Welding-FCAW), devido a suas principais características como elevada flexibilidade, alta qualidade do metal depositado, e à maior taxa de deposição comparada com outros processos tem contribuído para a utilização deste último processo.

Ainda referenciado o trabalho de Corimaya (2011), o mesmo destaca que recentemente, o processo FCAW começou a ser aplicado na soldagem de aços da classe API. O uso destes arames, em particular auto-protegidos, tem-se mostrado bastante promissor para a soldagem de dutos em campo. Mesmo assim, uma das dificuldades encontradas em projetos que utilizam aços soldados, como esses arames, é o escasso conhecimento sobre: as propriedades das juntas que envolvem o metal base, a zona afetada pelo calor e a zona de fusão. O trincamento induzido por hidrogênio (TIH) é considerado um dos maiores defeitos encontrados na junta soldada de aços com alto limite de resistência. Os principais fatores que contribuem para a formação deste tipo de trincas são: a presença de hidrogênio na junta soldada, uma micro estrutura suscetível e altos níveis de tensão. Todos estes fatores são influenciados pela variação da taxa de resfriamento que, por sua vez, pode ser modificada alterando-se o insumo de calor ou a temperatura de pré-aquecimento.

#### **4. Análise do Processamento Digital de Imagens a partir das informações coletadas pelo robô de inspeção**

Visando à otimização do processo de detecção de defeitos da região interna dos dutos, oriundos da corrosão, foi implementado um robô, provido de câmeras de alta resolução distribuídas ao redor da estrutura, para abranger toda a circunferência do duto. Toda imagem é digitalizada, por intermédio de um microcontrolador *digital signal processing* (DSP), e gravada em memórias não-voláteis.

O módulo de entrada é constituído por uma câmera que capta a imagem real do duto e envia a informação, sob a forma de sinal analógico de vídeo, a um conversor analógico digital. A imagem é então representada na forma digital. Uma imagem digital é discretizada espacialmente (x e y) e em luminância (níveis de cinza). Uma imagem típica de 640 x 480 pixels por 256 níveis de cinza, por exemplo, tem 307200 bytes. Alguns exemplos de módulos de aquisição são as câmeras a tubo (Vidicom) ou CCD, os scanners ou ainda alguns sensores dedicados (como sistemas de infravermelho, mapeamento magnético de uma superfície, sensoriamento de radares etc.). A câmera de vídeo é o sensor de aquisição de imagem mais freqüentemente utilizado.

Uma câmera de vídeo apresenta características de sensibilidade, resolução e função de transferência (entre a imagem captada da cena e a intensidade do sinal de vídeo fornecido). Algumas câmeras mais sofisticadas permitem controlar o *offset* ou ganho do sinal de vídeo, possibilitando uma correção do contraste da imagem em tempo real. Em alguns casos, podemos encontrar módulos que permitem o ajuste da iluminação de fundo ou ainda o realce dos contornos dos objetos pela execução de funções específicas.

O sinal de vídeo gerado pelo dispositivo de aquisição é convertido em sinal discreto pelo conversor analógico digital, um dispositivo de conversão especial para sinais de vídeo, em que a aquisição é realizada segundo a padronização desses sinais (linha a linha). Após a conversão da imagem pelo módulo de conversão analógica digital, cada intensidade indexa uma tabela de conversão, conhecida como *look-up table* (LUT). As LUTs são, na realidade, memórias que possibilitam a modificação das intensidades adquiridas por valores pré-programados (INOUE, 1998).

Uma das configurações implementadas foi uma função específica para corrigir, em tempo real, o contraste de uma imagem que está sendo adquirida pelo conversor analógico digital. A imagem digital é, em seguida, armazenada em uma memória principal de acesso exclusivo ao microcontrolador DSP.

Vale salientar que as imagens captadas estão em níveis de cinza, pois grande parte dos algoritmos de análise de imagens coloridas é feita recombinação dos componentes de cores e trabalhando somente com a informação de luminância. No caso de imagens coloridas, cada componente da imagem do RGB (*red, green and blue*) é armazenado separadamente na

memória principal. Outro ponto focal para utilização de imagens monocromáticas refere-se à necessidade inerente de captação de pontos de corrosão ou às falhas existentes nos dutos que não estão atreladas à alteração na cor, e sim no aspecto.

A utilização de microcontroladores DSP torna-se imprescindível, mediante o aspecto da alta capacidade de processamento das imagens captadas, em razão da necessidade de implementação de filtros digitais e compressão dos sinais captados pelas câmeras, minimizando, assim, a capacidade de armazenamento das memórias, um dos elementos mais onerosos de toda a infra-estrutura.

No processamento das imagens, os filtros digitais utilizados foram descritos linearmente por meio de uma matriz de “convolução”. A frequência espacial, análoga ao termo frequência temporal, descreveu a velocidade de modificação da luminosidade em uma direção relacionada à imagem. Nesse ínterim, para a operação de filtragem espacial, a dimensão da matriz implementada no DSP foi de 10 x 10 pixels atrelada ao filtro passa-alta, que objetiva evidenciar os contornos da imagem captada.

O robô foi construído em chapas de aço com formato cilíndrico, sustentado por rodas acopladas a amortecedores que possibilitam o deslocamento autônomo por intermédio apenas da força exercida pelo gás. Nesse aspecto, a velocidade é baixa, cerca de 6 km/h, demandando, assim, uma programação avançada para gravação das imagens, uma vez que as câmeras captam 30 frames (ou quadros) por segundo (fps). Outro detalhe é a utilização de baterias geladas e com invólucro bem como conexões especialmente adaptadas para que não ocorram faíscas.

O sistema foi plenamente projetado para realizar aquisições de imagens nas transições inerentes ao foco das câmeras, em razão da baixa velocidade do robô, ficando, no restante do tempo, em espera, economizando a energia da bateria com autonomia para um deslocamento de 150 km.

Todo sistema foi simulado com o auxílio do software Matlab e implementado em um protótipo, com dimensões reduzidas, que descreve a realidade dos gasodutos instalados atualmente.

O reconhecimento, por meio do software, da imagem gravada é parte integrante do processamento que classifica as avarias nos dutos com base nas informações encontradas na imagem, tendo como apoio padrões preestabelecidos.

As imagens utilizadas para análise são de 8 bits, 256 tons de cinza, pois esta é a profundidade que predomina em imagens de microscopia eletrônica, também sendo muito comum em microscopia óptica. Assim, para efeito de análise das imagens adquiridas todo o processamento irá converter digitalmente as imagens coloridas de 24 bits, formadas pela adição de 3 cores primárias com 256 níveis de intensidade (8 bits) para cada uma em tons de cinza.

Após a segmentação das imagens, são calculados os parâmetros dos objetos, classificando-os e inserindo-os em uma tabela.

Na classificação, todo objeto da imagem corresponde às áreas dos pixels situados na região escura ou clara da imagem, que caracterizam a imagem binária. Para cada região contígua de pixels, na área pré-classificada, é atribuído um indicador para aplicação de algoritmos que executem medidas específicas, como área (A), perímetro (P), posição na imagem (x, y), número de furos, retângulo ou elipse que melhor se adaptem à imagem.

Seguindo a determinação de Inoué (1998) para criação de um espaço de medidas, foram inseridos dois parâmetros específicos: a relação entre os eixos menor e maior de uma elipse que melhor se aproxima do objeto e o fator de forma. O valor do fator de forma tenderá para o valor um, sempre que a imagem se aproximar de um círculo ideal. Um bom espaço de medidas significa, na prática, um eficiente sistema de reconhecimento de formas, que deve ser o mais independente possível dos erros provenientes da segmentação ou da parametrização.

No caso de utilização de mais parâmetros para auxiliar a identificação, essa função será um hiperplano no espaço. É importante diferenciar as duas classes, podendo-se utilizar apenas um dos dois parâmetros, reduzindo o espaço de duas dimensões em um único eixo. Os pontos, porém, aproximariam uma da outra, o que poderia comprometer o resultado por meio dessa redução. Ressalta-se que espaços de medidas são muito importantes e utilizados em reconhecimento de formas, seja por métodos clássicos, seja por aqueles baseados em redes neurais.

Conforme Shiba (2005) na classificação supervisionada, são utilizadas as técnicas de aprendizagem de máquina para a extração de informações a partir de conhecimento a priori do usuário. Os algoritmos utilizados variam de acordo com a aplicação e a estrutura de dados escolhida. Para tanto, a possibilidade de aplicação da aprendizagem pela árvore de decisão na classificação de imagens de sensoriamento remoto, comparando-o com a técnica de Máxima Verossimilhança (Maxver), são argumentos para os casos em que a árvore de decisão poderia gerar uma classificação mais acurada que Maxver.

Mediante a análise de Matsuura (2008), em direção ao estabelecimento de um método para codificação de vídeos estereoscópicos, incluindo os analógicos, é necessário analisar todo o processo de codificação de vídeo detectando os pontos onde ocorrem perdas. Uma etapa desse processo que pode afetar diretamente a visualização estereoscópica analógica é a quantização, a qual depende da aplicação de transformadas. As transformadas mais comuns são a DCT (*Discrete Cossine Transform*) e a DWT (*Discrete Wavelet Transform*), e seus processos de quantização são distintos.

No trabalho desenvolvido por Toth (2009), o objetivo foi a construção de diagramas de segurança com base na análise de elementos finitos para defeitos oriundo de corrosão em tubulações enterradas. A simulação numérica foi realizada utilizando um defeito real na

geometria e três geometrias de defeitos simplificados. Testes de ruptura foram realizadas em tubos de diversas secções, a fim de verificar os resultados do cálculo de elementos finitos.

Neste contexto, os resultados podem ser aplicados ao processamento digital de imagens a fim de comparar os resultados gerados em três dimensões, isto é a imagem que foi captada pela câmera ao longo da tubulação. Sendo assim, na Figura 23 pode-se verificar os resultados de uma análise 3D.

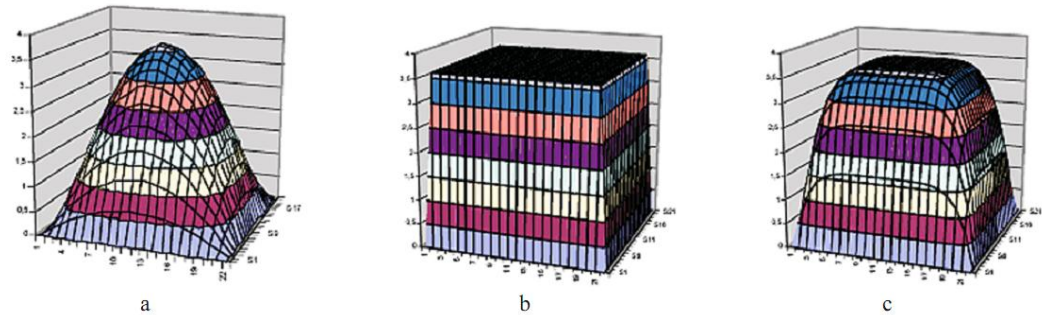


Figura 23: Modelo simplificado de defeitos: (a) Parábola, (b) Retangular e (c) Superfície de sexta ordem  
Fonte: Toth (2009)

Nos resultados obtidos por Toth (2009), a medida mais precisa para a pressão de ruptura foi obtida com a aplicação da parábola de superfície que foi simplificada na sexta ordem dos modelos de defeitos. Porém, todos os modelos simplificados apresentaram resultados conservadoras em comparação com os resultados do teste. O cálculo utilizando o modelo de defeito real 3D não forneceu uma boa previsão. No entanto, com base na análise de tensão no ponto mais profundo do defeito, sobre a superfície interna e externa, é possível determinar uma região de pressão no qual a falha do tubo contempla maior probabilidade de ocorrer.

Aplicando este modelo as análises das imagens, pode-se a partir da classificação do defeito encontrado que, por sua vez, pode ser associado a uma distância específica do duto, determinar a possível causa da corrosão que será reparada pela equipe de manutenção.

## 5. Resultados e discussão

A seguir são apresentadas e analisadas as falhas geradas por inserção manual na parte interna da tubulação. Nas Figuras 24 e 25 verificam-se as falhas detectadas pela câmera digital.

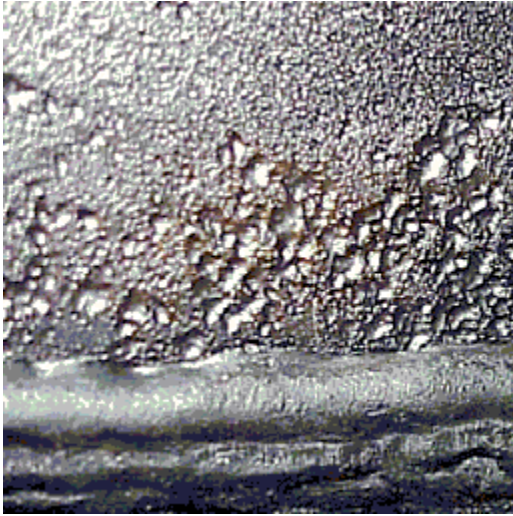


Figura 24: Falha na emenda (corrosão) da tubulação detectada pela câmera digital

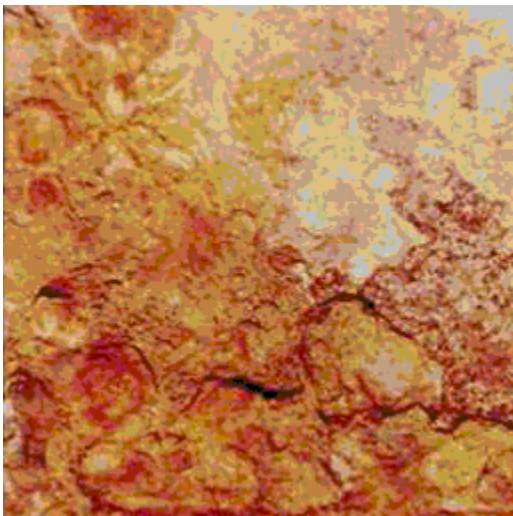


Figura 25: Falha interna (corrosão) da tubulação detectada pela câmera digital

A Figura 24 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 que a resolução,

mediante a captação digital de imagens da câmera, contempla 30 *frames* a cada segundo. Outro detalhe a ser destacado é detecção de tamanhos e formatos diferenciados, o que analisa-se nas Figuras 24 e 25. Neste ínterim, foi possível captar formas com área de  $9 \times 10^{-3}$  metros quadrados.

Visando a 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; da variação da área da tubulação, devido às forças exercidas pela pressão do gás e pelas alterações na geometria do duto; das forças que atuam nas superfícies do volume de controle, as quais são doravante da pressão exercida pelo gás e tensão de cisalhamento, como também a força do PIG analisada pelo campo gravitacional atuando no fluido e o movimento do PIG com o escoamento do fluido no gasoduto é obtido através de um balanço de forças atuando no PIG.

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

$$F_{at} = K * \eta * v \quad (19)$$

Incluindo a equação de movimento, vem:

$$m \frac{dv}{dt} = (m - m_f) * g - K * \eta * v \quad (20)$$

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

Integrando a equação (20), a velocidade pode ser analisada como:

$$v = \left[ \frac{(m - m_f) * g}{K * \eta} \right] \left[ 1 - e^{-\left( \frac{k * \eta}{m} \right) t} \right] \quad (21)$$



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 e da conservação de quantidade de movimento linear, resulta:

$$s = s(x, t) \quad (22)$$

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

Aplicando a regra da cadeia na equação (22) e uma vez que a derivada material de  $x$  é nula para um observador localizado sobre a malha, obtém-se :

$$\frac{dx}{dt} = \left| \frac{\partial x}{\partial s_t} \right| \frac{\partial s}{\partial t_x} + \left| \frac{\partial x}{\partial t_s} \right| = 0 \quad (23)$$

$$\left| \frac{\partial x}{\partial t_s} \right| = -v_c \left| \frac{\partial x}{\partial s_t} \right| \quad (24)$$

$$v_c = \left| \frac{\partial s}{\partial t_x} \right| \quad (25)$$

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

A velocidade absoluta ( $v$ ) do deslocamento do PIG é

$$v = v_r + v_c \quad (26)$$

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,

$$h = \frac{\partial s}{\partial x} \quad (27)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{v_r}{h} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho a^2}{\mu} \frac{1}{h} \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{-\rho a^2}{\mu A} \frac{v_r}{h} \frac{\partial A}{\partial x} \quad (28)$$

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 (29) e (30). 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 discretizado.

$$\begin{aligned} & \frac{(P_i - P_i^o)}{\Delta t} + \frac{v_r}{h_i} \left[ f_{xi} \left( \frac{P_{i+1} - P_i}{\delta x_{i+1}} \right) + f_{xmi} \left( \frac{P_i - P_{i-1}}{\delta x_i} \right) \right] \\ & + \left( \frac{\rho_i a_i^2}{\mu_i} \right) \frac{(v_i - v_{i+1})}{h_i \Delta_{xi}} + \left( \frac{\rho_i a_i^2}{A_i \mu_i} \right) \frac{v_r}{h_i} \left[ f_{xi} \left( \frac{A_{i+1} - A_i}{\delta x_{i+1}} \right) + f_{xmi} \left( \frac{A_i - A_{i-1}}{\delta x_i} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

aonde:

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

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

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

$$u_{(x)} = K_p \left[ e_{(x)} + \frac{T_0}{\tau_i} \sum_{i=0}^x e_{(x-1)} + \frac{\tau_d}{T_0} (e_{(x)} - e_{(x-1)}) \right] \quad (30)$$

aonde,  $K_p$  é o ganho proporcional,  $\tau_i$  é a constante de tempo integral,  $\tau_d$  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.

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 26 demonstra a simulação do controlador PID atuando no deslocamento horizontal, ascendente (inclinação de 30°) e descendente (inclinação de 30°).

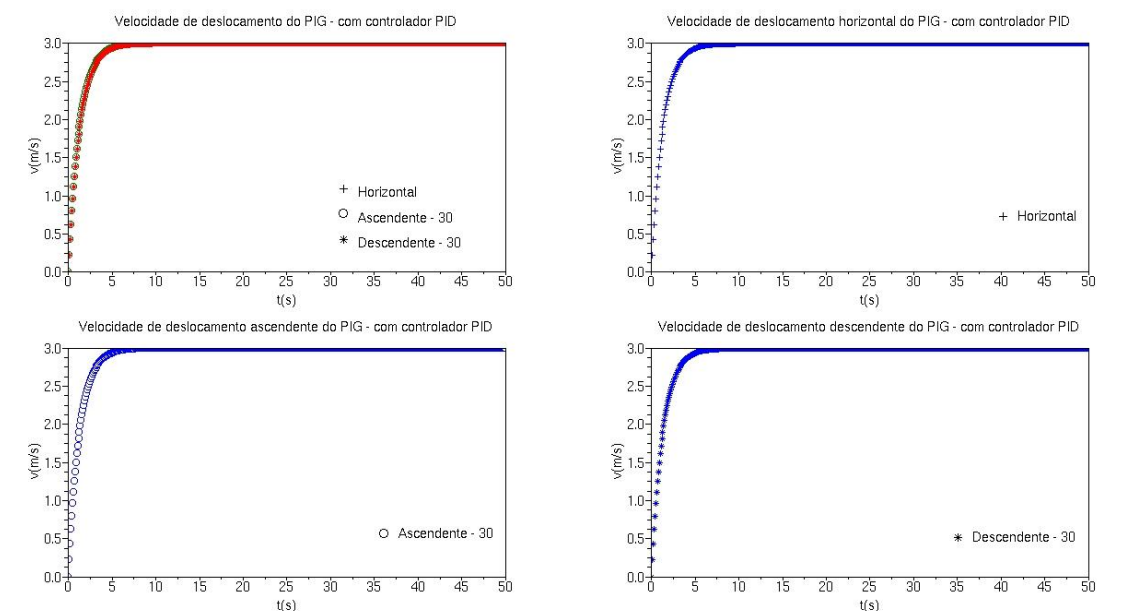


Figura 26: Velocidade de deslocamento do PIG – com controle PID

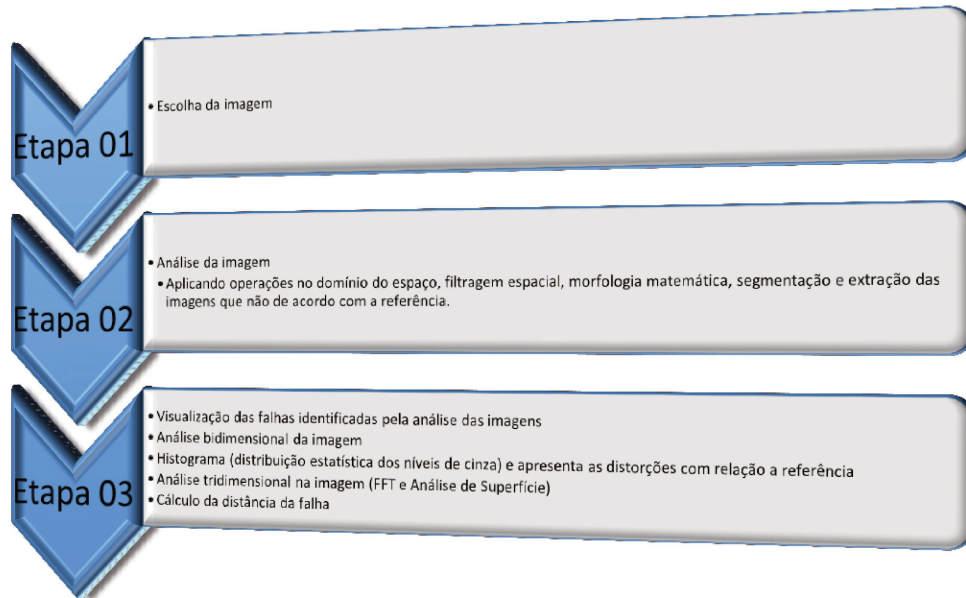
Para a resolução da câmera digital de 720x480 *pixels* e 30 *frames* por segundo (trinta “fotos” a cada segundo), são captadas dez imagens a cada metro. Como a área de captação da câmera refere-se a um quadrado de 0,1 metro de aresta, cada imagem armazenada, no tempo de 1 segundo, contempla um trecho 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 um formato encapsulado em *Audio Video Interleave* (AVI).

Com o mapeamento dos diversos sinais temporais das falhas, em matrizes, 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 com a técnica de *Discrete Cosine Transform* (DCT).

Um software utilizando as funções de análise de imagens do Matlab® foi implementado para desmembrar o vídeo em imagens estáticas (fotos), comparação da imagem com uma referência (tubulação sem corrosão), análise do histograma e superfície da figura.

Toda a estrutura computacional abarcada no processamento e análise digital das imagens, segue o seguinte fluxograma:



Neste contexto, a primeira etapa é destacada pela escolha do vídeo (imagem), conforme Figuras 27 e 28.

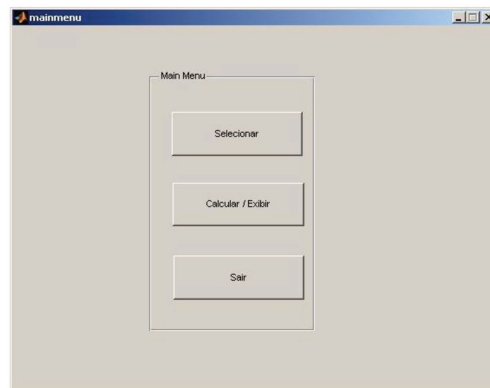


Figura 27: Menu principal do software para análise de imagens

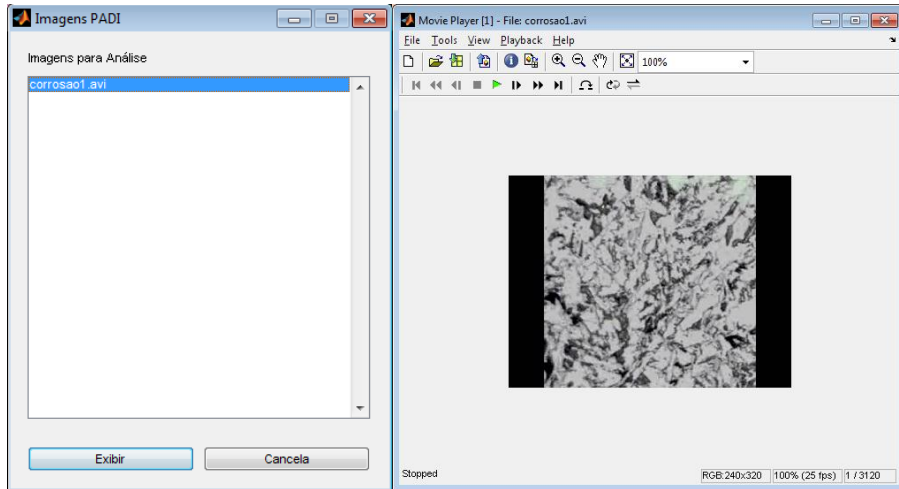


Figura 28: Seleção do vídeo para desfragmentação em imagens

Este vídeo será fragmentado utilizando técnicas de convolução discreta e filtragem no domínio espacial. Neste momento as imagens estáticas estão disponíveis para análise do histograma e gráfico de superfície. Após a seleção da imagem, conforme verifica-se na Figura 29, será realizado a leitura do arquivo e a conversão em matriz de 256x256. Os resultados da imagem, histograma e gráfico de superfície, bem como a distância da falha são apresentados nas Figuras 30, 31, 32, 33, 34 e 35 o qual foram selecionadas as Figuras 24 e 25, respectivamente.

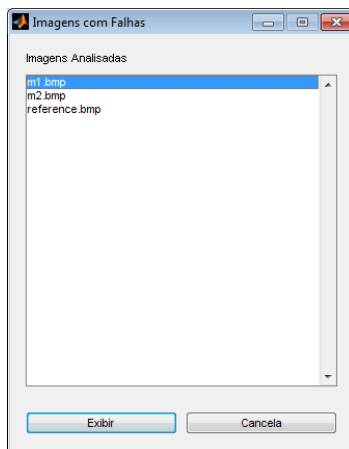


Figura 29: Tela de seleção da imagem que contempla diferenças entre a referência.

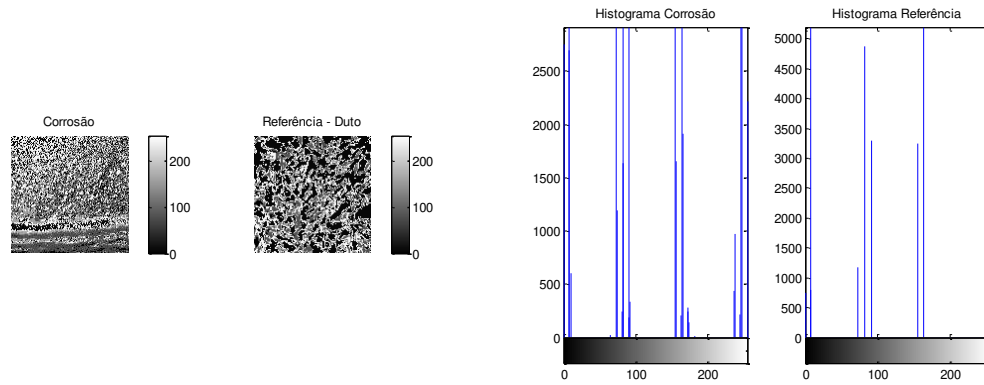


Figura 30: Análise bidimensional da imagem referente a Figura 26 – Histograma

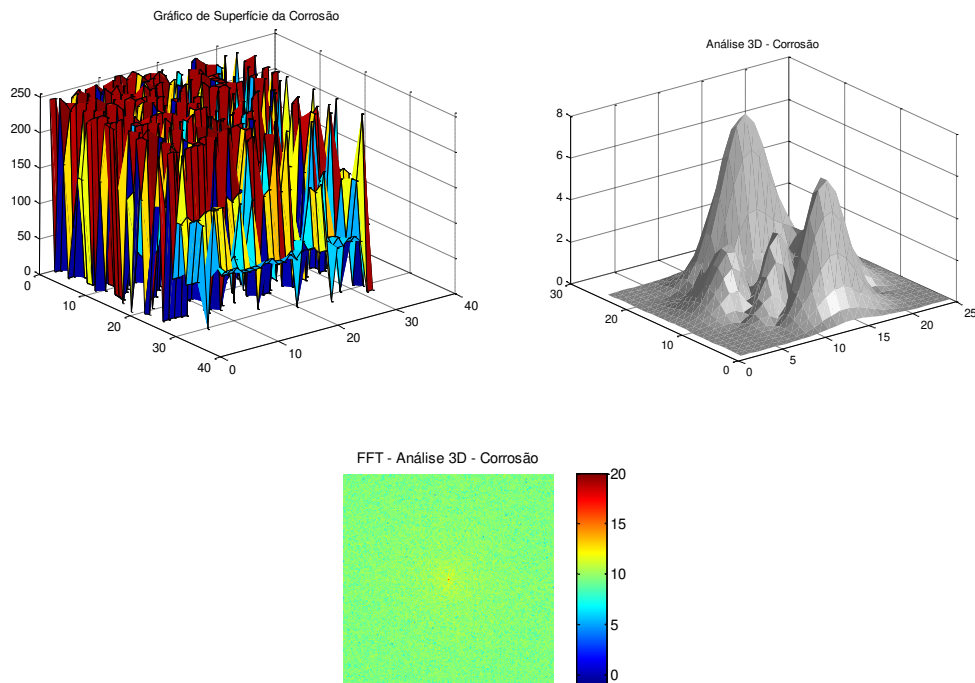


Figura 31: Análise tridimensional da imagem referente a Figura 26 – Gráfico de Superfície e FFT

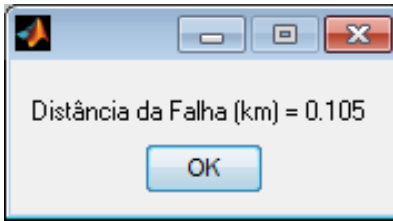


Figura 32: Distância do ponto com problema referente a imagem da Figura 26

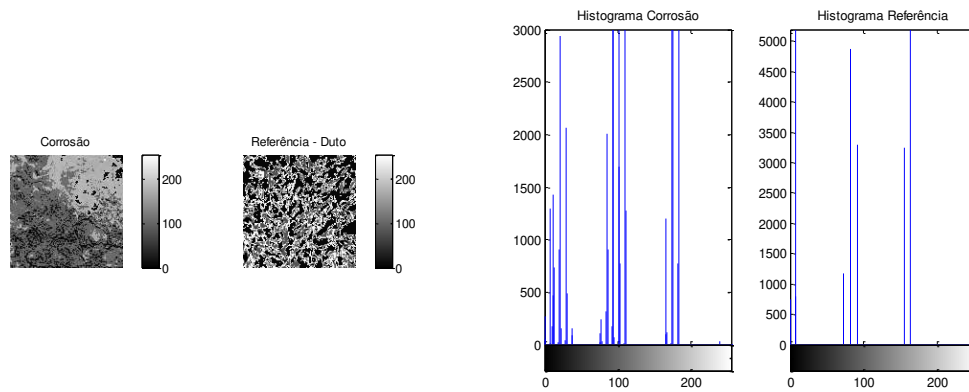


Figura 33: Análise bidimensional da imagem referente a Figura 27 – Histograma

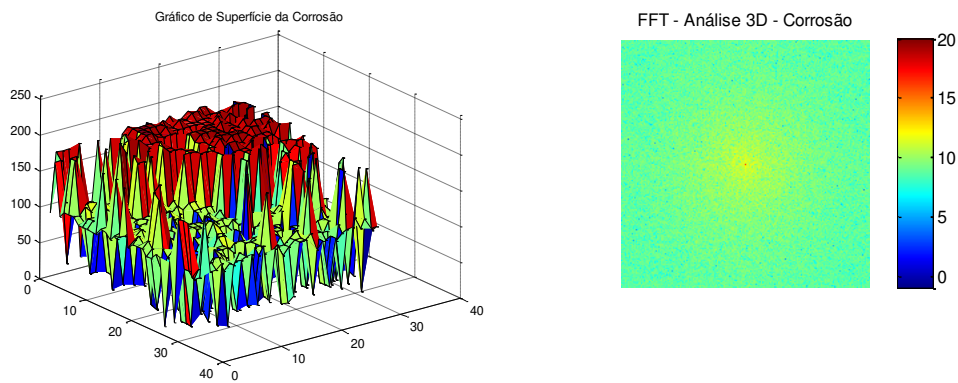


Figura 34: Análise tridimensional da imagem referente a Figura 27 – Gráfico de Superfície e FFT



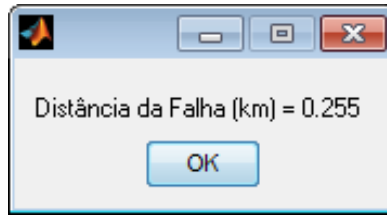


Figura 35: Distância do ponto com problema referente a imagem da Figura 27

Pelos resultados apresentados, nota-se que na Figura 24 a corrosão está compreendida apenas na superfície da solda e com proporções menores comparadas à imagem da Figura 27 que trata de uma corrosão numa superfície maior e com maiores degradações na espessura do material.

Outro ponto que auxilia enormemente na identificação de falhas é o histograma. Conforme Acharya (2005), o histograma define a distribuição estatística dos níveis de cinza e apresenta as distorções com relação a referência. Na Figura 36 pode-se comparar a maior distribuição de pontos para a imagem da Figura 27 comparada a Figura 26.

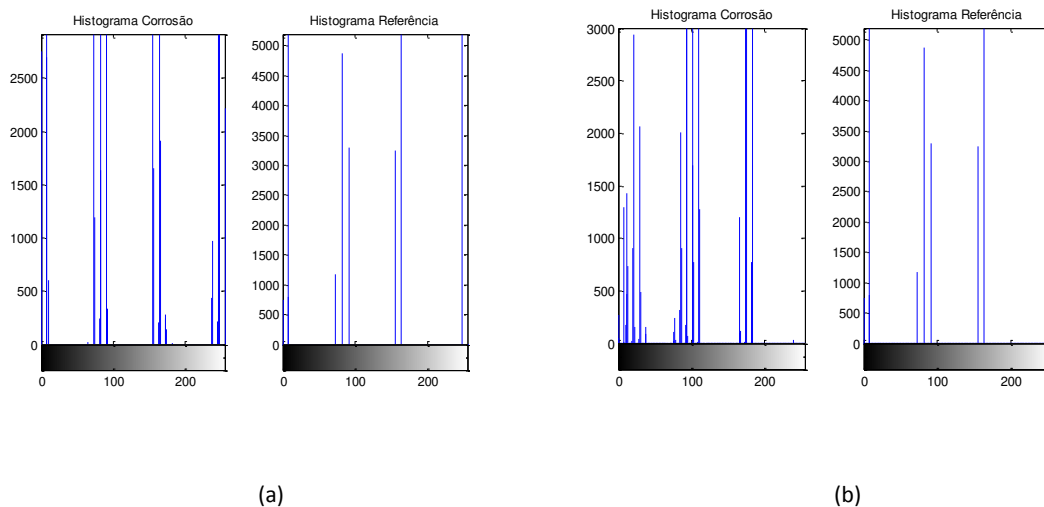


Figura 36: Comparação dos histogramas das imagens referente as Figuras 26 (a) e 27 (b)

Matsuura (2008) e Toth (2009), utilizam-se de análises tridimensionais para fazer a interpolação das falhas presentes nas imagens que são comparadas com uma referência. O método consiste na utilização da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*) que é um algoritmo que permite acelerar o processamento da interpolação de uma grande quantidade de dados por polinômios trigonométricos. Sendo assim, quanto maior a distorção de cores presentes no gráfico resultante do algoritmo FFT aplicado, maior será a presença de distorções na imagem comparada à referência. Também, destaca-se neste tipo de metodologia uma forma de identificar a espessura que foi comprometida pela falha, neste caso, a corrosão. Novamente utilizando-se das Figuras 26 e 27, percebe-se pelos resultados apresentados na Figura 37 que a corrosão da imagem referente a Figura 27 é extremamente superior a identificada na imagem referente a Figura 26, face a maior concentração da cor “amarela” no centro do gráfico.

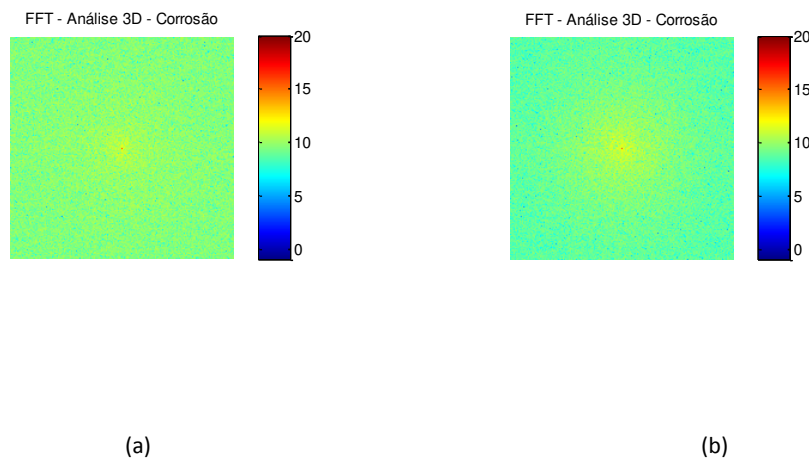


Figura 37: Comparação dos gráficos gerados pelo algoritmo FFT das imagens referente as Figuras 26 (a) e 27 (b)

Nos testes realizados, percebeu-se que processamento e análise das imagens foi realizado em até 30 segundo para uma imagem de 2 minutos, para a identificação das imagens que estão fora do padrão da referência. Neste contexto, consolida-se que o algoritmo

implementado é eficiência, pois, no tratamento de imagens o padrão para análise está compreendido em tempo de processamento entre  $0,5 < \text{tempo da gravação} < 2,5$ . De forma resumida, para um vídeo de 2 minutos, o tempo “padrão” para o processamento e análise de vídeo seria entre 1 e 5 minutos. No entanto, o tempo do algoritmo implementado foi de  $0,25 \leq \text{tempo de gravação}$ . Sendo assim, foi possível reduzir em 50% o menor tempo de processamento “padrão”.

Atualmente diversos pontos são destacados no que tange o problema na monitoração dos gasodutos (tubulações), sendo:

- ✓ Processo lento;
- ✓ Necessidade de parada para inspeção;
- ✓ Deficiência na detecção, com precisão, dos pontos de falha (corrosão);
- ✓ Períodos elevados sem análise e manutenção adequada;
- ✓ Custo elevado na implantação e manutenção.

Motivado por este contexto, diversas considerações foram analisadas para utilização dos dados de um PIG inteligente na avaliação física dos gasodutos. Para isso, o PIG não podem detectar todos os defeitos e as medições estão associadas a um erro, bem como não se podem discriminar todos os defeitos. Sendo assim, as avaliações das falhas simples muitas vezes são analisadas em detalhes, pois, pode não ser apropriado para todos os defeitos e todas as tubulações.

Não obstante, a proposta para monitoração de dutos (tubulações) a partir de um PIG pode ser utilizado em diversas aplicações e podem fornecer monitoramento de rotina da condição do gasoduto, ou como uma ferramenta para solução de problemas.

Dentro destas aplicações a tecnologia oferece uma série de recursos. As principais são:

- ✓ Medição de não linearidades (2D e 3D);
- ✓ Detecção de detritos internos e monitoramento de falhas;
- ✓ Detecção de fraturas (trincas, furos etc.);
- ✓ Detecção de corrosão interna;

- ✓ Registro das imagens em um banco de dados;
- ✓ Diagnóstico e otimização de programas de manutenção;

As principais características destacadas pelo método de identificação de falhas por um PIG acoplado por câmeras, o qual utiliza-se a análise das imagens processadas digitalmente são:

- ✓ Identificação de defeitos com precisão dos locais que apresentam a falha;
- ✓ O PIG é capaz de trafegar em tubulações com imperfeições, causadas durante a instalação, sem alterar a velocidade, ou movimentos que ocorreram enquanto em serviço, como expansão térmica induzidas;
- ✓ Pode identificar, monitorar e gerenciar tendências. Para tanto, pode-se desenvolver uma base de dados para analisar a “tendência” da integridade dos dutos;
- ✓ Detecção de resíduos internos. O PIG fornece um método simples para identificar os locais de depósitos de contaminantes. Isso permite tanto a otimização dos programas de manutenção, as taxas de dosagem de produtos químicos, e diminuir o risco de bloqueio do gasoduto. Além disso, pode ser usado como um instrumento de monitoração exploratório inicial e do progresso de programas de limpeza importantes na reabilitação;
- ✓ Detecção da restrição do diâmetro interno devido a dano mecânico;
- ✓ Detecção de corrosão interna. O PIG proporciona a possibilidade de controlar corrosões mediante a indicação de falhas internas, e a tendência desses casos ao longo de um período de tempo. Com isso, pode auxiliar na otimização de programas de inibição de corrosão. A utilização do “Histograma” pode fornecer informações sobre a presença de corrosão no interior do gasoduto. A forma deste histograma pode ser utilizada para confirmar qual o “grau” de corrosão deste gasoduto;
- ✓ Pode ser utilizado como uma ferramenta de triagem do gasoduto;
- ✓ Pode correlacionar variações de temperatura e perfis de pressão;
- ✓ Pode gerenciar manutenções devido a alterações na espessura da parede da tubulação e assim auxiliar nos programas de gestão de manutenção de gasodutos.

## **6. Considerações finais**

O método proposto, ou seja, um sistema de monitoramento implementado por um PIG inteligente acoplado com câmeras, para identificação de corrosão e falhas nos gasodutos, contempla uma precisão de  $\pm 0,1$  m na detecção dos pontos de falha. Todo este processo melhora o planejamento da manutenção preventiva e corretiva dos gasodutos, segundo o conceito de monitoramento sem interrupções no abastecimento de gás natural.

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.

Os métodos atuais de monitoramento de gasodutos são: análise de vazamentos por meio de variação de pressão e fluxo, análise de vazamentos a partir do balanço de volume não compensado, análise da corrosão por meio de sensores de resistência elétrica, detecção de vazamentos por análise computacional de transientes de perda de carga na tubulação, localização de vazamentos baseado no modelamento em redes neurais, sensores térmicos e ópticos utilizados em patrulhas aéreas, sensores de hidrocarbonetos, PIG de monitoramento acústico, PIG com sensor ultra-sônico, PIG de alta resolução com sensores de efeito Hall, PIG com sensores de fluxo magnético e monitoramento de um gasoduto por sensor acústico.

O trabalho proposto está voltado à detecção das causas (falhas) que ocasionam os vazamentos, seguindo na pesquisa de PIGs acoplados com sensores. A vantagem do monitoramento a partir da captação de imagem, perante outros sensores é a identificação precisa do tipo de falha. Com isso, pode-se realizar um plano de manutenção preventiva que contemple formas diferenciadas de atuação e reparo.

Mediante o controle de velocidade do robô, foi possível uma precisão de  $\pm 0,1$  m na identificação do local do problema. Os histogramas demonstram a “intensidade” (grau) da corrosão, bem como é possível verificar os contaminantes que estão presentes na corrosão para auxiliar nas manutenções preditivas, preventivas e até mesmo na corretiva.

As “fotos” (frames) extraídas a partir das imagens gravadas pela câmera digital, que foram analisadas e comparadas com o padrão da tubulação possibilitam a análise visual do problema.

De forma visual ou analisando o histograma é possível verificar a causa das trincas, correlacionando as variações de temperatura e perfis de pressão.

Como os dados estão gravados, foi possível desenvolver uma base de dados para analisar a “tendência” dos problemas e prever em quanto tempo deve-se realizar a manutenção preditiva e preventiva sem necessidade de uma nova inspeção.

## **7. Referências bibliográficas**

ABRACO. Associação Brasileira de Corrosão. Site Abraco, 2011. Disponível em <<http://www.abraco.org.br/corros10.htm>> . Acesso em: 12 de abril de 2011.

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

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

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

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

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

ANON, In-Line Inspection Personnel Qualification and Certification, American Society for Non-Destructive Testing Standard, ANSI/ASNT ILI-PQ-2005.

ANON, In-Line Inspection Systems Qualification Standard, American Petroleum Institute Standard API 1163, Edition 1, 2005.

ANON, Managing System Integrity for Hazardous Liquid Lines, 1st Ed., ANSI/ASME Standard 1160-2001, 2001.

ANON, Managing System Integrity of Gas Pipelines, ASME B31.8S 2001. Supplement to ASME B31.8, ASME International, New York, USA.

ANON, Standard Recommended Practice, In-Line Inspection of Pipelines, National Association of Corrosion Engineers, Recommended Practice, NACE RP0102-2002, 2002.

ANP, Agência Nacional do Petróleo. Site ANP, 2012. Disponível em : <[http://www.anp.gov.br/conheca/anuario\\_2004.asp](http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2004.asp)>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2012.

ANSYS, ANSYS Release 8.0 Documentation, 2003.

API, Specification for Line Pipe – Specification 5L, 42<sup>th</sup> Edition, 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. Site Battelle, 2010. Disponível em: <<http://www.battelle.org>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2010.

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.

BENJAMIN, A. C.; ANDRADE, E. Q., Structural Evaluation of Corrosion Defects in Pipelines: Comparison of FE Analyses and Assessment Methods, Proc. 14<sup>th</sup> 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. 5<sup>th</sup> International Pipeline Conference, ASME IPC 2004, Calgary, 2004.

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.

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

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



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.

BUENO, S. Monitoração e preservação de dutos submarinos: a experiência da Petrobras/E&P-BC. Site GasNet, 2010. Disponível em: <[http://www.gasnet.com.br/artigos/artigos\\_view2.asp?cod=206](http://www.gasnet.com.br/artigos/artigos_view2.asp?cod=206)>. Acesso em: 24 de julho de 2010.

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

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

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ed. LTC, São Paulo, 2002.

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

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.

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. Site Cesec, 2010. Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br/~dinelpar/>>. Acesso em: 4 de março de 2010.

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.

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.

CORIMAYA, R. L. P.; TREVISAN, R. E., Influência do insumo de calor para a avaliação de trincas em juntas soldadas do aço API X80 através do ensaio Tekken, 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 11 a 15 de abril de 2011, Caxias do Sul – RS, 2011.

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. Site Gás e Energia, 2010. Disponível em: <<http://www.gasenergia.com.br/>>. Acesso em: 4 de março de 2010.

GaSNET. Gás Natural. Site GasNet, 2011. Disponível em: <<http://www.gasnet.com.br>>. Acesso em: 20 de outubro de 2011.

GaSNET. Gasoduto Brasil, 2012. Site GasNet, 2012. Disponível em: <[http://www.gasnet.com.br/novo\\_gasoduto/operacao.asp](http://www.gasnet.com.br/novo_gasoduto/operacao.asp)>. Acesso em: 20 de outubro de 2012.

GaSNET. Gasoduto Brasil-Bolívia (Gasbol). Site GasNet, 2012. Disponível em: <[http://www.gasnet.com.br/novo\\_gasoduto/gasbol.ASP](http://www.gasnet.com.br/novo_gasoduto/gasbol.ASP)>. Acesso em: 20 de outubro de 2012.

GASPETRO. Rede Gas e Energia – Petrobrás. Site Gaspetro, 2012. Disponível em: <<http://www.gaspetro.com.br/>>. Acesso em: 20 de outubro de 2012.

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.

KIM, H.Y. Binary Halftone Image Resolution Increasing by Decision-Tree Learning. IEEE Transactions on Image Processing. EUA, v.13, n.8, p.1136 - 1146, 2004.

LEEWIS, K., Integrity management of pipelines, International Pipeline Congress, Mérida, Yucatán, Mexico, 14-16 November, 2001.

LENKEY, B. G.; BALOGH, Z.; TOTH, L., Application of FEM for reliability assessment of corroded pipelines, Csopaki Anket, Csopak, Nov. 7–9, 2002.

LENKEY, B. G.; BALOGH, Z.; TOTH, L., Assessment of corrosion defects in transit oil pipelines using FEM, Internal Research Report (2001–2004).

LENKEY, B. G.; BALOGH, Z.; TOTH, L.; HARMATI, I., Reliability assessment of pipelines having corrosion defects using finite element analysis, XXV Int. Oil Industry Conf., Balatonfüred, Oct. 10–12., 2002.

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 trade, 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, 2004.

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

MATSUURA, F.; FUJISAWA, N. Anaglyph Stereo Visualization by the Use of a Single Image and Depth Information. *Journal of Visualization archive*, v. 11, n. 1, p. 79-86, 2008.

NATURAL GAS. Natural Gas Infrastructure. Site Netl, 2010. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/scng/transdist/distribute.html>>. Acesso em: 15 de abril de 2010.

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

PEREA, R. L.; Adequação do Ensaio TEKKE para a Avaliação de Trincas em Soldas de Aço API X80. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, 2009.

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.

SHIBA, M. H., Classificação de imagens de sensoriamento remoto pela aprendizagem por árvore de decisão: uma avaliação de desempenho, XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 4319-4326, 2005.

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

SILVA, J. H. F.; TREVISAN, R. E. . A Study on Hydrogen Induced Cracking in API Steel Weld Using the Modifiede G-BOP Test. In: 18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005, Ouro Preto. *Anais 18th International Congress of Mechanical Engineering*. Rio de Janeiro : ABCM, 2005.

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, 2007.

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

TOTH, L.; LENKEY, B. G., Safety assessment of the transit oil and gas pipelines with corrosion pits, Strength of Materials, v. 41, n. 6, 2009.

TRANSPETRO. Petrobras Transporte S/A. Site Transpetro, 2012. Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br/portugues/negocios/dutosTerminais/gasodutos.shtml>>. Acesso em:13 de outubro de 2012.

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

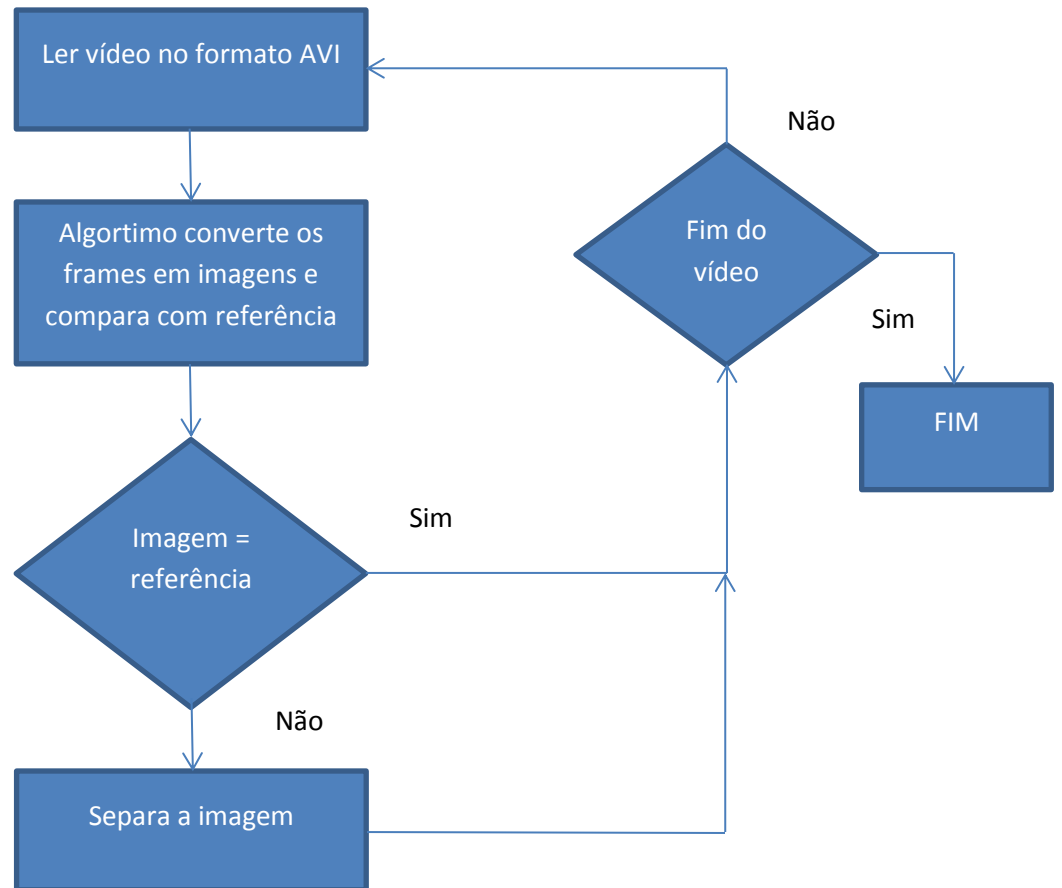
WIKE, A. Liquid pipelines can use many varieties of Scada-based leak detection systems. Pipeline & Gas Journal, v.213, n. 6, p.16-20, 1986.

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.

## 8. Anexos

Fluxograma para análise do vídeo



## Fluxograma para análise das imagens

