

Maryah Elisa Morastoni Haertel

**SISTEMA TRINOCULAR BASEADO EM TRIANGULAÇÃO
INVERSA PARA AQUISIÇÃO SIMULTÂNEA DA GEOMETRIA
E TEXTURA DA SUPERFÍCIE INTERNA DE DUTOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Doutor em Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr. Armando
Albertazzi Gonçalves Jr.
Coorientador: Prof. Dr. Tiago Loureiro
Figaro da Costa Pinto

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Haertel, Maryah Elisa Morastoni

Sistema Trinocular Baseado em Triangulação Inversa para
Aquisição Simultânea da Geometria e Textura da Superfície
Interna de Dutos / Maryah Elisa Morastoni Haertel ;
orientador, Armando Albertazzi G. Jr. ; coorientador,
Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto. - Florianópolis, SC,
2015.

145 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Inspeção de dutos. 3. Visão
computacional. 4. Extração de geometria e textura. 5. Visão
trinocular. I. Albertazzi G. Jr., Armando. II. Pinto,
Tiago Loureiro Figaro da Costa. III. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Maryah Elisa Morastoni Haertel

**SISTEMA TRINOCULAR BASEADO EM TRIANGULAÇÃO
INVERSA PARA AQUISIÇÃO SIMULTÂNEA DA GEOMETRIA
E TEXTURA DA SUPERFÍCIE INTERNA DE DUTOS**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 02 de março de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi
Gonçalves Jr, Dr. Eng.
Orientador
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Tiago Loureiro Figaro da
Costa Pinto, Dr. Eng.
Coorientador
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Meinhard Sesselmann,
Dr. Eng.
Universidade Federal de Minas
Gerais

Prof. Vilson Heck Jr,
Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa
Catarina

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer,
Dr. Ing.
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Gustavo Daniel Donatelli,
Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa
Catarina

Celso Luiz Nickel Veiga,
Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa
Catarina

Este trabalho é dedicado ao meu pai
Max Haertel Júnior (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho não teria sido possível sem a presença de pessoas e fundações. Meus agradecimentos:

À Deus, que tornou tudo possível.

Ao professor Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, pela paciência, pelas conversas, pelos conselhos e, é claro, pela orientação.

Ao professor Tiago Loureiro Fígaro da Costa Pinto, pelas valiosas discussões e, é claro, pela coorientação.

À minha mãe, Lúcia Elaine Morastoni Haertel, que entendeu as minhas ausências, apoiou as minhas escolhas, e junto comigo, fez essa tese acontecer.

Ao meu noivo, Sergio Genilson Pflieger, pelo companheirismo, por entender a minha ausência e as minhas preocupações, e por todo apoio.

À Rosana Vieira, Lidiane Pierri e Miguel Burg Demay, pelas conversas e desabafos.

Ao meu primo Gregory Branco Haertel, pela disponibilidade, compreensão e amizade.

À Mya, pela paciência.

Ao POSMEC e a UFSC, pelo apoio e prontidão.

Aos meus colegas do LabMetro, pelo apoio em vários momentos.

À Fundação Certi, pela ajuda com os ensaios deste trabalho.

Ao CNPq, CAPES, PRH-34/ANP e à Petrobras/CENPES pelo apoio financeiro na execução deste trabalho.

"Mas, se não temos unidades de medida e o mundo não é governado por meios matemáticos, o que governa tudo?"

(Lucy, 2014)

RESUMO

Dutos são o meio mais eficaz de transporte de derivados de petróleo e gás natural. Para evitar acidentes neste sistema de transporte – que causa danos econômicos e ambientais – estão sujeitos a normas internacionais de inspeção e manutenção, garantindo a integridade e a eficiência do duto. O transporte de líquidos e gases, muitas vezes realizado em elevadas pressão e temperatura, pode causar danos nos dutos. A corrosão e a abrasão são os efeitos que mais têm impacto, expondo a riscos a integridade de dutos em operação. A principal consequência é a diminuição da espessura da parede do duto, tornando-o mais suscetível a trincas e rompimentos. Desta forma, a avaliação da geometria interna do duto tem um caráter essencial nas ações de prevenção. Para este fim, no mercado há várias ferramentas capazes de medir a geometria interna, baseados em diferentes princípios de medição. Porém, além da informação geométrica, a caracterização da textura do duto também é importante, auxiliando na identificação e classificação dos defeitos. A fusão destes dados permite aos inspetores reunir mais informações sobre o estado da parede interna do duto, auxiliando nas tomadas de decisão. Neste sentido, a motivação deste trabalho é a demanda por um sistema de visão computacional que se desloca no interior do duto. O objetivo é projetar, construir e avaliar um sistema óptico de medição composto por múltiplas câmeras para a aquisição de geometria e textura da superfície interna de dutos baseado na projeção inversa usando correlação. O protótipo multicâmera para dutos de 200 mm (8") de diâmetro foi construído para este fim e testado. Os resultados obtidos em laboratório apresentaram erro sistemático de 0,3 mm no valor do raio medido. O sistema é capaz de medir um anel axial de 50 mm por posicionamento. Notou-se também a característica multidiâmetro do sistema, que mede tubos de 150 a 250 mm de diâmetro. As medições possuem resolução angular de 1° e axial de 1 mm, valores que podem ser ajustados dependendo da necessidade na inspeção. O resultado do método é uma nuvem de pontos intrinsecamente organizada numa malha regular usando coordenadas cilíndricas.

Palavras-chave: Inspeção 1. Dutos 2. Visão trinocular 3. Textura 4. Nuvem de pontos 5.

ABSTRACT

Pipelines are the most efficient way to transport gas and oil products. To ensure integrity, efficiency and avoid accidents in pipelines- that cause economic and environmental damages - they are subjected to international inspection and maintenance standards. The transport of liquids and gases, often at high pressure and temperature, can damage pipelines. Corrosion and abrasion are the damaging agents which have most impact, exposing to risk the integrity of pipelines in operation. The main consequence is the reduction of the pipe wall, making it more sensitive to cracks and leaks. Thus, the evaluation of pipe's internal geometry is an essential prevention issue. There are several inspection tools able to evaluate the internal geometry integrity based on different measuring principles. However, in addition to the geometric data, the characterization of the inner pipe texture is also important. Combination of geometry and surface texture data help the decision making process about the integrity of the internal wall of pipes. The motivation of this work is the demand for a machine vision system that moves inside the pipeline, and helps the identification and localization of internal defects in pipes. The goal is to design, build and evaluate an optical measurement system composed of multiple cameras for the acquisition of geometry and texture of the inner surface of pipelines using object space oriented point selection for correlation. A three camera prototype for pipes of 200 mm (6 ") diameter was built and tested. The results of laboratory experiments presented an systematic error of 0.3 mm in radius values. The system is able to measure a ring with axial length of 50 mm. It is also noteworthy that the prototype is capable of measuring a wide range of diameters (150 mm to 250 mm). Measurements have angular and axial resolution of 1° and 1 mm respectively, values that can be adjusted depending on inspection needs. The results produce a point cloud intrinsically organized in a regular mesh using a cylindrical coordinate system.

Keywords: Inspection 1. Pipeline 2. Trinocular Stereo 3. Texture 4. Point cloud 5.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Videoscópio Olympus IPLEX LX/LT.....	34
Figura 2 – Inspeção interna de dutos e conexões utilizando o GE XLG3.....	35
Figura 3 – Resultados de medição realizada com o GE XLG3. (a) Região medida. (b) Perfil da região (a). (c) Nuvem de pontos em escala de cores da região a. (d) <i>Nuvem de pontos</i> . (GE, 2011b).....	36
Figura 4 – Broncoscópio, no final do cabo há o sistema de iluminação e a câmera.....	37
Figura 5 – Robô de inspeção Tk-PIC.....	38
Figura 6 – Esquema ilustrativo mostrando o sistema LOTIS percorrendo um tubo, e ao lado os dados reais de um resultado de inspeção.....	39
Figura 7 – Esquema básico dos robôs de inspeção da família Rovver.....	40
Figura 8 – À esquerda o sistema Rovver 900, destinado aos maiores diâmetros, e a direita um exemplo de imagem, retirada pelo robô, de um duto colapsado.....	41
Figura 9 - (a) Ilustração do robô de inspeção passando por uma curva. (b) Fotografia do robô de inspeção.....	42
Figura 10- Foto do PIG RoVisual, com indicação do sistema de visualização.....	43
Figura 11 – À esquerda, foto do sistema perfilômetro laser OMC, demonstrando a sua operação. À direita, ilustração do sistema, onde podem ser observados detalhes externos do cabeçote.....	43
Figura 12 – À esquerda, o robô de inspeção saindo de um duto com água. É possível observar o cabo umbilical. À direita, visão da câmera, na parte superior do sistema.....	44
Figura 13 – À esquerda, ilustração do robô MRINSPECT V, com indicação dos seus módulos, passando por um tubo complexo. À direita, detalhe do módulo de condução, onde é possível ver o laser linear, a câmera e o sistema de iluminação composto por LEDs.....	45
Figura 14 – À esquerda, ilustração mostrando o princípio de reconhecimento de pontos de referência utilizando pelo robô. À esquerda, exemplos desse sistema de reconhecimento, mostrando as diferentes assinaturas criadas pelo robô, para diferentes situações, como a curva e duas visões diferentes da união tipo T.....	46
Figura 15 – Esquema ilustrativo mostrando o princípio de medição proposto por Duran, Althofer e Seneviratne.....	47
Figura 16 – Esquema de funcionamento óptico do sistema PEROLA-I.....	47
Figura 17 – Protótipo PEROLA-I.....	48
Figura 18 – Exemplo de medição do protótipo PEROLA-I. A escala de cores está em milímetros.....	48
Figura 19 – Sistema de inspeção visual proposto.....	49
Figura 20 – À esquerda, esquema do ROGS, utilizando 4 sensores de triangulação a laser. À direita, esquema do caminho que os sensores laser fazem durante a medição.....	50
Figura 21 – À esquerda, o escâner óptico percorrendo uma solda simulada. A direita uma visão completa do sistema, que se adapta a parede do duto.....	51
Figura 22 – Esquema do sistema construído pela OMS.....	52

Figura 23 – Escâner da OMS para diâmetros grandes inspecionando um tubo.	53
Figura 24 – Esquema ilustrando o princípio fotogramétrico utilizado pelo protótipo Endoriser.	53
Figura 25 – Medição da região da união soldada entre dois dutos. À direita são mostradas regiões onde há excesso de material (acima) e outro onde há falta de material (em baixo).	54
Figura 26 - Esquema do robô de inspeção de soldas.	55
Figura 27 – À esquerda, esquema do sistema de inspeção visual de solda. À direita, esquema da imagem obtida com ele, onde as duas imagens obtidas dividem o mesmo CCD: a visão frontal do robô e a visão lateral.	55
Figura 28 – Fotografia mostrando o robô de inspeção utilizado em cada duto, e imagens da textura interna mostrando grandes diferenças, mesmo ambos os dutos transportando LNG e sendo constituídos do mesmo material.	57
Figura 29 – Ilustração mostrando o AUV entrando num duto para inspeção.	58
Figura 30 – Esquema do sensor laser do AUV.	59
Figura 31 - Primeira imagem digital obtida.	63
Figura 32 - Cubo de cores RGB.	65
Figura 33 - Primeira ilustração do modelo <i>pinhole</i> . O método era utilizado para observação de eclipses.	66
Figura 34 - Esquema da câmera <i>pinhole</i> .	67
Figura 35 – Esquema mostrando o efeito da distorção tangencial. Nas linhas solidas não há distorção. Nas linhas pontilhadas observa-se o efeito da distorção.	69
Figura 36 – Esquema mostrando como a distorção radial afeta a imagem. Na linha solida não há distorção. Nas linhas pontilhadas há distorção negativa em (a) e positiva em (b).	70
Figura 37 - Esquema mostrando a restrição imposta pela geometria epipolar na busca da coordenada 3D do ponto p' , a partir de duas câmeras.	72
Figura 38 - Esquema da triangulação inversa: do 3D para o 2D.	73
Figura 39 – Projeção aplicada a três câmeras.	76
Figura 40 - Esquema mostrando a projeção de um ponto tridimensional da casca do duto nas imagens.	86
Figura 41 - Definição da casca cilíndrica de interrogação.	87
Figura 42 - Esquema mostrando a projeção da casca cilíndrica do 3D para o 2D.	88
Figura 43 – Uma das imagens internas do tubo de PVC com textura artificial simulada.	89
Figura 44 - Gráfico mostrando o comportamento o desvio padrão médio com a variação do raio do ponto projetado. Nota-se um ponto de mínimo próximo ao raio nominal, porém eles não coincidem. As duas linhas correspondem a simulações com dois diferentes tamanhos de cascas cilíndricas de interrogação (j).	90
Figura 45 - Gráfico mostrando o comportamento do coeficiente de correlação tripla com a variação do raio do ponto projetado. Observa-se claramente um ponto de máximo destacado próximo ao valor nominal de raio do tubo. As duas	

linhas correspondem a simulações com dois diferentes tamanhos de cascas cilíndricas de interrogação (j)	91
Figura 46 - Gráfico mostrando o comportamento da soma dos coeficientes de correlação linear com a variação do raio do ponto projetado. Há um ponto de máximo destacado próximo ao raio nominal do tubo. As duas linhas correspondem a simulações com dois diferentes tamanhos de cascas cilíndricas de interrogação (j).....	92
Figura 47 - Imagem retirada do interior do tubo com textura real.	93
Figura 48 - Gráfico mostrando a relação entre $\Delta\theta$ e ΔZ e a determinação do pico de máximo do coeficiente de correlação tripla. A variação angular foi transformada em comprimento do arco na superfície do tubo.	94
Figura 49 - Gráfico mostrando a relação entre o número j de elementos da aresta da janela em relação a determinação do pico de máxima correlação.	95
Figura 50 - Gráfico mostrando a relação entre o tamanho da janela da casca cilíndrica de busca (j) e o tempo de processamento para uma seção de z - 360 pares (z, θ) - com $\Delta R=0,01$ mm.	95
Figura 51 - Fluxograma apresentando os processos envolvidos no algoritmo de definição da nuvem de pontos. Fonte:	97
Figura 52 - Fluxograma mostrando os passos do algoritmo de concatenação. ..	99
Figura 53 - Esquema da concepção inicial.....	101
Figura 54 - Visão lateral com o sistema passando por uma curva com raio de 500 mm num duto de 203,2 mm (8''). A região pontilhada constitui o volume de medição.	103
Figura 55 - À esquerda, proposta de formação trinocular de câmeras. À direita, formação binocular de câmeras.	105
Figura 56 - Comparação entre o inverso da sensibilidade de um sistema trinocular e um sistema binocular em função do ângulo medido ao longo de uma circunferência definida de uma seção transversal da superfície cilíndrica.	106
Figura 57 - Esquema mostrando o posicionamento das câmeras, B, C e D, e outros parâmetros do sistema trinocular.	106
Figura 58 - Vista lateral do sistema num duto. O ponto A mostra o centro do sistema de coordenadas, Z_e e Z_{min}	107
Figura 59 - A partir da visão da câmera B na simulação computacional do sistema trinocular, as imagens mostram um círculo projetado na menor distância onde é possível ver toda a borda do círculo, para $L = 140$ mm, à esquerda e $L = 110$ mm, à direita.	108
Figura 60 - Mínima distância de trabalho como função do lado do triângulo equilátero (L) e do ângulo de convergência das câmeras (definido por Z_e). ...	108
Figura 61 - Determinação do diâmetro máximo para que um sistema com 150 mm de comprimento ultrapasse uma curva de 1D.	109
Figura 62 - Determinação do diâmetro máximo para que um sistema com 200 mm de comprimento ultrapasse uma curva de 1D.	109
Figura 63 - Projeto final do sistema de medição., em duas vistas.....	111
Figura 64 - Fotografia mostrando o sistema de medição construído.....	111

Figura 65 - Gráfico comparando os resultados do coeficiente de correlação tripla para vários conversores clássico de imagens coloridas para escala de cinza. ..	113
Figura 66 - Imagem original, e sua conversão para escala de cinza usando os canais R (direita acima), B(esquerda abaixo) e G (direita abaixo).	113
Figura 67 - Conversão da imagem original usando luma (esquerda acima), média dos canais RGB (direita acima), médias dos canais R e G (esquerda abaixo), e desaturação (direita abaixo).	114
Figura 68 - Etapas do processamento das imagens lidas a partir de arquivo. ..	115
Figura 69 - Imagem do sistema trinocular posicionado no tubo de PCV com textura artificial. O eixo z da malha coincide com o eixo do tubo, tendo sentido positivo para fora do tubo.	117
Figura 70 - Medição de uma seção do tubo de PVC num gráfico polar.	118
Figura 71 - Nuvem de pontos do tubo de PVC.....	119
Figura 72 - Esquema mostrando as dimensões do tubo escalonado.	119
Figura 73 - Imagem do protótipo no tubo escalonado.	120
Figura 74 - Superfícies de comparação entre a medição no protótipo trinocular e a MMC.	121
Figura 75 - Trecho de tubo de aço com 150 mm de diâmetro.	123
Figura 76 - Imagem interna do tubo de aço, captada por uma das câmeras do protótipo trinocular.	123
Figura 77 - Nuvem de pontos do duto real com textura.....	124
Figura 78 - Aparato experimental montado para a validação do algoritmo de hometria e concatenação.....	125
Figura 79 - Medição concatenada entre as nuvens E, em vermelho, e G, em azul.	128
Figura 80 - Gráfico mostrando o perfil lateral da nuvem concatenada para o ângulo de 60°.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Erro calculado relativo à posição axial do sistema para cada medição realizada.....	56
Tabela 2 – Parâmetros e valores utilizados nas simulações.	104
Tabela 3 - Relação dos diâmetros medidos junto com o valor do raio médio medido pelo sistema trinocular, o erro sistemático em relação à medição com a MMC, desvio padrão dos valores medidos e desvio padrão do erro sistemático.	122
Tabela 4 - Posições axiais realizadas.	125
Tabela 5 - Deslocamentos axiais gerados e calculados.	126
Tabela 6 - Posições angulares avaliadas. O deslocamento positivo indica rotação no sentido anti-horário.	126
Tabela 7 - Deslocamentos angulares gerados e calculados.	127
Tabela 8 - Resultados obtidos com para o desempenho do sistema em textura natural e simulada.	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – Espaço Bidimensional
3D – Espaço Tridimensional
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AUV – *Autonomous Underwater Vehicle*
CCD – *Charge-Coupled Device*
DIC – *Digital Image Correlation*
DSI – *Disparity Space Images*
DSP – *Digital Signal Processor*
FPS – Frames Por Segundo
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP – *Iterative Closest Point*
IVR – Inspeção Visual Remota
LED – Light Emitting Diode
LNG – *Liquefied Natural Gas*
MMA - Método de Mínimos Absolutos
MMC – Máquina de Medir por Coordenadas
MNCC – Modified Normalized Cross-Correlation
NACE – *National Association of Corrosion Engineers*
NIST – *National Institute of Standard Technology*
OMS – *Optical Metrology Services*
PIG – *Pipeline Inspection Gauge*
ROGS – *Rotating Optical Geometry Sensor*

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Ponto no espaço tridimensional
x, y, z	Coordenada do ponto no espaço cartesiano
u, v	Coordenada do ponto na imagem
f	Distância focal
λ	Peso
η	Razão de aspecto (<i>aspect ratio</i>) do pixel
τ	Coefficiente relacionado ao erro de ortogonalidade dentre os eixos u e v da imagem
σ_u, σ_v	Coordenadas do ponto central da imagem
\mathbf{K}	Matriz dos parâmetros intrínsecos da câmera
\vec{t}	Vetor de translação
t_x, t_y, t_z	Componentes do vetor de translação
\mathbf{R}	Matriz de rotação
R_{iw}	Componente iw da matriz de rotação
P_N	Ponto normalizado
x_N, y_N	Coordenadas do ponto normalizado
P_C	Ponto corrigido por distorção
x_c, y_c	Coordenadas do ponto corrigido
k_i	Coefficiente de distorção de i -ésima ordem
r, θ, z	Coordenada do ponto no espaço cilíndrico
p'	Projeção do ponto P na imagem
c_i	Centro de projeção da câmera i
a, b	Parâmetros da equação linear da reta
$\hat{\rho}_{xy}$	Estimativa do coeficiente de correlação linear entre x e y
σ_{xy}	Covariância entre x e y
σ_x	Desvio padrão da variável x
σ_y	Desvio padrão da variável y
N	Número de elementos
j	Número de pontos da casca cilíndrica de interrogação
ΔR	Incremento para a busca no raio
$\hat{\rho}_T$	Estimativa do coeficiente de correlação tripla
ρ_s	Soma dos coeficientes de correlação
$\Delta\theta$	Resolução angular da malha cilíndrica
ΔZ	Resolução axial da malha cilíndrica
R_{min}	Valor mínimo do raio de busca
R_{max}	Valor máximo do raio de busca
z_D	Deslocamento axial
θ_D	Deslocamento angular

L	Lado do triangulo equilátero formado pelas câmeras
Z _{min}	Mínima distância de trabalho
Z _e	Ponto no eixo z o qual define a inclinação das câmeras
C _{Nova}	Tom de cinza corrigido da nuvem
C _{Antiga}	Tom de cinza antigo da nuvem
Z _M	Menor valor de z da nuvem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	MOTIVAÇÃO	29
1.2	OBJETIVOS	30
1.2.1	Objetivo Geral	30
1.2.2	Objetivos Específicos	30
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	31
2	INSPEÇÃO ÓPTICA INTERNA DE DUTOS	33
2.1	VIDEOSCÓPIO OLYMPUS IPLEX LX/LT	33
2.2	VIDEOSCÓPIO GE XLG3	34
2.3	BRONCOSCÓPIO DE WILSON ET AL	37
2.4	PIG DE BERTO E LOURENÇO	38
2.5	ROBÔ DE INSPEÇÃO TK-PIC	38
2.6	SISTEMA LOTIS	39
2.7	SISTEMA ROVVER	40
2.8	ROBÔ COBRA DE THIELEMANN, SKOTHEIM E BERGE	41
2.9	ROVISUAL	42
2.10	OMC PERFILÔMETRO LASER	43
2.11	ROBÔ DE INSPEÇÃO ADANSOR	44
2.12	ROBÔ DE INSPEÇÃO E NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA	45
2.13	SISTEMA DE DURAN, ALTHOEFER E SENEVIRATNE	46
2.14	PEROLA-I	47
2.15	SISTEMA ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO DE DUTOS DE FORNECIMENTO DE ÁGUA	48
2.16	ROGS	50
2.17	ESCÂNER ÓPTICO DE SOLDAS ADANSOR	51
2.18	OMS ESCÂNER DE SOLDA	52
2.19	ENDORISER	53
2.20	ROBÔ DE INSPEÇÃO DE KAWAGUCHI ET AL	54
2.21	HANSEN, ALISMAIL, RANDEE E BROWNING	56

2.22	AUV PARA MAPEAMENTO INTERNO	58
2.23	CONSIDERAÇÕES	59
3	RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL A PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS	63
3.1	CAPTURA E FORMAÇÃO DE IMAGEM	64
3.2	CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS	71
3.3	RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL	71
3.3.1	Geometria Epipolar	72
3.3.2	Triangulação inversa	73
3.3.3	Pontos Homólogos: Critérios de Correspondência	74
3.3.4	O caso das três câmeras	75
3.4	CONCATENAÇÃO DE NUVENS DE PONTOS	77
3.5	CONSIDERAÇÕES	79
4	DEMANDAS DA APLICAÇÃO	81
4.1	DEMANDAS DE INSPEÇÃO	81
4.2	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SISTEMA	83
4.3	SOLUÇÃO PROPOSTA	84
5	TRIANGULAÇÃO INVERSA TRINOCULAR BASEADA EM TEXTURA	85
5.1	ALGORITMO DE TRIANGULAÇÃO INVERSA BASEADO NA TEXTURA	85
5.2	CRITÉRIOS DE CORRESPONDÊNCIA	88
5.2.1	Coefficiente de Desvio Padrão Médio	89
5.2.2	Coefficiente de Correlação Tripla	90
5.2.3	Soma dos Coeficientes de Correlação Linear	91
5.2.4	Definição do Critério de Correspondência	92
5.3	DEFINIÇÃO DE $\Delta\theta$, ΔZ e j	93
5.4	DEFINIÇÃO DO PONTO DE BUSCA P	95
5.5	CONCATENAÇÃO DE NUVEM DE PONTOS E HODOMETRIA	96
6	SISTEMA DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO	101
6.1	HARDWARE	101
6.1.1	Definição do Posicionamento das Câmeras	102

6.1.2 Definição das Lentes	110
6.1.3 Sistema de Iluminação	110
6.1.4 Projeto mecânico final	111
6.2 SOFTWARE	112
6.2.1 Aquisição de imagens	112
6.2.2 Pré-processamento	112
6.2.3 Processamento	114
7 RESULTADOS	117
7.1 MEDIÇÕES	117
7.1.1 Tubo de PVC com Textura Simulada	117
7.1.2 Tubo Escalonado	119
7.1.3 Tubo com Textura Natural	123
7.2 CONCATENAÇÃO E HODOMETRIA	124
7.3 COMENTÁRIOS FINAIS	129
8 CONCLUSÕES	131
8.1 ASPECTOS POSITIVOS	131
8.2 LIMITAÇÕES	132
8.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS	135

1 INTRODUÇÃO

Dutos são tubulações desenvolvidas para o transporte de produtos químicos, conforme a definição:

Dutos são tubulações especialmente desenvolvidas e construídas de acordo com normas internacionais de segurança, para transportar petróleo e seus derivados, álcool, gás e produtos químicos diversos por distâncias especialmente longas, sendo então denominados como oleodutos, gasodutos ou polidutos. (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2014).

Dutos são considerados a forma mais segura e eficiente de transporte de petróleo e derivados (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2014). No Brasil há cerca de dezenove mil e setecentos quilômetros de dutos, onde catorze mil quilômetros são destinados ao transporte de gás natural (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2014).

Para a movimentação desses produtos, utilizam-se normas internacionais de segurança operacional e monitoramento constante. A manutenção periódica inclui processos de inspeção, avaliação, manutenção, troca e até mesmo desativação, se necessário. Com essa avaliação evitam-se perdas de produção e acidentes ambientais, garantindo a integridade e a eficiência do duto.

1.1 MOTIVAÇÃO

A corrosão e a abrasão são os agentes que mais deterioram e comprometem a integridade de dutos em operação, reduzindo a espessura da parede remanescente no duto. Normalmente as superfícies externas dos dutos são apropriadamente revestidas e menos susceptíveis à corrosão e a abrasão. O contato permanente com o fluido transportado em movimento torna mais difícil proteger a superfície interna do duto contra estes agentes. A inspeção do interior do duto é de difícil realização, mas muito importante. Ela é um ingrediente necessário para manter a segurança operacional de dutos, assim como ininterrupto o transporte de combustíveis e outros derivados de petróleo. Uma das características avaliadas na inspeção interna de dutos é a geometria interna, de grande interesse para o controle da corrosão e para avaliar sua capacidade em transportar, com segurança, líquidos ou gases. Há

sensores construídos a partir de diferentes princípios físicos que podem realizar essa inspeção, como mecânicos (BODENMANN, A. et al, 2009), e laser (ADANSOR SYSTEMS INTEGRATION, 2012; DURAN, ALTHOEFER, SENEVIRATNE, 2002; OMC, 2012; QUEST INTEGRITY GROUP, 2011 e RITTER; FREY, 2010), magnéticos ou baseados em ultrassom. A maioria deles fornece informações apenas sobre a geometria do duto.

A utilização da informação visual pode ser muito útil na inspeção interna de dutos: um sistema de visão computacional que se desloca pelo interior de um tubo pode fornecer informações referentes à geometria, e revelar detalhes da textura (ROBERT, 2003; BUSCHINELLI, 2013; EVEREST, 2003; THIELEMANN, BREIVIK e BERGE, 2009), que podem ser utilizados para caracterizar e classificar os defeitos encontrados. Adicionalmente, um sistema de visão computacional pode, inclusive, se comportar como um hodômetro, fornecendo informações de posição e rotação que ajudam a localizar a posição da região defeituosa.

A demanda por um sistema de visão computacional, baseado em múltiplas câmeras, capaz de contribuir para identificar e localizar defeitos internos em tubulações vazias e limpas é a principal motivação deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Para contribuir com o desenvolvimento de uma nova alternativa para a inspeção de superfícies internas de dutos e tubulações, visa-se conceber, projetar, construir e avaliar um sistema óptico de medição composto por múltiplas câmeras para a aquisição de informações necessárias à inspeção interna de dutos.

1.2.2 Objetivos Específicos

O sistema de medição desenvolvido deve apresentar:

- Capacidade de adquirir informações referentes à geometria e textura da superfície interna de dutos;
- Capacidade de determinar sua posição axial e rotacional dentro do duto.
- Utilização de novas técnicas de computação gráfica e visão computacional;

- Capacidade de operação em volumes restritos podendo ser utilizado em sistemas de inspeção interna de dutos;
- Capacidade de medir e realizar a reconstrução tridimensional de superfícies internas de dutos, com textura e mostrá-la usando recursos de realidade virtual;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No Capítulo 2 encontra-se uma revisão bibliográfica sobre sistemas de inspeção utilizados no interior de dutos, com ênfase dada naqueles capazes de examinar a geometria da superfície, baseados em princípios ópticos de medição. No texto foram referenciados sistemas comerciais e sistemas encontrados em artigos de periódicos e anais de conferências.

No Capítulo 3 é explanada a técnica de processamento de imagens sob a visão da reconstrução tridimensional. Os casos da visão estéreo e trinocular são abordados.

No Capítulo 4 são abordados os requisitos de medição para um sistema de inspeção interna. Do mesmo modo, são delimitadas algumas características físicas e metrológicas do protótipo.

O Capítulo 5 desenvolve o método de triangulação inversa, aplicando seus conceitos à medição da geometria interna de dutos. O método de concatenação é explanado.

O Capítulo 6 mostra o desenvolvimento do hardware do sistema de inspeção proposto. Detalhes do processamento das imagens também são abordados.

O Capítulo 7 apresenta os resultados obtidos em ensaios e validações dos mesmos. Uma análise metrológica é apresentada.

Ao final, desenvolve-se o fechamento do trabalho realizado, expondo as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 INSPEÇÃO ÓPTICA INTERNA DE DUTOS

Dentre os diversos tipos de sistemas utilizados para inspeção interna de dutos, existem os que utilizam princípios ópticos. A informação proveniente de sistemas ópticos é diversa: desde a simples visualização da superfície do duto à quantificação de variáveis e seu uso para a reconstrução tridimensional da geometria observada. Os sistemas baseados em inspeção óptica também possuem algumas restrições, como a utilização apenas em dutos limpos e com visibilidade.

A seguir são explanados alguns dos sistemas existentes para inspeção interna de dutos que utilizam princípios ópticos de medição, assim como as principais características de cada sensor.

2.1 VIDEOSCÓPIO OLYMPUS IPLEX LX/LT

Videoscópios são sistemas compostos por tubo de inserção e um sistema de iluminação junto à câmera, e a imagem formada a partir da sua reflexão é disponibilizada num monitor, em geral LCD. Junto ao monitor há uma unidade de controle, onde é possível transladar e rotacionar a ponteira do sistema, onde está localizado o sistema de visualização e iluminação. Pode haver a gravação de imagens ou vídeos. (OLYMPUS, 2012)

Com diâmetro variando entre 4,0 mm e 8,5 mm, e comprimento entre 2 m e 20 m, o videoscópio tipo IPLEX é composto por um tubo de inserção, ou sonda, e por uma unidade de controle portátil. Os campos de visão variam entre 50° a 120°. Na unidade portátil há uma tela LCD, onde podem ser observadas as imagens da inspeção, além de um sistema de controle do tubo de inserção e gravação das imagens. A resolução para imagens pode ser 640 x 480 pixels ou 768 x 576 pixels, e para vídeo, apenas 640 x 480 pixels, e utiliza um sistema de iluminação composto por múltiplos LEDs. (OLYMPUS, 2011)

Por natureza, eles fazem parte dos sistemas de inspeção visual remota (IVR), pois são baseados na utilização de uma câmera como extensão da visão humana, utilizados dentro de locais onde é difícil visualização sem instrumentos.

O videoscópio IPLEX LT (figura 1) possui como única função a visualização, gerando apenas imagens e vídeos. Já o IPLEX LX possui função para medição estéreo, podendo medir a distância entre dois pontos, a distância ortogonal de um ponto a uma linha, e profundidade,

entre um ponto e um plano ou linha, tudo dependendo da seleção do usuário.

Figura 1 – Videoscópio Olympus IPLEX LX/LT.



Fonte: Olympus (2011).

2.2 VIDEOSCÓPIO GE XLG3

O videoscópio da empresa GE, modelo XLG3, é um exemplo prático de um sistema IVR utilizado em diversos tipos de inspeção, inclusive de dutos, como pode ser observado na figura 2. Da mesma forma que o equipamento anterior, ele é composto por um tubo de inserção, ou sonda, e uma unidade de controle portátil. Na unidade de controle portátil, há um monitor LCD, onde é possível acompanhar a inspeção visual, ter um controle remoto das funções do tubo de inserção, além da gravação de imagens e vídeos. A sonda possui os diâmetros 3,9; 6,1 ou 8,4 mm, comprimentos variando entre 2,0 e 9,6 m, e um sistema de iluminação composto por lâmpadas de descarga de alta intensidade de 75 watts. A ponteira e o tubo de inserção podem ser utilizados na água até sob a pressão de 1 bar.(GE, 2011)

Com a utilização de uma ponteira especial na sonda é possível obter a medição tridimensional, tanto durante a inspeção, quanto posteriormente, na análise dos dados. A quantificação realizada pelo XLG3 pode ser realizada a partir de quatro princípios de medição diferentes: projeção de franjas, sombra, estéreo e comparação (GE, 2011 e GE, 2010).

O método baseado na comparação utiliza um objeto no campo de visão como parâmetro de referência para a medição de interesse. Esse

objeto pode fazer parte do local inspecionado, ou pode ser introduzido junto com a sonda. (GE, 2010)

Para obter o efeito estéreo utiliza-se uma ponteira especial, onde há um prisma que auxilia a uma única câmera adquirir imagens do lado direito e esquerdo com ângulo e separação entre as imagens conhecidos. Utilizando algoritmos de triangulação é possível combinar as imagens e obter medidas relativas à cena observada. (GE, 2010)

Figura 2 – Inspeção interna de dutos e conexões utilizando o GE XLG3.

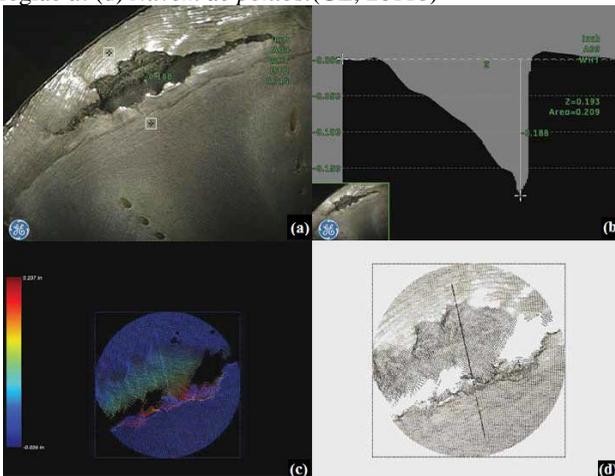


Fonte: GE (2011).

O método de sombra utiliza a projeção de uma sombra através da imagem, utilizando a sua posição sobre a imagem para aferir a distância ao objeto. Dessa forma, usando triangulação entre a sombra e a distância de interesse, pode-se calcular parâmetros escolhidos pelo usuário. (GE, 2010)

O método de projeção de franjas é baseado na utilização de padrões estruturados, contendo três ou mais padrões com franjas retas com padrão senoidais defasadas. Uma sequência de imagens da região de interesse com os padrões projetados é adquirida pela câmera (GE, 2010). Após o processamento dessas imagens é realizada triangulação para produzir a superfície tridimensional. Esse mapeamento gera medições em relação a quase toda a superfície observada pela câmera, apenas, não sendo possível medir regiões onde há sombra, ou muito distante da câmera (GE, 2010). Os resultados obtidos com a técnica podem ser observados na figura 3.

Figura 3 – Resultados de medição realizada com o GE XLG3. (a) Região medida. (b) Perfil da região (a). (c) Nuvem de pontos em escala de cores da região *a*. (d) Nuvem de pontos. (GE, 2011b)



Fonte: GE (2011b).

Os diversos princípios de medição possíveis do GE XLG3 geram diferentes alternativas de utilização. O quadro 1 relaciona as funcionalidades disponíveis no sistema para cada princípio de medição.

Quadro 1 - Recursos do GE XLG3 para cada princípio de medição.

Recursos de Medição	Projeção de Franjas	Sombra	Estéreo	Comparação
Comprimento ou distância	X	X	X	X
Profundidade	X	X	X	
Entre ponto e linha	X	X	X	X
Comprimento não perpendicular	X	X	X	
Área	X	X	X	X
Comprimento de vários segmentos	X	X	X	X
Visualização de perfil	X			
Janelas com zoom de 3x	X	X	X	X

Fonte: GE (2011).

2.3 BRONCOSCÓPIO DE WILSON ET AL

Outro sistema de IVR interessante é utilizado na área médica. A broncoscopia, ou endoscopia respiratória, é um exame do sistema respiratório, semelhante à endoscopia, onde uma câmera é inserida no paciente para visualização de áreas do trato respiratório, indo desde a laringe até os brônquios (ATLAS, 2011 e WILSON et al, 2005). Devido à semelhança do aparelho com os videoscópios industriais e os recursos adicionais de software desenvolvidos, ele é citado neste trabalho.

As alterações realizadas no sistema por Wilson et al (2005) no software de controle de um broncoscópio (figura 4) adicionaram algoritmos numéricos para a quantificação da distância percorrida pelo aparelho, assim como medição de distâncias importantes durante a visualização (como a medição do tamanho da traqueia, por exemplo).

As alterações foram feitas utilizando algoritmos bem conhecidos: Fluxo Óptico¹ e *Egomotion*. O método do Fluxo Óptico quantifica, pixel a pixel, um campo de velocidades bidimensional relativo ao movimento ocorrido entre os padrões de intensidade de duas imagens sequenciais (HORN e SCHUNCK, 1981). Dentre os possíveis algoritmos a ser utilizado, o escolhido pelos autores foi o de Lucas e Kanade (1981). Segundo Wilson et al (2005), o *egomotion* é o cálculo da região tridimensional, baseada em imagens capturadas sequencialmente no movimento relativo da câmera em relação a essa região.

Figura 4 – Broncoscópio, no final do cabo há o sistema de iluminação e a câmera.



Fonte: Olympus (2011).

¹ Do inglês, *Optical Flow*.

Mesmo com as restrições geométricas relativas à utilização do sistema, diretamente proporcional ao pequeno tamanho do CCD, influenciando na baixa resolução e na inclusão de grandes distorções na imagem, o sistema consegue quantificar distâncias percorridas e comprimento, mas desde que a câmera esteja ortogonal à seção alvo a ser mensurada. (WILSON et al, 2005)

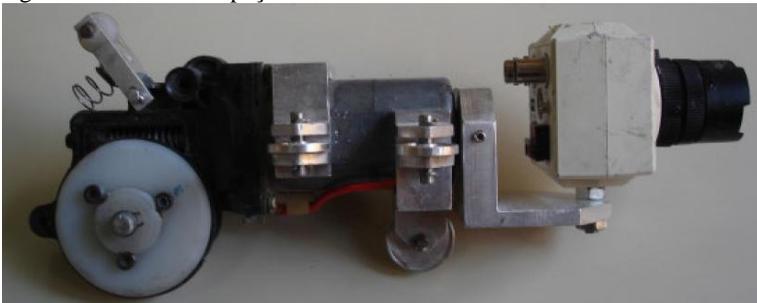
2.4 PIG DE BERTO E LOURENÇO

O dispositivo construído por Berto e Lourenço (2006) utiliza várias câmeras infravermelhas dispostas ao redor da estrutura, facilitando a visualização de toda a parede interna do duto. As imagens são processadas através de um DSP, e gravadas numa memória presente no sistema. As imagens, que possuem 640 x 480 pixels, são monocromáticas e adquiridas com cerca de 30 Hz. A bateria têm autonomia para inspeção de 150 km na velocidade máxima do sistema de cerca de 6 km/h.

Utilizando informações visuais, ou seja, as imagens adquiridas, o sistema é acompanhado por um software de reconhecimento de padrões. Após a realização da inspeção, os dados são transferidos para um computador, onde é realizado o reconhecimento dos defeitos existentes na medição, informando dados geométricos do defeito (área, distância entre pontos) e a sua localização no duto.

2.5 ROBÔ DE INSPEÇÃO TK-PIC

Figura 5 – Robô de inspeção Tk-PIC.



Fonte: Costa et al (2007).

O robô (figura 5) foi designado para inspeção de tubos de PVC de 100 mm de diâmetro, possuindo sistema de tração própria e comunicação via cabo umbilical e registro de movimento por uma roda

auxiliar com *encoder*. Sua autonomia é de 4 horas de operação. A inspeção visual por parte de um operador é a principal função do robô, que possui além de uma câmera, um sistema de iluminação composto por quatro LEDs. Grava vídeos e fotos, inclusive com marcações e comentários do operador, oferecendo resultados apenas qualitativos (COSTA et al, 2007).

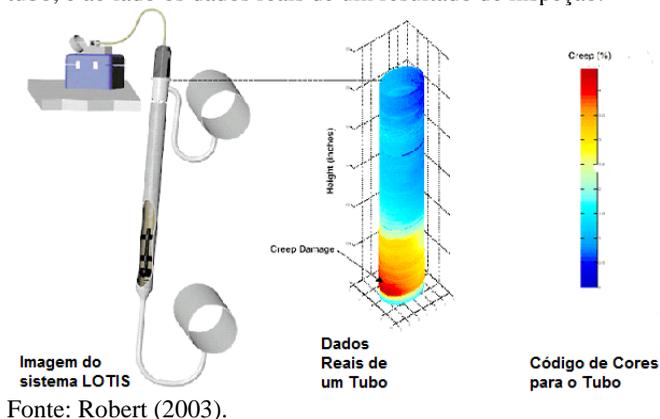
2.6 SISTEMA LOTIS

Utilizando perfilometria laser, o sistema LOTIS, da Quest Integrity Group (QUEST, 2011), identifica e quantifica defeitos em dutos. Foi especialmente desenvolvido para condensadores e trocadores de calor.

O sistema, que foi desenvolvido em 1985 para a marinha dos Estados Unidos, utiliza um feixe laser rotacionado por até 1800 rotações por minuto, adquirindo 360 imagens, gerando um movimento helicoidal do laser dentro do duto. A informação é transmitida via um cabo umbilical para um computador, podendo ser acompanhada em tempo real, segundo Robert (2003).

A velocidade máxima de inspeção é de 76,2 mm/s (3"/s) e há utilização de encoders nas rodas para localização da posição do sistema ao longo do duto. A medição possui incerteza de 0,05 mm (0,002"). (ROBERT, 2003). O sistema é acompanhado de um software que fornece uma melhor visualização dos dados, incluindo codificação por cores, conforme pode ser observado na figura 6.

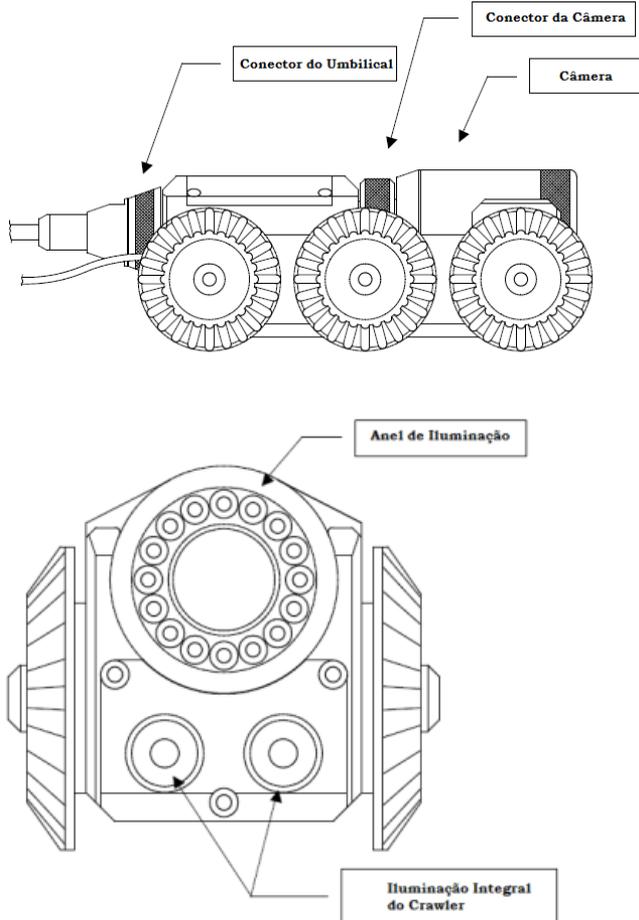
Figura 6 – Esquema ilustrativo mostrando o sistema LOTIS percorrendo um tubo, e ao lado os dados reais de um resultado de inspeção.



2.7 SISTEMA ROVVER

A família de robôs de inspeção Rovver foi desenvolvida para dutos entre 50 mm (2") e 1500 mm (60"), e possuem uma câmera (diferente para cada modelo, dependendo do tamanho do duto) e dois sistemas de iluminação (Figura 7), podendo trabalhar sob pressões de até 1 bar. A família é composta por quatro modelos: Rovver 200, 400, 600 e 900. (EVEREST, 2003)

Figura 7 – Esquema básico dos robôs de inspeção da família Rovver.



Fonte: Everest (2003).

O sistema Rovver 900 (Figura 8), por exemplo, opera em distâncias de até 200 m com tração própria. Possui uma câmera, com ângulo de visão de 100° e um sistema de iluminação composto por lâmpadas halógenas - constituindo a iluminação de fundo, chamada de integral na figura 7 - , e um anel de iluminação composto por LEDs verdes. Como são sistemas projetados para vários diâmetros diferentes, a câmera é ajustada para estar sempre na posição mais próxima do eixo do tubo, fornecendo boas imagens mesmo em dutos de grande diâmetro. (EVEREST, 2012)

Figura 8 – À esquerda o sistema Rovver 900, destinado aos maiores diâmetros, e a direita um exemplo de imagem, retirada pelo robô, de um duto colapsado.



Fonte: Everest (2012).

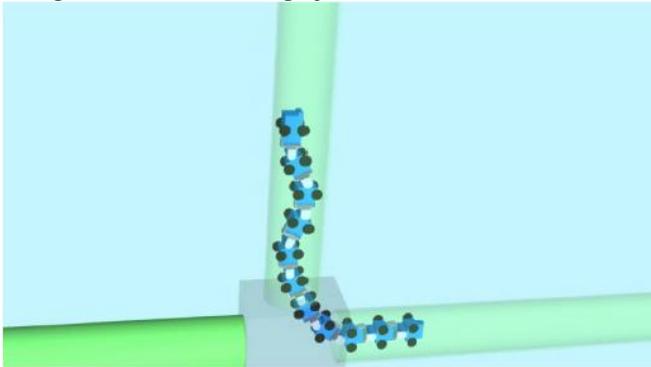
2.8 ROBÔ COBRA DE THIELEMANN, SKOTHEIM E BERGE

Utilizando princípios ópticos, Thielemann, Skotheim e Berge (2009) conceberam um sistema de IVR, o robô cobra, que também pode ser descrito como um “robô autônomo de escalada vertical”. Ele possui diversas articulações, como pode ser observado na figura 9 (a) e (b), facilitando a movimentação do sistema dentro de tubos curvos e derivações.

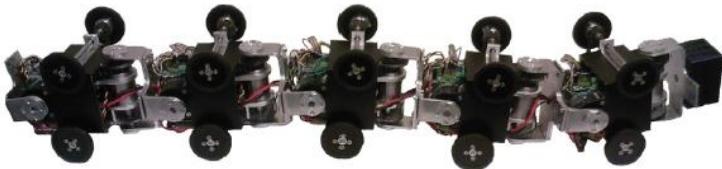
O sistema foi projetado para inspeção de dutos de esgoto, que é composto por inúmeros entroncamentos, sendo necessário o reconhecimento de dobras e curvas. Ele utiliza um sistema visual para navegação, aonde a informação tridimensional vem do princípio de tempo de voo, a partir de um sinal luminoso IR modulado a 20 MHz, emitido pelo robô e refletido pela superfície a uma câmera. A diferença de fase entre o sinal emitido e o sinal recebido é convertida em distância fornecendo um cenário tridimensional ao sistema, que posteriormente

processa as informações obtidas e reconhece quaisquer anomalias ou obstáculos no duto (THIELEMANN, BREIVIK e BERGE, 2009).

Figura 9 - (a) Ilustração do robô de inspeção passando por uma curva. (b) Fotografia do robô de inspeção.



(a)



(b)

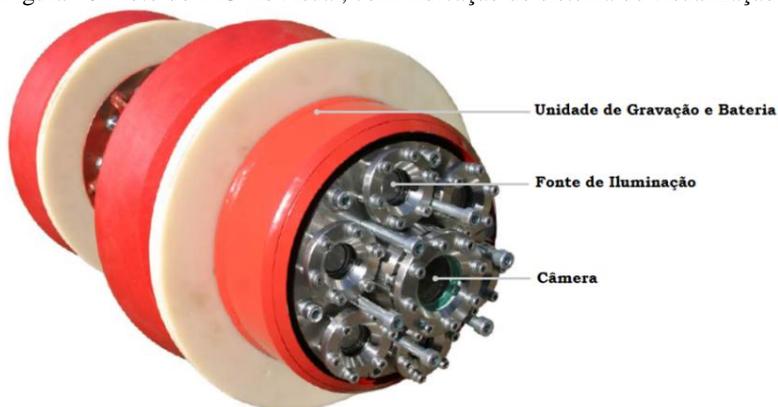
Fonte: Thielemann, Skotheim e Berge (2009).

2.9 ROVISUAL

O PIG RoVisual, da empresa Rosen Inspection, é um sistema destinado a limpeza de dutos com a presença de uma câmera (704 x 576 pixels) e um sistema de iluminação, cujas imagens são armazenadas no próprio sistema para posterior visualização. O sistema destina-se a investigação de danos internos no duto (como amassamentos), o nível de limpeza, qualidade do reparo realizado, presença de água, etc. (ROSEN, 2011)

O PIG inspeciona dutos de 16''(406,4 mm) a 56''(1422,6 mm), podendo funcionar por até 35 horas ininterruptas. Pode operar até sob 10 MPa (1450 psi), com velocidade máxima de 3 m/s, e em dutos que transportem gases ou líquidos transparentes. O PIG pode ser observado na figura 10.

Figura 10- Foto do PIG RoVisual, com indicação do sistema de visualização.



Fonte: Rosen Inspection (2011).

2.10 OMC PERFILÔMETRO LASER

Figura 11 – À esquerda, foto do sistema perfilômetro laser OMC, demonstrando a sua operação. À direita, ilustração do sistema, onde podem ser observados detalhes externos do cabeçote.



Fonte: OMC (2002).

O Perfilômetro Laser, da OMC, mede superfícies internas de dutos com diâmetro entre 140 mm e 480 mm. O princípio de medição utilizado é a triangulação laser, onde um feixe é projetado a partir de um cabeçote, que gira 360° para medir toda a superfície interna. A medição possui dois dados principais: o valor decodificado da triangulação e o ângulo do cabeçote. Uma operação de perfilometria típica possui entre

500 e 200 medições, levando até 3 segundos para ser realizada. Não há restrições quanto à cor da superfície a ser medida, e há um inclinômetro interno garante a referência rotacional das medições. (OMC, 2012)

O sistema não possui tração própria, mas a empresa disponibiliza um sistema de tração e de posicionamento longitudinal no duto, como pode ser observado na figura 11.

O perfilômetro laser possui resolução de 0,1 mm, incerteza angular de 0,1° e incerteza de medição entre 0,1 e 0,8 mm. A comunicação com um computador é realizada por um cabo umbilical RS232, com até 20 m de comprimento. (OMC, 2012)

2.11 ROBÔ DE INSPEÇÃO ADANSOR

A empresa Adansor Systems Integration desenvolveu um robô tipo *crawler*, com a proposta de ter tração própria, podendo se mover por até 200 m dentro de um duto, medindo a parede interna e gravando um vídeo. O princípio de medição é baseado em triangulação laser, acoplado a um cabeçote laser rotativo. O sistema foi desenvolvido para dutos com diâmetros de 270 mm à 900 mm, a prova de água e com fácil manipulação. Os dados coletados são enviados a um computador via cabo umbilical de fibra óptica, como pode ser observado na figura 21, à esquerda. Na figura 21, à direita, é possível observar a câmera posicionada na parte de cima do robô (ADANSOR, 2012b)

Figura 12 – À esquerda, o robô de inspeção saindo de um duto com água. É possível observar o cabo umbilical. À direita, visão da câmera, na parte superior do sistema.



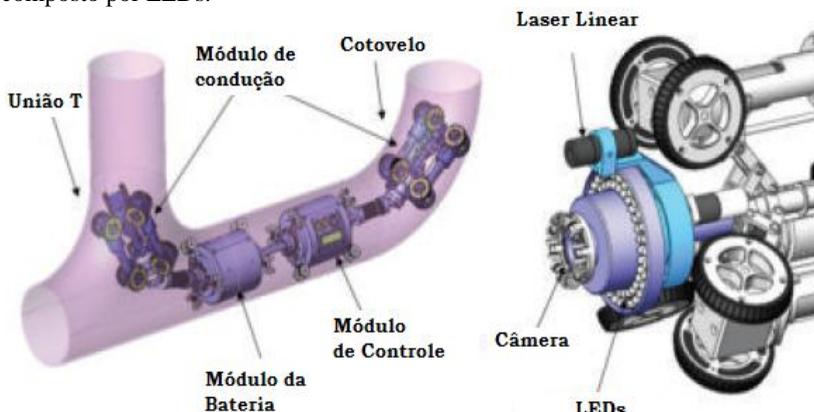
Fonte: Adansor (2012b).

2.12 ROBÔ DE INSPEÇÃO E NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA

Lee, Moon e Choi, 2011, desenvolveram um robô para inspeção de dutos complexos (com curvas e uniões tipo T) baseado no reconhecimento de pontos de referência e orientação tridimensional. Seu principal objetivo é fazer um mapa da rede, ou seja, apresentar um plano geográfico de onde passam os dutos. Sendo um veículo autônomo, suas principais características são o sistema de detecção de referências, a reconstrução do mapa do duto e o sistema de navegação autônomo.

Assumindo que há uma diferença máxima de 10% no valor do raio do duto inspecionado, o robô, chamado MRINSPECT V, foi criado para navegar tridimensionalmente pelos dutos, e, dessa forma, podendo inclusive ter deslocamento vertical, caso seja necessário. O robô possui quatro módulos (figura 13, à esquerda), sendo que o primeiro e o último (módulos de condução) possuem o sistema de visualização e reconhecimento, sendo constituído por uma câmera, LEDs e um laser linear, que pode ser observado na figura 13. A linha do laser é projetada para frente, enquanto o sistema muda de posição, gerando uma região de sombra entre as regiões iluminadas antes e depois, conforme pode ser observado na figura 14. A distribuição da sombra é uma assinatura para cada tipo de ponto de referência, e dessa forma, possibilita ao robô reconhecer cada ponto do duto. (LEE, MOON, CHOI, 2011)

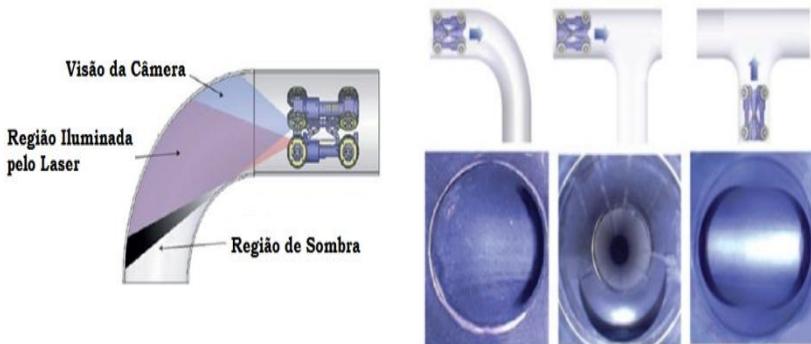
Figura 13 – À esquerda, ilustração do robô MRINSPECT V, com indicação dos seus módulos, passando por um tubo complexo. À direita, detalhe do módulo de condução, onde é possível ver o laser linear, a câmera e o sistema de iluminação composto por LEDs.



Fonte: Lee, Moon e Choi (2011).

O robô utiliza um encoder para verificação do deslocamento do seu centro geométrico em relação ao centro do duto, junto com a sua posição. As informações obtidas sobre o tipo de ponto de referência e a sua localização possibilitam a reconstrução geométrica do duto.

Figura 14 – À esquerda, ilustração mostrando o princípio de reconhecimento de pontos de referência utilizando pelo robô. À esquerda, exemplos desse sistema de reconhecimento, mostrando as diferentes assinaturas criadas pelo robô, para diferentes situações, como a curva e duas visões diferentes da união tipo T.



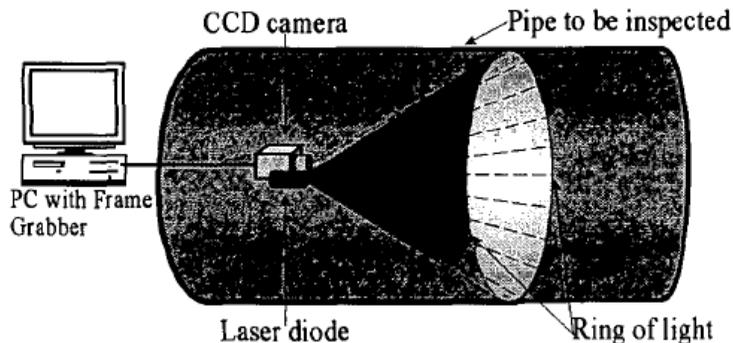
Fonte: Lee, Moon e Choi (2011).

2.13 SISTEMA DE DURAN, ALTHOEFER E SENEVIRATNE

Utilizando um feixe de laser circular, Duran, Althoefer e Seneviratne, 2002 criaram um sistema para inspecionar dutos de esgoto entre 260 e 300 mm de diâmetro. O feixe laser passa por um sistema óptico difrativo, formando o anel de laser circular, conforme a figura 15. Usando o princípio da triangulação, é possível observar e medir os defeitos da superfície. Além disso, quando há descontinuidade na superfície, a linha do laser vista pela câmera se torna mais difusa, ou seja, utiliza concomitantemente outra forma de analisar defeitos observando a intensidade da linha nas imagens.

Além do sistema, os autores trabalharam num algoritmo que identifica os defeitos a cada imagem. Para isso é necessário aprimorar as imagens, utilizando filtros de mediana e equalização do histograma. Utilizando redes neurais, é possível quantificar os defeitos numa sequência de imagens, classificando trechos do duto como defeituoso ou não. (DURAN, ALTHOEFER, SENEVIRATNE, 2002)

Figura 15 – Esquema ilustrativo mostrando o princípio de medição proposto por Duran, Althoefter e Seneviratne.



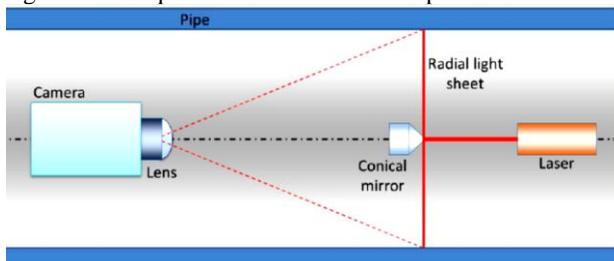
Fonte: Duran, Althoefter e Seneviratne (2002).

2.14 PEROLA-I

O protótipo PEROLA-I (Figura 17) foi desenvolvido para perfilar tubos de 6'' (152,4 mm) de diâmetro, limpos e secos (BUSCHINELLI, 2013). Utilizando triangulação laser, o sistema projeta, a partir de um feixe de laser linear, um plano laser a partir de um espelho cônico (Figura 16). Dessa forma, a câmera adquire os 360° do perfil do duto, em dada posição.

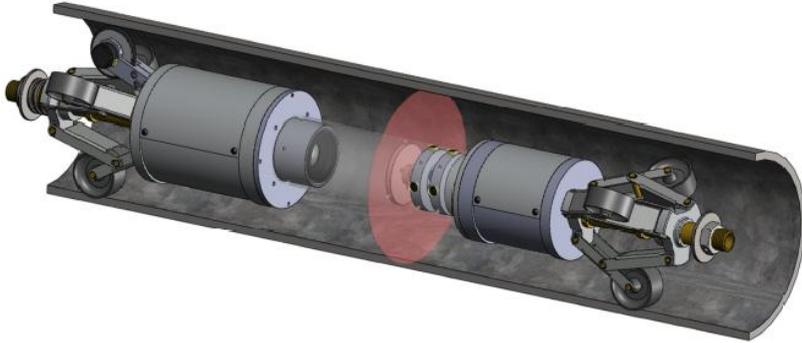
A partir de uma calibração, é possível calcular o valor dos raios obtidos na imagem em milímetros. A faixa de medição fica entre 67 e 87 mm de raio, com resolução angular de 0,25° e incerteza radial de $\pm 0,30$ mm no raio. O sistema é transladado dentro do duto para obter um panorama completo do estado da superfície interna, adquirindo uma imagem a cada 1 mm de deslocamento axial. Uma nuvem de pontos completa pode ser visualizada na figura 18. (BUSCHINELLI, 2013)

Figura 16 – Esquema de funcionamento óptico do sistema PEROLA-I.



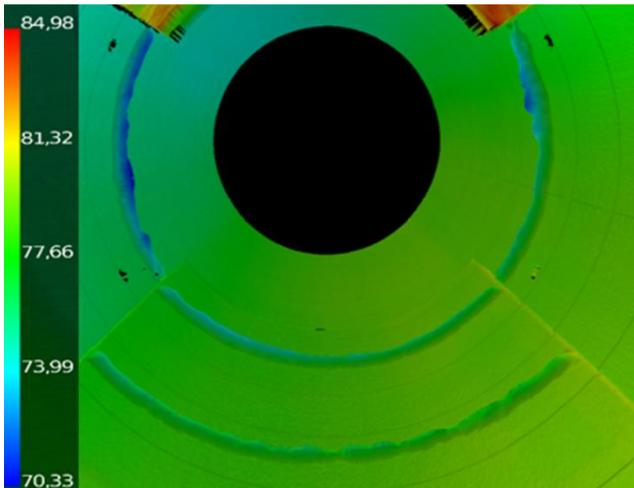
Fonte: Buschinelli (2013).

Figura 17 – Protótipo PEROLA-I.



Fonte: Buschinelli (2013).

Figura 18 – Exemplo de medição do protótipo PEROLA-I. A escala de cores está em milímetros.



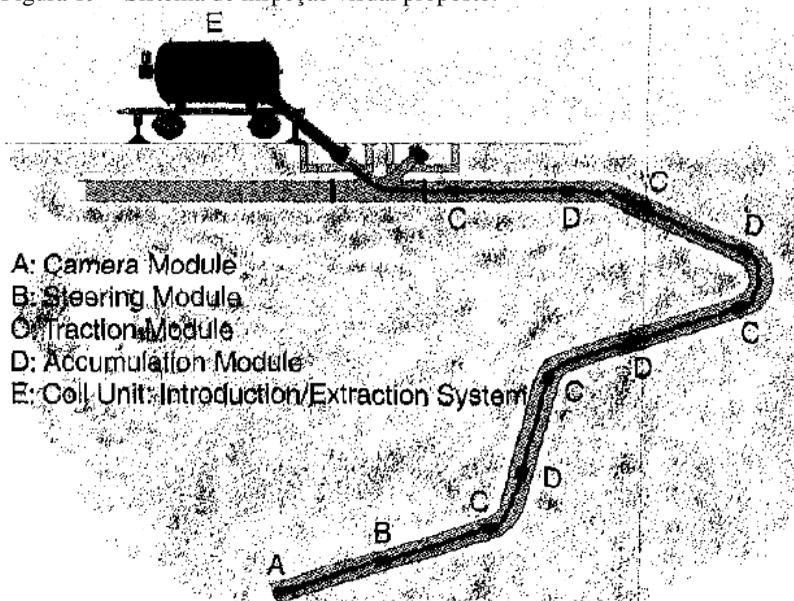
Fonte: Buschinelli (2013).

2.15 SISTEMA ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO DE DUTOS DE FORNECIMENTO DE ÁGUA

Moraleda, Ollero e Orte (1999) geraram um sistema, para inspeção de dutos para fornecimento de água, que inspecionasse o interior do duto com o mínimo tempo de interrupção do serviço de fornecimento.

O sistema consiste numa sequência de módulos conectados por fibra óptica, cuja extremidade há uma câmera colorida alinhada com o centro do duto (Figura 19). Para obter imagens das paredes, pode ser utilizado um segundo módulo com câmera, que pode rotacionar em torno do eixo central do duto, obtendo imagens de todos os ângulos da superfície interna. Outro sistema proposto foi com apenas uma câmera e utilizando prismas e lentes de forma a adquirir imagens da parede interna do duto (MORALEDA, OLLERO e ORTE, 1999).

Figura 19 – Sistema de inspeção visual proposto.



Fonte: Moraleda, Ollero e Orte (1999).

O sistema se move dentro do duto a partir de água pressurizada injetada no sistema, produzindo movimento tanto para frente quanto para trás. Os módulos do sistema podem ser facilmente trocados, facilitando a manutenção e a adequação do comprimento do sistema à diferentes comprimentos de duto. (MORALEDA, OLLERO e ORTE, 1999).

Junto com as imagens, há o registro da posição do sistema dentro do duto, dado necessário para localização de defeitos internos. Esse equipamento também auxilia no mapeamento da localização topográfica

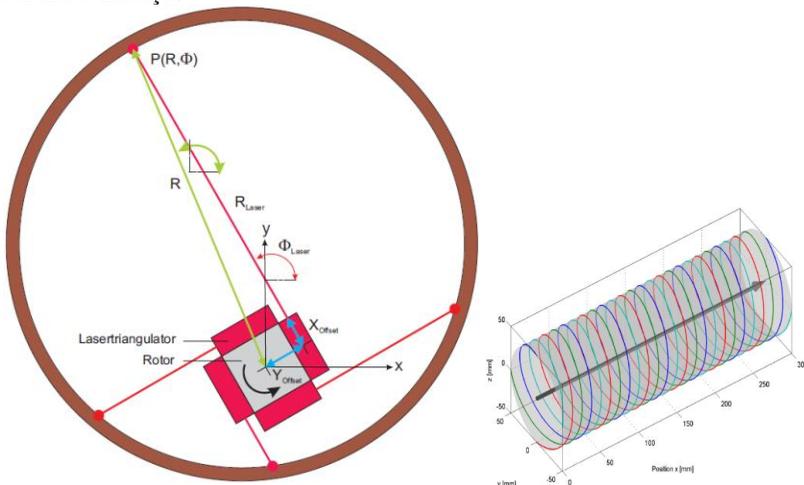
do duto, que no caso do fornecimento de água, nem sempre é totalmente conhecido. (MORALEDA, OLLERO e ORTE, 1999).

Para análise das imagens, o sistema possui dois algoritmos diferentes: um para medição do diâmetro do duto, usando estimativa a partir de uma circunferência perfeita. O sistema também mede distâncias lineares de interesse, como o tamanho de uma fissura, a partir da marcação feita pelo operador do início e do fim. Para ambas as medições são necessárias uma calibração prévia, a utilização de filtros para diminuir o ruído e a transformação da imagem colorida para níveis de cinza. (MORALEDA, OLLERO e ORTE, 1999).

2.16 ROGS

Ritter e Frey, 2010 desenvolveram um sensor para reconstrução da superfície interna de dutos, denominado ROGS (*Rotating Optical Geometry Sensor*). O sistema é baseado na triangulação laser, porém com dois ou mais sensores laser, como pode ser observado na Figura 20, à esquerda. Os sensores são colocados numa plataforma rotativa e o escaneamento do duto é feito através do caminho em hélice realizado pelos sensores (Figura 20, à direita).

Figura 20 – À esquerda, esquema do ROGS, utilizando 4 sensores de triangulação a laser. À direita, esquema do caminho que os sensores laser fazem durante a medição.



Fonte: Ritter e Frey (2010).

O ROGS foi desenvolvido para se acoplado em outros sistemas de inspeção visual, como em alguns tipos de robôs de inspeção onde há apenas medidas qualitativas do estado do duto. Dessa forma, o sistema deve ser acoplado junto à câmera, para que a própria câmera do robô seja utilizada para visão das linhas laser.

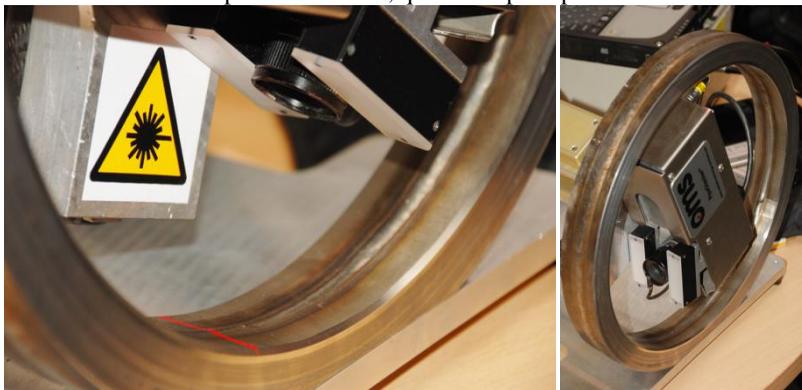
Há uma correlação importante entre o diâmetro do duto, a velocidade de inspeção e a velocidade angular do sensor laser, sendo que a relação entre eles determina a resolução circunferencial, ou seja, a distância entre as hélices. Por exemplo, um duto com diâmetro de 400 mm exige uma velocidade de rotação de 470 rpm, e uma velocidade de 320 mm/s, determinando a resolução circunferência de 10 mm – desde que o sistema esteja centralizado no duto (RITTER e FREY, 2010).

A calibração do ROGS é realizada num padrão retangular de referência, com distâncias conhecidas e controle de posição do sistema. Cada sensor laser é avaliado separadamente, de forma a serem extraídos parâmetros intrínsecos e extrínsecos do sistema.

2.17 ESCÂNER ÓPTICO DE SOLDAS ADANSOR

Além de sistemas ópticos que percorrem a parte interna de dutos para inspeção total da parede interna, alguns sistemas são utilizados para verificação da solda entre os tubos, muitas vezes antes do duto entrar em operação.

Figura 21 – À esquerda, o escâner óptico percorrendo uma solda simulada. A direita uma visão completa do sistema, que se adapta a parede do duto.



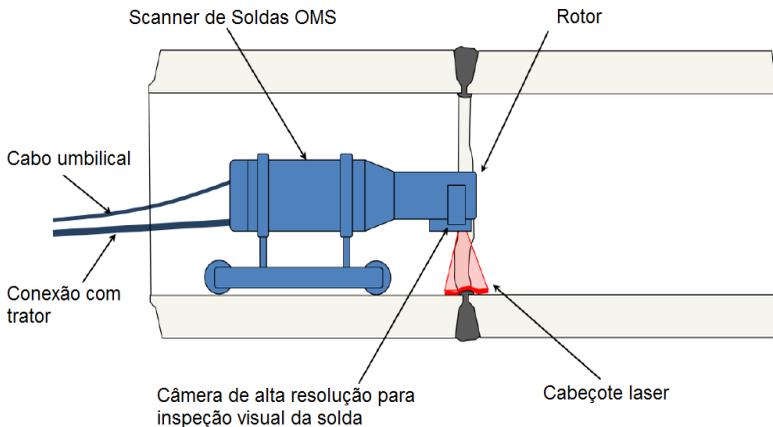
Fonte: Adansor (2012a).

O escâner óptico (figura 21) foi desenvolvido para inspeção da geometria interna da união soldada realizada entre dois tubos. O sistema grava vídeo e imagens com grande qualidade, mostrando detalhes da superfície, e pode ser utilizado em vários diâmetros de duto. É utilizada a técnica de triangulação laser e o sistema gira, acompanhando a parede do duto (figura 21, à esquerda). Os dados obtidos são enviados via cabo umbilical de fibra óptica a um computador, podendo o cabo ter até 200 m de comprimento (ADANSOR, 2012a).

2.18 OMS ESCÂNER DE SOLDA

O escâner de solda da OMS mede tubos com diâmetros entre 100 e 1000 mm, utilizando triangulação laser. A configuração básica pode ser observada na figura 22, sendo que a empresa construiu três equipamentos: para grandes diâmetros (de 450 a 1000 mm), para médios diâmetros (de 200 a 400 mm) e para pequenos diâmetros (de 100 a 200 mm) (OMS, 2012).

Figura 22 – Esquema do sistema construído pela OMS.



Fonte: Clarke e Gooch (2009).

A medição dura de 20 segundos a 1 minuto, inspecionando uma área de 30 x 30 mm², com incerteza de 0,05 mm. O sistema tem detecção automática de parâmetros da solda (altura, comprimento, entre outros), e opera numa distância de até 2 km do ponto de inserção no tubo, podendo ser utilizado por até 12 horas ininterruptas (OMS, 2012).

Figura 23 – Escâner da OMS para diâmetros grandes inspecionando um tubo.



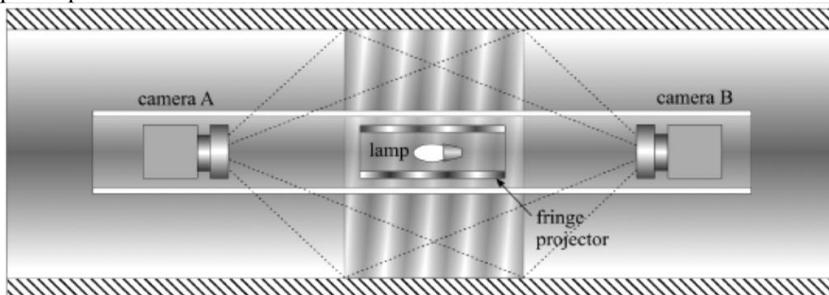
Fonte: Clarke e Gooch (2009).

2.19 ENDORISER

Albertazzi et al (2008) propuseram um sistema utilizando duas câmeras idênticas posicionadas face a face, conforme ilustrado na figura 24. O protótipo Endoriser utiliza um princípio de medição baseado na fotogrametria ativa, onde é utilizada a projeção de padrões de franjas helicoidais para auxiliar na determinação da posição tridimensional do ponto na superfície. O método foi adequado à utilização interna em dutos, adaptando o sistema de projeção de padrões.

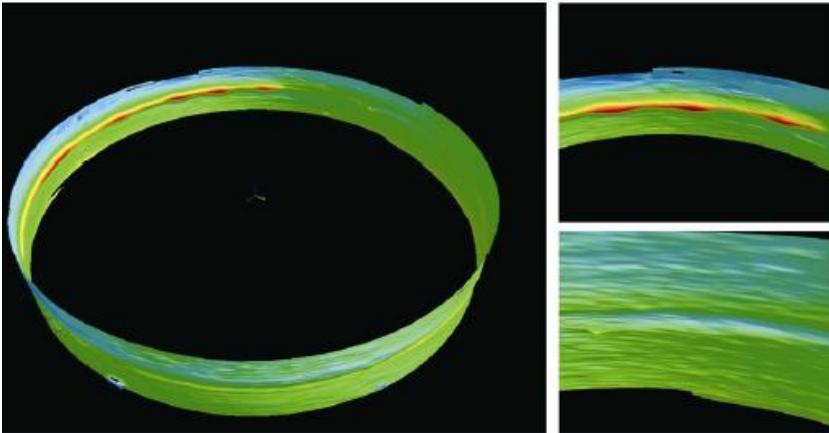
A protótipo construído para tubos de diâmetro igual a 152,4 mm (6''), possui cerca de 0,2 mm de incerteza radial. Na figura 25 pode-se observar um resultado de medição do protótipo. (ALBERTAZZI et al, 2008).

Figura 24 – Esquema ilustrando o princípio fotogramétrico utilizado pelo protótipo Endoriser.



Fonte: Albertazzi, Hoffman, Fantin e Santos (2008).

Figura 25 – Medição da região da união soldada entre dois dutos. À direita são mostradas regiões onde há excesso de material (acima) e outro onde há falta de material (em baixo).



Fonte: Albertazzi, Hoffman, Fantin e Santos (2008).

2.20 ROBÔ DE INSPEÇÃO DE KAWAGUCHI ET AL

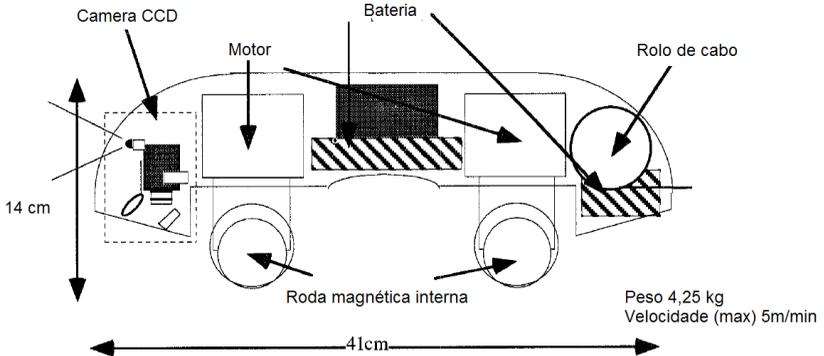
Kawaguchi et al (1995) desenvolveram um robô de inspeção que consegue ultrapassar obstáculos, como válvulas, curvas e junções tipo T, e chegar aos locais de solda do duto. O sistema foi projetado de forma a se adaptar às possíveis configurações da superfície interna, numa configuração para vários diâmetros, de fácil ajuste, podendo passar inclusive por redutores de diâmetro. A solução encontrada, para a versatilidade necessária ao sistema, foi a utilização de rodas magnéticas, e por isso o sistema ficou limitado a tubos de material ferro-magnético. Com isso, inclusive a movimentação na vertical é possível.

Além disso, o sistema desenvolvido pode percorrer até 500 m dentro do duto, que deve ter entre 150 a 600 mm de diâmetro. Uma preocupação foi quanto à utilização de um cabo umbilical leve e fino, para que não haja problemas com a sua fricção na superfície interna do duto, nem perda de informação durante a inspeção. Esse problema foi resolvido utilizando fibra óptica para a comunicação, que é armazenada num tambor dentro do protótipo, que desenrola conforme o necessário. Para a alimentação, foi embutida uma bateria no robô de inspeção. Um esquema do sistema pode ser observado na figura 26.

Para a inspeção de soldas foi desenvolvido um sistema visual, conforme esquema da figura 27. Uma única câmera é utilizada, porém visualizando duas regiões do duto: a frontal e a lateral. São utilizados

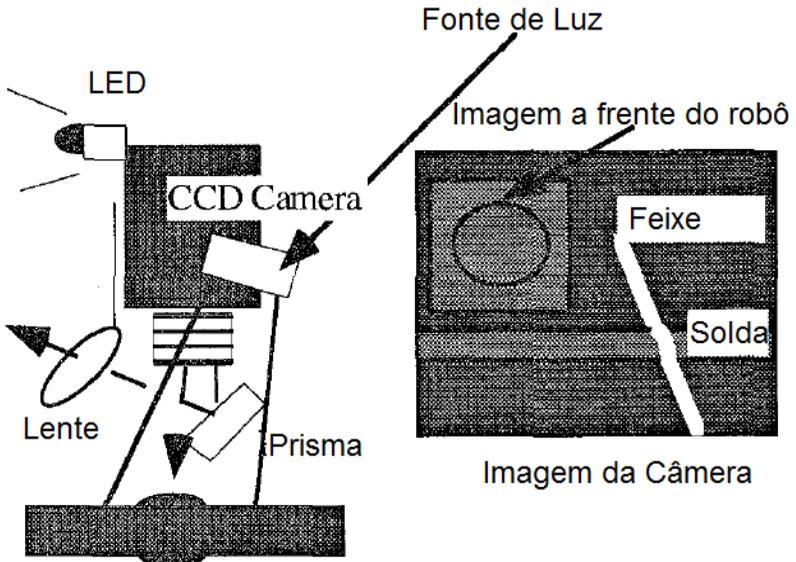
dois sistemas de iluminação composto por LEDs, e no caso da iluminação lateral, é utilizada também uma lente cilíndrica. O robô consegue a imagem de toda a circunferência da solda se movendo angularmente ao longo da superfície.

Figura 26 - Esquema do robô de inspeção de soldas.



Fonte: Kawaguchi et al (1995).

Figura 27 – À esquerda, esquema do sistema de inspeção visual de solda. À direita, esquema da imagem obtida com ele, onde as duas imagens obtidas dividem o mesmo CCD: a visão frontal do robô e a visão lateral.



Fonte: Kawaguchi et al (1995).

2.21 HANSEN, ALISMAIL, RANDE E BROWNING

Hansen, Alismail, Rander e Browning (2009) desenvolveram um sistema de hometria visual objetivando a localização do robô de inspeção dentro de dutos que transportam gás natural liquefeito (LNG). Para tanto, eles desenvolveram um sistema monocular visando à utilização de algoritmos baseados na técnica de Fluxo Óptico para resolução dessa tarefa. A visão monocular, além da função hodométrica, faria uma reconstrução tridimensional, baseada apenas em uma câmera, utilizando imagens de dois momentos diferentes, comparando par a par e realizando uma inspeção visual do interior do duto.

Para cumprir esses objetivos, os autores aplicaram dois tipos de algoritmos para realizar a hometria visual (e posteriormente a reconstrução tridimensional): algoritmo denso e algoritmo esparso. Em ambos, são realizadas comparações entre imagens adquiridas com a diferença de posição correspondentes a alguns pixels, utilizando métodos numéricos de minimização para encontrar a correspondência entre o mesmo ponto nas duas imagens. Com isso é possível aferir a movimentação da câmera, tanto translação quanto rotação, e usar esta informação como um ponto de partida para triangulação entre as imagens, levando à reconstrução. A diferença básica entre os dois algoritmos é simples: enquanto o algoritmo denso utiliza informação de todos os pixels das imagens, o algoritmo esparso utiliza pontos-chave para calcular o movimento, sendo necessária a definição de critérios para a escolha desses pontos (HANSEN et al, 2009).

O sistema monocular foi adicionado a um robô de inspeção tipo *crawler*, e testado em tubos de aço carbono de 6 m (tipo 01) e 4 m (tipo 02), com diâmetros de 152,4 mm (6'') e 406,4 mm (16''), respectivamente. A avaliação das medições realizadas pode ser observada na tabela 1, onde pode ser observado o erro da posição axial calculado para cada medição realizada, por tipo algoritmo.

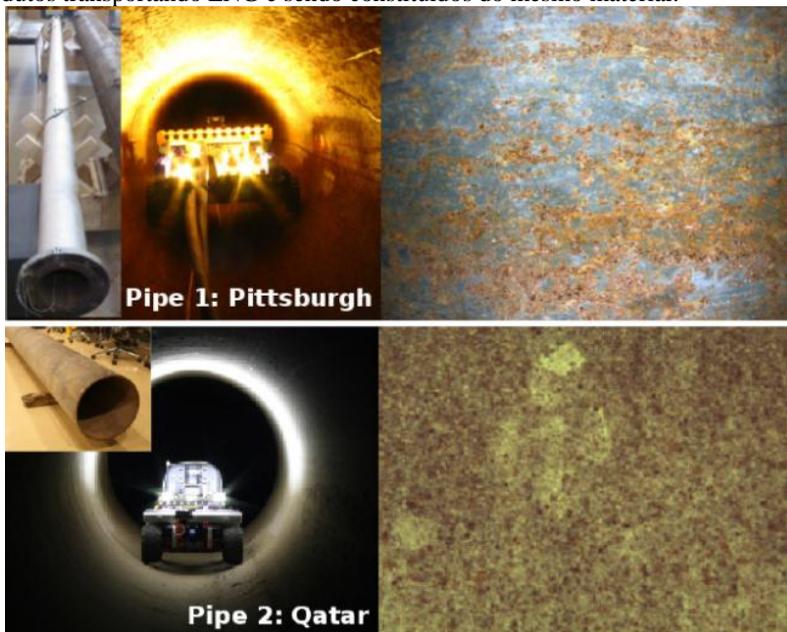
Tabela 1 – Erro calculado relativo à posição axial do sistema para cada medição realizada.

Medição		Denso	Esparso
Duto 1a	Erro (mm)	-9,0 (0,15%)	17,9 (0,31%)
Duto 1b	Erro (mm)	42,4 (0,72%)	16,9 (0,29%)
Duto 1c	Erro (mm)	29,8 (0,26%)	4,0 (0,034%)
Duto 2	Erro (mm)	127,4 (1,88%)	-13,6 (0,20%)

Fonte: Hansen, Alismail, Rander e Browning (2009).

Os autores comentam que o erro percentual é menor que 1% em quase todas as medições, porém é importante salientar que nenhum dos dutos possuía defeitos geométricos, e essa característica é o ponto de partida dos algoritmos utilizados. Mesmo assim, o algoritmo esparsos foi considerado melhor que o denso, nas condições aplicadas.

Figura 28 – Fotografia mostrando o robô de inspeção utilizado em cada duto, e imagens da textura interna mostrando grandes diferenças, mesmo ambos os dutos transportando LNG e sendo constituídos do mesmo material.



Fonte: Hansen, Alismail, Rander e Browning (2009).

Na os autores comentam que o erro percentual é menor que 1% em quase todas as medições, porém é importante salientar que nenhum dos dutos possuía defeitos geométricos, e essa característica é o ponto de partida dos algoritmos utilizados. mesmo assim, o algoritmo esparsos foi considerado melhor que o denso, nas condições aplicadas.

figura 28 é interessante notar o efeito do sistema de iluminação nas imagens adquiridas pelos robôs nos dois dutos em que o sistema foi testado, onde há uma região com maior intensidade de brilho no centro. Tal efeito atrapalha algoritmos baseados na técnica de Fluxo Óptico, sendo necessário o uso de máscaras de ganho. Tais máscaras são

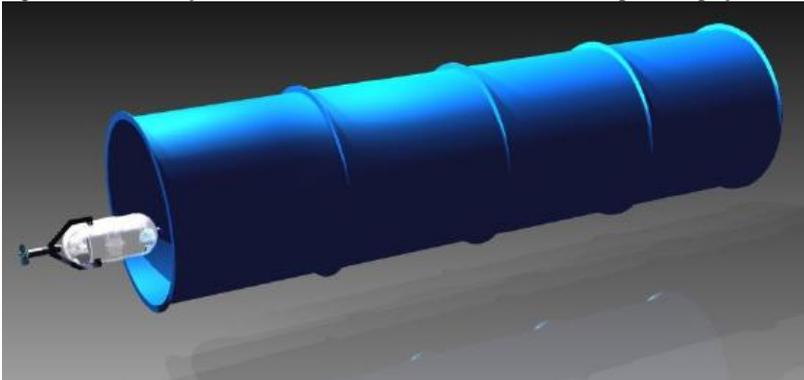
aplicadas em cada imagem, minimizando o efeito da não-uniformidade da intensidade da iluminação.

Embora o sistema possua resultados promissores, ainda não é utilizado para medição de tubos em campo. Novos ensaios em dutos com deformidades e avaliação da reconstrução tridimensional ainda devem ser realizados.

2.22 AUV PARA MAPEAMENTO INTERNO

Bodenmann, Thornton, Ura e Painumgal (2009) desenvolveram um robô de inspeção tipo veículo autônomo submarino, ou AUV (*autonomous underwater vehicle*) para navegar por dentro de dutos, visualizando e mapeando a sua superfície, sem encostar nas paredes internas do duto, conforme pode ser observado na figura 29.

Figura 29 – Ilustração mostrando o AUV entrando num duto para inspeção.



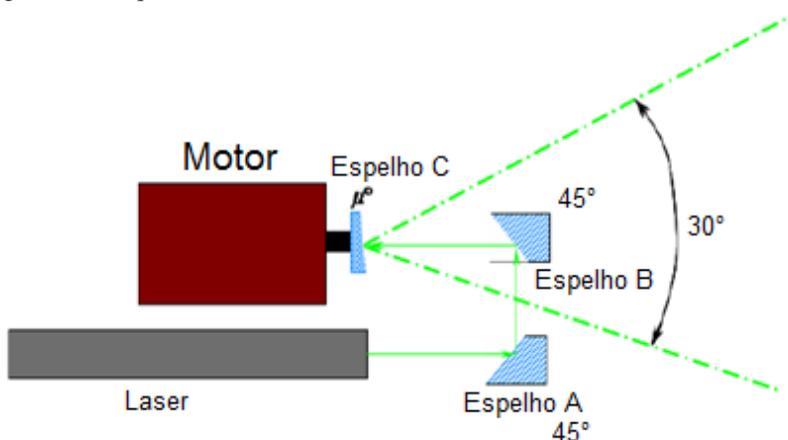
Fonte: Bodenmann, Thornton, Ura e Painumgal (2009).

O AUV possui um giroscópio, sistema de navegação autônoma e um sensor de posição e orientação laser, que mede a distância do sistema à parede do duto. O sensor laser é composto por uma câmera com lente tipo olho de peixe e um feixe de laser. A lente possui um ângulo de visão de 180° , que possibilita a observação de toda a parede do duto. O feixe é refletido pelos espelhos A e B, como mostrado na figura 30, e com a rotação do espelho C, forma-se um cone de laser com a abertura de 30° . Utilizando o processamento da imagem e comparação com imagens padrão, o sensor determina quatro graus de liberdade da posição do AUV (UNNIKRISHNAN et al, 2009).

O veículo adquire imagens da superfície interna e a reconstrói tridimensionalmente. Para isso é necessário saber a posição do AUV no duto e a orientação da câmera. A maioria dos parâmetros necessários é obtida com um sensor laser, porém, como há a possibilidade do sistema girar livremente dentro do tubo, os ângulos relativos ao posicionamento do AUV são obtidos através de um giroscópio.

As imagens do duto são adquiridas através de uma câmera com lente tipo olho de peixe, e conforme os parâmetros adquiridos pelos outros sensores do sistema, as imagens são combinadas de forma a reconstruir tridimensionalmente a parede do duto. Toda a parte inspecionada do duto gera também uma única imagem bidimensional tipo mosaico, mostrando todas as imagens, correspondentes ao comprimento do duto, “costuradas” e de uma única vez, onde é possível classificar alguns tipos de defeitos. (BODENMANN et al, 2009)

Figura 30 – Esquema do sensor laser do AUV.



Fonte: Unnikrishnan, Thornton, Ura e Nose (2009).

Bodenman et al (2009) afirmam que embora o sistema tenha sido desenvolvido para dutos retos e distribuição de água, os trabalhos futuros deverão abranger a navegação em tubos complexos (com curvas, cotovelos, etc.).

2.23 CONSIDERAÇÕES

A partir dos sistemas apresentados no decorrer do Capítulo 2, são citados diferentes métodos de medição, todos baseados em princípios

ópticos, com diferentes características e aplicações. As características apresentadas dão suporte à utilização dessas ferramentas, e servem de base para o desenvolvimento de outras. Para tanto, é necessária uma visão global, observado a diversidade de princípios de medição utilizados.

A maior parte das ferramentas apresentadas utiliza laser, sendo que seis dos sistemas estão acoplados a robôs de inspeção. O princípio de triangulação laser foi utilizado de diversas formas: desde elementos fixos que refletem, refratam ou difratam o feixe, até sistemas com movimentos de rotação.

A maioria utiliza apenas uma câmera para adquirir as imagens. Três dos sistemas apresentados fazem a inspeção de forma apenas visual, qualitativa, dependente de um operador habilitado e experiente para análise dos dados. Cinco dos sistemas de inspeção robótica, dois videoscópios e dois sistemas de inspeção de soldas são utilizados comercialmente.

Em relação a dados quantitativos, é interessante a utilização dos sistemas videoscópios referenciados, onde é possível extrair informações geométricas (no mínimo, o comprimento entre dois pontos) das imagens.

Pode-se reunir as características apresentadas pelos sistemas no quadro 2.

Os sistemas apresentados fazem a reconstrução por pontos geométricos ou mostram imagens qualitativas. É interessante a união dos dois tipos de dados num novo sistema, para oferecer mais informações sobre a condição do duto. Dessa forma, justifica-se a necessidade de um novo sistema de inspeção para a superfície interna de dutos.

Quadro 2 - Comparação entre características dos sistemas de inspeção analisados.

Sistema Medição	Olympus IPLEX	GE XLG3	Wilson et al	Berto e Lourenço	TK-PIC	LOTIS	Rover	Thielmann et al	Ro/visual	OMC	Adansor	Lee et al	Duran et al	PEROLA-I	Moralada et al	ROGS	Escaner Adansor	OMS	Endoriser	Kawagushi et al	Hansen et al	Bodenmann et al
Uma Câmera	■	■	■		■	■	■		■	■	■	■	■	■	■		■	■		■	■	■
Distância entre pontos	■	■		■											■							
Dados Qualitativos	■				■		■		■						■							
Triangulação Laser						■				■	■	■	■	■		■	■	■		■		■
Tempo de Voo								■														
Projeção de Franjas		■																	■			
Optical Flow			■																		■	
Diâmetro (mm)	4,0 - 8,5	3,9 - 8,4	15		100	10 - 147	50 - 1500		406 - 1423	140 - 480	270 - 900		260 - 300	152,4		400		100 - 1000	152,4	150 - 600	152 - 606	
Sistema Comercial	■	■	■			■	■		■	■	■						■	■				

Fonte: Autor.

3 RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL A PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS

Os sistemas ópticos de inspeção utilizam, em sua maioria, a captura de imagem via câmeras digitais. A imagem digital é extremamente conhecida nos dias de hoje, tanto para fins científicos e industriais quanto para recreação e recordações familiares.

Essa tecnologia apareceu no início do século XX, com imagens sendo quantificadas e telegrafadas. (GONZALEZ; WOODS, 2010) Em 1957, a imagem captada por um escâner, de um bebê (Figura 31), apareceu pela primeira vez num computador, no *National Bureau of Standards*². A imagem, que tinha somente 176 pixels de altura retratava o filho de Russell Kirsch, o pesquisador responsável por um dos poucos computadores programáveis existentes na época. (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2007).

Figura 31 - Primeira imagem digital obtida.



Fonte: National Institute of Standards and Technology (2007).

² O *National Bureau of Standards*, ou NBS, hoje conhecido como o *National Institute of Standards and Technology*, ou NIST, nos Estados Unidos. (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2007)

Já a primeira câmera digital foi criada por Steve Sasson em 1974, enquanto trabalhava no Eastman Kodak. Ela captava a luz e transformava em números, gravando os dados numa fita cassete digital. (HUFFINGTON POST, 2013)

Desde então, vários pesquisadores trabalharam para melhorar a qualidade das imagens digitais, sendo na aquisição ou através de ferramentas de processamento.

Considera-se imagem digital a imagem que pode ser "discretizada tanto em coordenadas espaciais quanto em brilho"(GONZALEZ; WOODS, 2010, p.4). Dessa forma, a imagem é formada por pequenos quadrados elementares de posição, e cada quadrado tem o seu valor de intensidade. Esses quadrados elementares, também são conhecidos como elementos da imagem, pixels (*picture x elements*). (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Quanto a informação de cor, pode-se classificar as imagens digitais em dois grupos: imagens monocromáticas e imagens coloridas.

As imagens monocromáticas possuem apenas uma banda espectral. Dessa forma, a imagem pode ser representada de forma binária, em preto e branco, ou em escala de cinza, onde a variação do brilho é frequentemente discretizada em 256 valores, indo do preto (0) ao branco (255). (CONCI; AZEVEDO; LETA, 2008)

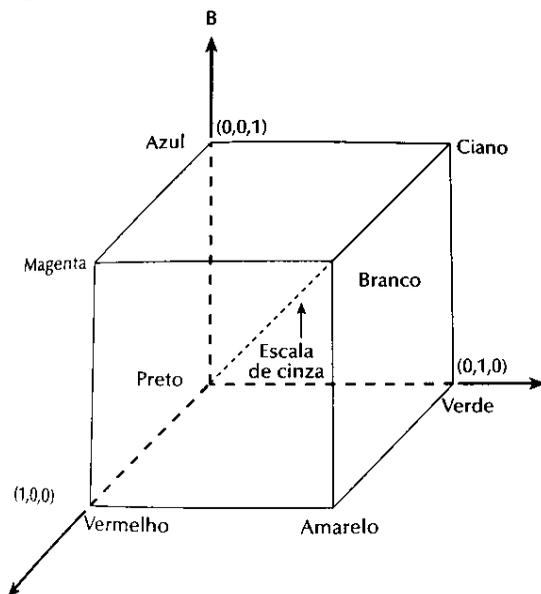
Imagens coloridas utilizam-se várias bandas espectrais. Com três bandas visíveis é formada uma imagem colorida aos olhos humanos. (CONCI; AZEVEDO; LETA, 2008) Para isso existem formatos padronizados para perceber a cor do objeto. Há vários modelos de descrição de cores, como o XYZ, RGB, HSV, CMY e CMYK. No modelo RGB, por exemplo, o espaço de cor é formado por um cubo, que pode ser visualizado na figura 32, sendo as cores vermelho, verde e azul vértices. (GONZALEZ; WOODS, 2010). Desta forma, pode-se compreender o valor RGB da imagem como um vetor de três coordenadas - um para cada cor - discretizada em 256 valores para cada coordenada. O valor (0;0;0) corresponde a cor preta e o valor (1;1;1), a cor branca. A correspondência entre os valores RGB e tons de cinza pode ser realizada de várias maneiras, dentre elas as mais comuns são a luma e a desaturação (GIMP, 2014).

3.1 CAPTURA E FORMAÇÃO DE IMAGEM

O modelo mais simples de câmera é chamado de modelo *pinhole*. Este modelo se baseia no fato em que cada ponto da imagem é a projeção de um ponto no espaço tridimensional, feito através de uma

linha reta que passa pelo seu centro de projeção (HEIKKILÄ; SILVÉN, 1997).

Figura 32 - Cubo de cores RGB.



Fonte: Gonzalez e Woods (2010), pg.161.

Alguns séculos antes de cristo, após os chineses descobrirem que a luz viaja em linhas retas, um filósofo chinês chamado Mo Ti referenciou pela primeira vez a imagem invertida formada através de um pequeno orifício (*pinhole*). Após, Aristóteles (século IV a.C.), Alhazen (século X d.C), também estudaram o *pinhole* (CHERNEWSKI, 2014).

O modelo *pinhole* foi referenciado em 1545, numa ilustração do livro *De radio astronomico et geometrico liber* (Figura 33 -). Na época, as observações de eclipses eram possíveis usando a projeção da imagem do mesmo numa parede dentro de um quarto escuro. (BALIHAR, 2014) Neste modelo o centro de projeção é o furo na parede, local onde todos os raios de luz passam para construir a imagem do eclipse na parede.

Johannes Kepler (1571-1630) desenvolveu uma câmara escura com o mesmo princípio, usando um orifício e uma lente para auxiliar no desenho de paisagens. A câmara observava uma paisagem que era projetada num anteparo, facilitando a sua reprodução. Ele próprio criou,

em 1620, uma versão portátil da câmara, também destinada à melhora do desenho (LEAL e ANTUNES, 2003) Dessa forma, para a câmara escura virar uma câmera juntou-se a ela um material fotossensível (filme).

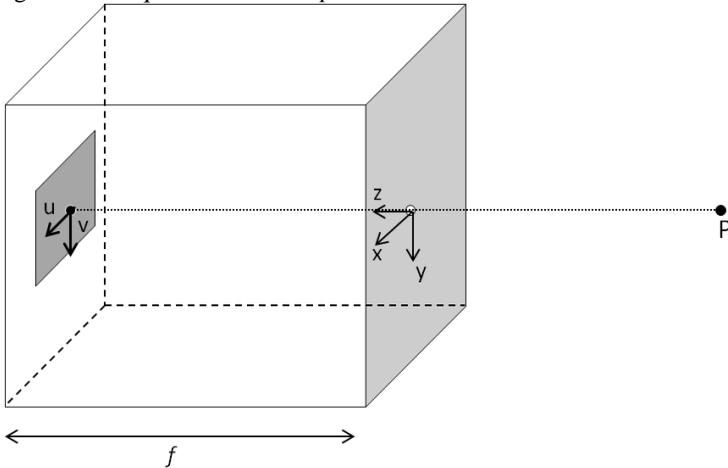
Figura 33 - Primeira ilustração do modelo *pinhole*. O método era utilizado para observação de eclipses.



Fonte: Frisius (1558).

A primeira fotografia tirada como uma câmera *pinhole* foi registrada em 1850 pelo cientista escocês David Brewster. Essa técnica possui imagem com linhas menos definidas e foi muito utilizada no final do século XIX (BALIHAR, 2013).

No modelo *pinhole* ideal, dado um ponto $P = P(x, y, z)$, sua projeção no plano imagem é realizada como na figura 34. (HARTLEY e ZISSERMAN, 2003) A Nesse esquema pode-se observar a relação entre as coordenadas tridimensionais do ponto (x, y, z) no mundo com as coordenadas da imagem (u, v) .

Figura 34 - Esquema da câmara *pinhole*.

Fonte: Autor.

Na forma mais simples, usando apenas a distância focal f :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dessa forma é possível escrever a relação em coordenadas homogêneas:

$$\begin{bmatrix} \lambda u \\ \lambda v \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fx \\ fy \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Se for considerado um deslocamento do sistema de coordenadas da imagem (u, v) em relação ao ponto central da imagem, e outras características dos pixels da câmera em questão:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f & \tau & \sigma_u & 0 \\ 0 & \eta f & \sigma_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde o η representa a razão de aspecto (*aspect ratio*) do pixel; τ , está relacionado com o erro de ortogonalidade entre os eixos u e v da imagem; e σ_u e σ_v são as coordenadas do ponto central da imagem. Esses parâmetros, junto com a distância focal, englobam os parâmetros

intrínsecos da câmera e formam a matriz \mathbf{K} . Nas câmeras modernas de boa qualidade os parâmetros podem ser assumidos como $\tau = 0$ e $\eta = 1$.

Além dos parâmetros internos da câmera (parâmetros intrínsecos), o modelo leva em questão a orientação da câmera em relação a um sistema de coordenadas global. Para tanto, são necessárias rotações e translações para relacionar o sistema de coordenadas da câmera com o sistema de coordenadas global. Em coordenadas homogêneas, primeiro é realizada a translação pelo vetor $\vec{t} = (-t_x, -t_y, -t_z)$, depois as rotações representada pela matriz \mathbf{R} , conforme a equação (4).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Câmera}} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & -Rt_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & -Rt_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & -Rt_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Global}} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Câmera}} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R}\vec{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Global}} \quad (5)$$

Assim, chega-se a matriz de projeção \mathbf{P} (equação 6) e a relação entre as coordenadas da câmera e do sistema de coordenadas global, representado na equação 7.

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}(\mathbf{R}\vec{t}) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

O modelo *pinhole* não leva em consideração distorções e outros efeitos, assim como a existência de lentes. Porém ele é um modelo muito próximo ao comportamento de uma lente ideal. No mundo real, porém, as lentes não são perfeitas, causando distorções e aberrações nas imagens.

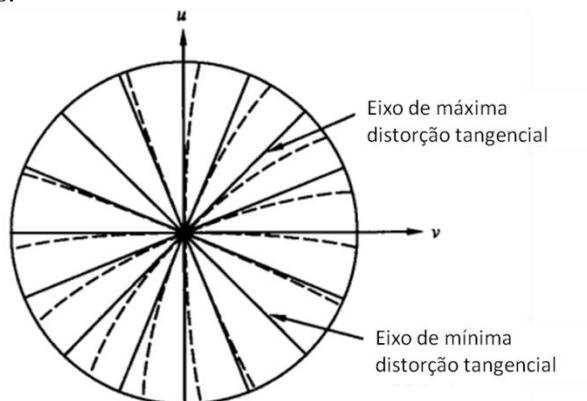
Um complemento ao modelo é a adição de parâmetros para representar a distorção. Uma vez identificados os valores dos parâmetros que descrevem as distorções, eles podem ser usados para corrigi-las. O centro de projeção de uma câmera moderna não é tão bem determinado quanto a posição de um furo na parede. A objetiva de uma câmera moderna frequentemente envolve uma combinação de várias lentes. O

cálculo teórico da posição equivalente ao centro do *pinhole* e das distorções resultantes do sistema de lentes não é simples. Normalmente é determinado indiretamente por calibração. É necessário incluir nesse modelo parâmetros de distorção que ajudam a descrever a formação da imagem (Brown, 1971).

A distorção pode ser modelada a partir de parâmetros tangenciais e radiais em relação ao centro da lente. Embora haja uma separação quanto ao tipo, os efeitos de distorção radial e tangencial são geralmente observados juntos.

- Distorção tangencial: Gerada por algum desalinhamento no sistema óptico, imperfeições ou defeitos de fabricação. (WENG, COHEN e HERNIOU, 1992) Seu efeito pode ser observado na figura 35.

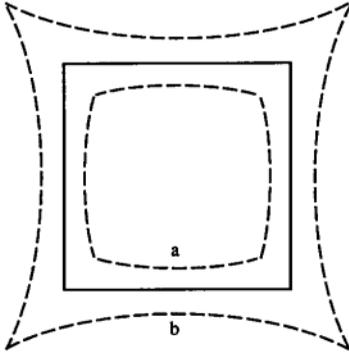
Figura 35 – Esquema mostrando o efeito da distorção tangencial. Nas linhas solidas não há distorção. Nas linhas pontilhadas observa-se o efeito da distorção.



Fonte: Weng, Cohen e Herniou (1992).

- Distorção radial: Segundo Hartley e Zisseman (2003), esse é o tipo de distorção mais significativo, que tende a ser maior quanto menor o comprimento focal. O efeito da distorção radial pode ser observado na periferia da imagem, que parece abaloada, conforme a figura 36. A distorção radial pode ter diferentes valores e perfis para cada cor, numa câmera colorida (REMONDINO e FRASER, 2006).

Figura 36 – Esquema mostrando como a distorção radial afeta a imagem. Na linha sólida não há distorção. Nas linhas pontilhadas há distorção negativa em (a) e positiva em (b).



Fonte: Weng, Cohen e Herniou (1992).

Para a aplicação do modelo de distorção junto a câmera *pinhole* pelo método de Bouguet³ (2004), é necessário a normalização nas coordenadas já rotacionadas/transladadas, conforme a equação (8).

$$P_N = \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_N \\ y_N \end{bmatrix} \quad (8)$$

Usando os parâmetros de distorção radial e tangencial na equação das coordenadas normalizadas obtêm-se as coordenadas corrigidas $P_C = (x_C; y_C)$:

$$\begin{aligned} x_C &= (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) x_N + 2k_3 x_N y_N \\ &\quad + k_4 (r^2 + 2x_N^2) \\ y_C &= (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) y_N + 2k_4 x_N y_N \\ &\quad + k_3 (r^2 + 2y_N^2) \end{aligned} \quad (9)$$

Onde,

$$r^2 = (x_N^2 + y_N^2) \quad (10)$$

³ O Método de Bouguet está implementado no Toolbox de Calibração de Câmeras do Matlab, e apresenta resultados compatíveis com a necessidade.

Os coeficientes k_1 , k_2 e k_5 correspondem aos parâmetros de distorção radial, enquanto k_3 e k_4 são os parâmetros de distorção tangencial.

A partir das coordenadas corrigidas é possível utilizar a matriz de projeção \mathbf{P} e obter a correspondente coordenada na imagem (u, v):

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & \tau & \sigma_u \\ 0 & \eta f & \sigma_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Desta forma, com poucos parâmetros é possível conhecer a relação entre a cena tridimensional observada e a sua imagem.

3.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS

A calibração de uma câmera utiliza um elemento padrão com geometria conhecida e fornece valores para os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera e as respectivas incertezas associada ao processo. Há vários métodos desenvolvidos para a calibração de câmeras na literatura. Segundo Remondino e Fraser (2006), os métodos diferem basicamente em alguns pontos: o modelo de projeção utilizado, o tipo de padrão de calibração utilizado; e método de solução matemática (linear, não-linear ou combinado).

Remondino e Fraser (2006) citam os métodos de Tsai (1987), Heikkila e Silven (1997) e Zhang (1998) como os mais utilizados em reconstrução tridimensional e fotogrametria. Dentre eles, optou-se pela utilização do método de calibração desenvolvido por Zhang em 1998 pela simplicidade do seu padrão de calibração. Para a extração dos parâmetros neste método, deve-se utilizar um padrão plano, com quadrados pretos, parecido com um tabuleiro de xadrez. Há necessidade de diferentes posicionamentos do padrão em relação à câmera, porém eles não precisam ser previamente conhecidos. O método se sobressai entre os outros, pela flexibilidade do padrão e de seus posicionamentos, bem como por estar disponível no toolbox do *Matlab*. (ZHANG, 1998)

3.3 RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL

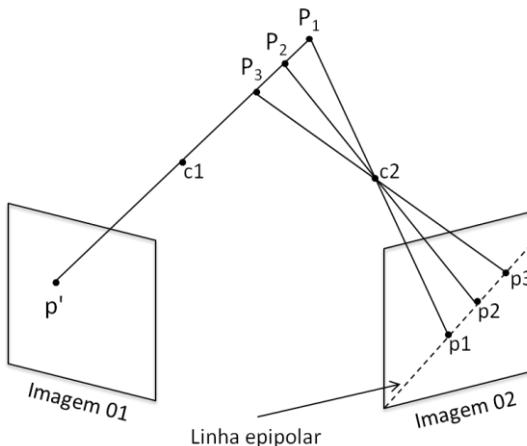
Como visto nos itens anteriores, é possível relacionar o espaço tridimensional com a sua imagem adquirida por uma câmera. Da mesma forma é possível fazer a transformação inversa onde, partindo das imagens, pode-se reconstruir o ambiente tridimensional onde elas foram capturadas. Há duas formulações principais que são utilizadas para este

fim: a triangulação (HARTLEY e ZISSEMAN, 2003) e a triangulação inversa (FANTIN, ALBERTAZZI e PINTO, 2007). Os dois métodos utilizam os parâmetros conhecidos de duas (ou mais) câmeras para fazer uma triangulação entre o espaço tridimensional e o mesmo ponto visualizado nas duas imagens, denominados de pontos homólogos.

3.3.1 Geometria Epipolar

Segundo Hartley e Zisseman (2003), a geometria epipolar é a geometria projetiva aplicada a duas posições de observação (ou câmeras). Desta forma, considerando duas câmeras observando o mesmo ponto P no espaço tridimensional, adquire-se as imagens 1 e 2 conforme a figura 37. A busca pelos pontos homólogos é realizada usando a geometria epipolar como restrição. Partindo de p' , a projeção do P na imagem 1, a posição do ponto P no espaço estará necessariamente contida dentro da linha reta que passa por p' e $c1$. A projeção desta reta na imagem 2 define uma linha sobre a qual necessariamente estará a projeção do ponto P na imagem 2. A busca deve se dar apenas ao longo desta linha. Usando um critério de correspondência, ou seja, uma função que meça a similaridade entre os pontos das duas imagens, é possível usar a limitação imposta pelo cruzamento das retas de projeção de cada câmera para encontrar a coordenada tridimensional do ponto P .

Figura 37 - Esquema mostrando a restrição imposta pela geometria epipolar na busca da coordenada 3D do ponto p' , a partir de duas câmeras.



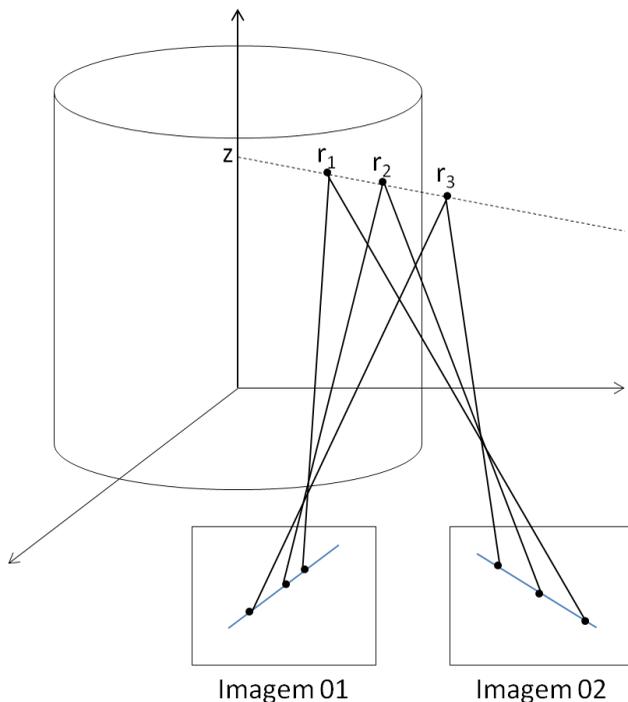
Fonte: Autor.

3.3.2 Triangulação inversa

Fantin, Albertazzi e Pinto (2007) fundamentam o método de triangulação inversa, onde há a definição prévia de um sistema de coordenadas favorável à busca em relação ao qual é gerada uma malha regular de pontos ordenados. Este método iterativo parte do ponto tridimensional para a busca dos homólogos nas imagens 1 e 2. Cada ponto tridimensional da malha é projetado nas imagens conforme descrito no item 3.1. Uma das coordenadas espaciais do ponto é variada entre um valor mínimo e máximo. Um critério de correspondência é usado sobre os pontos projetados nas imagens para apontar o valor correto da coordenada espacial.

No caso de coordenadas cilíndricas, por exemplo, pode-se variar a coordenada r para cada $P = P(z, \theta)$, nos valores r_1 , r_2 e r_3 , e usando um critério de correspondência, encontrar o r correspondente ao ponto P , ilustrado na figura 38.

Figura 38 - Esquema da triangulação inversa: do 3D para o 2D.



Fonte: Autor.

3.3.3 Pontos Homólogos: Critérios de Correspondência

Os pontos homólogos são definidos a partir de um critério de correspondência aplicado nas imagens correspondentes às projeções da cena. Existem vários critérios de correspondência, de acordo com a técnica óptica utilizada.

A medição óptica tridimensional de superfícies por fotogrametria é dividida basicamente em fotogrametria passiva e ativa. A diferença é que na ativa ocorre a utilização de algum artefato de projeção de luz estruturada (laser ou projetor, por exemplo), enquanto na passiva não é utilizado nenhum tipo de projeção, mas a textura natural da cena. Para cada técnica existem critérios de correspondência relacionados.

Por exemplo, na fotogrametria ativa com projeção de franjas, o valor da fase das franjas projetadas, calculado para o pixel de uma das imagens, deve ser semelhante ao valor de fase calculada para o ponto homólogo situado na outra imagem. (SALVI et al, 2010) Na fotogrametria passiva, pode-se usar a correlação espacial entre os pixels vizinhos como critério de correspondência, desde que a cena observada tenha textura heterogênea.

O coeficiente de correlação mede a associação, interdependência, intercorrelação ou relação entre variáveis aleatórias. Embora o método mais comum envolva a análise através de uma função linear entre somente duas variáveis aleatórias, há várias formas de determinar a correlação. (LIRA, 2009)

A correlação linear – ou correlação de Pearson – é a forma mais simples e mais conhecida de correlação (LIRA, 2009). Ela relaciona duas variáveis aleatórias, X e Y , através da equação linear da reta (equação 12).

$$Y = aX + b \quad (12)$$

Para quantificá-la utiliza-se o Coeficiente de Correlação de Pearson (ρ) que utiliza a covariância (σ_{xy}) e os desvios padrões (σ_x, σ_y) das variáveis X e Y na forma:

$$\hat{\rho}_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_y \sigma_x} \quad (13)$$

Sendo $X = [x_0; x_1; x_2 \dots x_N]$ e $Y = [y_0; y_1; y_2 \dots y_N]$, então desvio padrão de X é

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=N} (x_i - \mu_x)^2}{N - 1}} \quad (14)$$

e a covariância,

$$\sigma_{xy} = \frac{\sum_{i=0}^{i=N} (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{N - 1} \quad (15)$$

Quando a correlação linear é utilizada em imagens, normalmente é definida uma região ao redor do ponto de busca, de forma a comparar pequenas regiões da imagem. A correlação é calculada em relação a intensidade dos N pares de pixels contidos nessa região.

A quantificação da relação entre dois sinais pela correlação de Pearson é muito utilizada no processamento de imagens e reconstrução tridimensional (GONZALEZ; WOODS, 2010). Segundo Schreier, Orteu e Sutton (2009) o termo “*digital image correlation*”, ou DIC, contempla os métodos de medição sem contato, onde as imagens adquiridas são digitais e a sua análise leva à descrição completa da forma, deformação ou movimento.

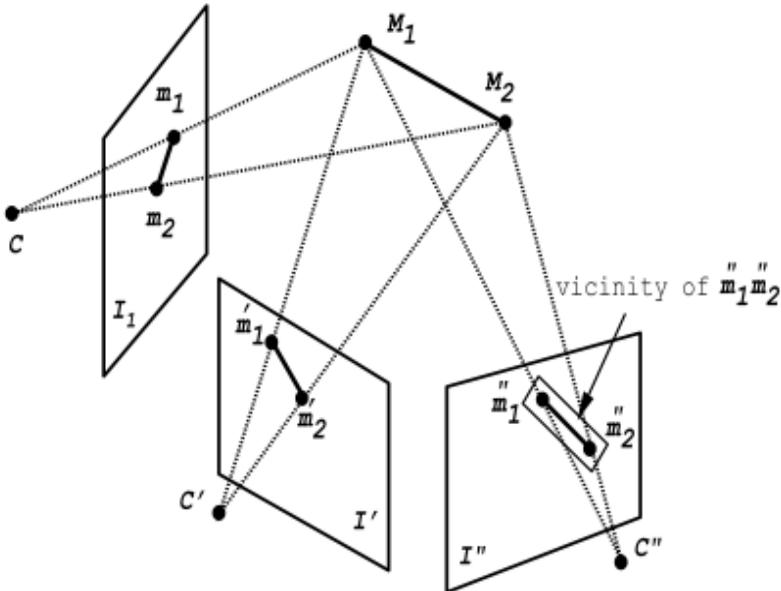
A técnica é bem conhecida e utilizada em instrumentos de medição comerciais e, em geral, utilizando a projeção de padrões aleatórios e duas câmeras (DANTEC, 2014 e CORRELATED, 2014).

3.3.4 O caso das três câmeras

A utilização de três câmeras pode ser conveniente para a reconstrução tridimensional. De acordo com Dhond e Aggarwal (1990) os algoritmos utilizados para estereoscopia trinocular diferem dos de binocular na restrição epipolar usada para fazer a correspondência entre os pontos homólogos entre as imagens, como é possível observar na figura 39. Nesse artigo publicado a mais de 24 anos, a discussão primordial era quanto a diminuição da incerteza em relação ao custo computacional da adição de uma terceira câmera ao sistema. Mesmo nos dias atuais, essa ainda é a questão que permeia a utilização de mais de duas câmeras para prover a reconstrução tridimensional. Segundo Yao, Linton e Padir (2013) a visão trinocular fornece maior precisão que a binocular, o que beneficia algumas aplicações como o cálculo de distâncias e a detecção e reconhecimento de objetos. Mesmo assim, o seu custo computacional deve ser considerado.

Como afirmam Agrawal e Davis (2002), os critérios de correspondência mais comuns em pares de câmeras são baseados ou em características ou em pixels. No caso dos critérios baseados em características, certos pontos – que constituem uma assinatura única – são buscados nas imagens.

Figura 39 – Projeção aplicada a três câmeras.



Fonte: Hemayed e Farag (1998).

No caso dos critérios baseados na vizinhança dos pixels, é feita a correlação entre as imagens usando uma janela de pixels. Quando realizada entre três câmeras, a informação sobressalente pode ser utilizada para melhorar a correspondência de pontos com ambiguidades ou realizar a busca usando a relação par a par (STEWART e DYER, 1988) Um exemplo da busca par a par é a utilização da correlação cruzada normalizada modificada, ou MNCC⁴, realizada por Mulligan, Isler e Daniilidis (2002) realizada primeiro com as câmeras central e direita, depois com a central e a esquerda, concluindo na minimização dos resultados obtidos. Ueshiba (2006) utiliza correspondência bidirecional, geometria epipolar, e a correlação par a par; assim como a

⁴ MNCC ou *Modified Normalized Cross Correlation*.

correlação por volume (3D DSI) de Mozerov et al (2009), que após a quantificação da correlação centro-direita e centro-esquerda, as informações são fundidas e minimizadas. Habeb e Boufama (2000) chegam à formação de uma matriz de projeção para o conjunto trinocular, usando as matrizes de projeção de cada câmera e tensores trilineares, aplicado ao caso onde as três câmeras têm centros colineares. Nordberg (2008) utiliza um tensor de sete dimensões gerando uma triangulação otimizada em relação aos erros de reprojeção. Nordberg (2011) fundamenta a utilização de tensores canônicos trifocais e restrições da geometria epipolar para fazer a reconstrução tridimensional iterativa. Byröd, Josephson e Åström (2007) mostram a possibilidade de usar a técnica de Gröbner para a solução de sistemas multivariáveis aplicado à reconstrução tridimensional no conjunto de três câmeras. A reconstrução trinocular também pode ser ativa, com a utilização de um ou mais projetores (BLAKE et al, 1993). Em todos os trabalhos listados, a busca pelos pontos homólogos parte da projeção das imagens, usando a geometria epipolar. Somente após a busca ter resultados, que é realizada a projeção dos pontos 2D para o cenário tridimensional.

3.4 CONCATENAÇÃO DE NUVENS DE PONTOS

Após a completa reconstrução tridimensional da cena observada pelas múltiplas câmeras é obtida uma nuvem de pontos. A nuvem de pontos é definida como um conjunto de coordenadas multidimensionais de pontos que representam a superfície de um ou mais objetos. Normalmente utilizam-se as três coordenadas do espaço cartesiano (nuvens 3D), porém é possível haver nuvens 4D, onde a quarta coordenada representa a cor associada ao ponto. (PCL, 2014) Em outros casos, pode haver mais três coordenadas referentes a um vetor unitário normal à superfície, associado a cada ponto. As características da nuvem de ponto dependem em cada utilização.

Muitas vezes, há a necessidade de realizar múltiplas medições de um objeto (ou cena) complexo(a). Neste caso, os resultados obtidos são algumas nuvens de pontos, representando diferentes segmentos do mesmo objeto, de pontos de vista diferentes. Outras vezes é necessária a união de dados cujas nuvens resultam de diferentes sistemas de medição, como luz estruturada, estereoscopia ativa ou passiva, triangulação laser e técnicas que utilizam o tempo de voo. (LARKINS, CREE e DORRINGTON, 2010) Até mesmo a comparação entre uma nuvem medida e seu modelo matemático pode ser necessária. (FUKAI e XU, 2011). A junção dessas nuvens numa única nuvem, maior e

completa, é possível aplicando translações, rotações e outras transformações, de forma que todas as nuvens parciais sejam referenciadas ao mesmo sistema de coordenadas. O método – aqui referido como “concatenação de nuvens de pontos” – é de grande interesse na visão computacional, computação gráfica e engenharia reversa. (TAM et al, 2013). Seu principal objetivo é achar a melhor transformação matemática que combine as nuvens parciais em um mesmo sistema de coordenadas, e é realizado estabelecendo correspondências entre o mesmo ponto em nuvens diferentes.

Vários algoritmos foram desenvolvidos para esse fim, considerando pelo menos duas nuvens de pontos, que podem estar espacialmente e/ou temporalmente defasadas. Alguns incluem até a possibilidade de deformação da superfície entre a aquisição das nuvens parciais. (TAM et al, 2013)

Os métodos mais utilizados são baseados no algoritmo ICP⁵, desenvolvido no início da década de 1990 por Besl e McKay (1992). (FUKAI e XU, 2011; RUSINKIEWICZ e LEVOY, 2001). O algoritmo estima a correspondência entre pontos de duas nuvens de pontos distintas usando parâmetros de rotação e translação. Porém é necessário que inicialmente as duas nuvens estejam pelo menos grosseiramente alinhadas. (FUKAI e XU, 2011; RUSINKIEWICZ e LEVOY, 2001). Nota-se que as nuvens resultantes de processos de medição apresentam incertezas associadas aos pontos causados por erros de calibração e não linearidades relativas ao sistema de medição (TAM et al, 2013). Diversas foram elaboradas a partir do algoritmo original do ICP, porém RUSINKIEWICZ e LEVOY (2001) dividiram-nas em seis partes principais:

1. Seleção de alguns pontos em uma nuvem, ou em ambas;
2. Fazer a correspondência desses pontos entre as duas nuvens;
3. Análise dos pares correspondentes;
4. Rejeição de alguns pares;
5. Encontro de uma função erro baseada nas correspondências;
6. Minimização desse erro;

Embora o ICP seja a família de algoritmos mais utilizada para este fim, existem limitações como o caso de nuvens sem características marcantes. Neste caso, podem-se utilizar restrições geométricas do sistema ou outras informações disponíveis. Com a concatenação é possível obter a distância entre as duas nuvens. No caso de um sistema em movimento, a distância entre as aquisições pode ser medida.

⁵ ICP ou *iterative closest point*.

A localização do robô de inspeção e o mapeamento da geometria interna do duto, embora com fins distintos, podem ser realizadas de forma conjunta. Há diversos trabalhos apresentando a reconstrução tridimensional da cena observada para robôs a partir de dados extraídos do método de Fluxo Óptico (CHENG et al, 2006; COMPORT, MALIE e RIVES, 2010). Sendo que, alguns algoritmos utilizam inclusive iluminação não homogênea para hometria por imagem, entre as imagens adquiridas, como no trabalho de Hansen et al (2011).

3.5 CONSIDERAÇÕES

A utilização de três câmeras para a reconstrução tridimensional usando a geometria epipolar como restrição é bem conhecida. Porém, a utilização de três câmeras usando a triangulação inversa, e a aquisição simultânea da textura, são os elementos inovadores desta tese e as bases para a concepção de um novo tipo de sistema de inspeção.

4 DEMANDAS DA APLICAÇÃO

Como visto no Capítulo 2, há uma grande variedade de sistemas ópticos para inspeção de superfícies internas de dutos. Os sistemas de visão possuem em comum como principal restrição a necessidade de que a superfície inspecionada esteja limpa e seca. Por outro lado, possuem também características desejáveis para a aplicação, como a elevada velocidade de medição, o que proporciona grande quantidade de pontos medidos por posicionamento. Além disso, não possuem contato com o mensurando. Neste capítulo são enumeradas as características desejáveis para um sistema de inspeção da geometria interna de dutos que atenda as principais demandas de inspeção.

4.1 DEMANDAS DE INSPEÇÃO

Transportando líquidos e gases, frequentemente em altas pressões, e às vezes, em altas temperaturas, a superfície interna do duto está sujeita a diversos tipos de danos. Corrosão, abrasão e amassamentos estão dentre os principais. A avaliação geométrica periódica da superfície interna é então necessária como forma de assegurar a integridade do duto.

Dentre os tipos de corrosão mais comuns encontrados na superfície interna de dutos pode-se citar a corrosão puntiforme (Pitting Corrosion) e a corrosão generalizada.

Segundo a NACE (*National Association of Corrosion Engineers*), existem sete tipos de corrosão que podem ser identificadas visualmente (NACE, 2014). Dentre elas, as mais comuns em dutos são:

- Corrosão uniforme: corrosão extensa, que afeta uma grande área. Fácil de reconhecer e raramente causa grandes danos à superfície (NACE, 2014). Causa perda de espessura, porém é fácil de localizar e medir com inspeções regulares (FERREIRA et al, 2002).
- Corrosão puntiforme: corrosão localizada, apresentada na forma de buracos na superfície, com cavidades angulosas e profundidade maior que seu diâmetro (FERREIRA et al, 2002) . É mais perigosa que a corrosão uniforme, sendo mais difícil de reconhecer e de evitar (NACE, 2014). Sua dimensão pode variar, mas normalmente possui poucos milímetros.
- Corrosão em placas: Corrosão em forma de placas - cavidades de grande diâmetro e pequena profundidade. Atinge apenas algumas regiões da superfície. (FERREIRA et al, 2002)

- Corrosão laminar ou esfoliação: corrosão que forma lâminas de material sob a superfície, podendo ser extremamente agressiva ao duto se formar múltiplas camadas. (NACE, 2014) Essa corrosão é paralela à superfície metálica e gera um volume na região, pois separa camadas da superfície (FERREIRA et al, 2002).
- Corrosão Seletiva: Atinge superfícies compostas por determinados elementos químicos e ligas. As mais comuns são a grafítica e a dezineificação:
 - Corrosão grafítica: Corrosão seletiva que atinge superfícies de ferro fundido em temperatura ambiente. A região afetada fica com aspecto escuro, característica do resíduo formado, o grafite (FERREIRA et al, 2002).
 - Dezineificação: Corrosão seletiva que atinge superfícies de cuja a liga metálica seja de cobre-zinco (latões), alterando a cor da superfície do amarelado para o avermelhado (FERREIRA et al, 2002).

Além de corrosão, outros efeitos podem causar mudanças na geometria do duto ou perda de massa, como amassamentos, causados pela ação de terceiros, por exemplo; e a perda por abrasão.

A avaliação desses defeitos na superfície interna depende do conhecimento de suas características. Por isso, na inspeção, informações geométricas da superfície e do defeito são muito importantes. Essas informações possibilitam a determinação do tipo de corrosão ou defeito e avaliar sua severidade. A informação sobre a textura também é importante, visto que alguns tipos de corrosão possuem textura característica, auxiliando na identificação do problema e na sua possível solução.

Alguns defeitos, como a corrosão em placas, pode ser determinada com apenas uma inspeção, visto que suas características são bem definidas. Já o efeito da corrosão generalizada na superfície necessita de um acompanhamento periódico, de forma a avaliar a taxa de perda de material.

Um sistema para a inspeção interna deve observar algumas características operacionais e metrológicas para melhor atender a demanda a que foi designado. A demanda por corrosão, por exemplo, necessita de resolução lateral de pelo menos 1 mm, para a identificação do defeito. A resolução radial deverá ser de pelo menos 0,1 mm. Além disso, deve-se estabelecer o diâmetro de trabalho (ou faixa de diâmetros) e a possibilidade de passar por curvas e outros obstáculos presentes na tubulação.

4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SISTEMA

Dessa forma, o sistema de inspeção desenvolvido no escopo desta tese deverá mapear a geometria e textura da superfície interna de trechos retos de duto. Outras características importantes são:

- Almeja-se que esse processo demore no máximo 1 s por seção medida. O processamento das imagens será realizado posteriormente.
- Baixas incertezas: Para a quantificação dos defeitos é necessário que a incerteza radial seja de 0,5 mm.
- Boa resolução lateral para a quantificação de regiões corroídas com dimensões a partir de $1 \times 1 \text{ mm}^2$.
- Aquisição da textura: A textura do duto será descrita pelos tons de cinza relativos a cada ponto medido.
- Não haverá tração própria: O sistema de inspeção será movido por meios externos.
- Diâmetro alvo: 203,2 mm (8’’).
- Processamento e armazenamento externo: O processamento dos dados será realizado por computador portátil. A conectividade será realizada via cabos firewire B (IEEE 1394b), o que possibilita a distância máxima para sua utilização em até 100 m.
- Velocidade de inspeção: Da ordem de 50 mm/s, ou seja, cerca de 3 m/min, realizando a aquisição de imagens no modo autônomo, para processamento posterior dos dados coletados. Essa velocidade é compatível com as de outros sistemas utilizados na inspeção da superfície interna de dutos, discutidos no Capítulo 2.
- Hodometria: A aquisição da posição axial do protótipo ao longo do duto, fazendo a sua hodometria via sistema óptico. Utilizando métodos de hodometria por imagem, além do posicionamento axial do protótipo, deverá ser capaz de medir rotações em torno do eixo do duto. As incertezas axial e angular deverão ser da ordem de 1% do comprimento percorrido e 1° respectivamente.
- Escalabilidade: Sistema de inspeção que possa ser utilizado em diferentes diâmetros: necessidade de fácil adaptação do protótipo, mediante a troca de alguns elementos ópticos e/ou mecânicos e nova calibração.

- Nuvem de pontos com textura⁶: No resultado da medição será mostrado a geometria mapeada na forma de uma superfície com textura.

4.3 SOLUÇÃO PROPOSTA

Juntado as demandas de inspeção e as características técnicas, chega-se a proposta do sistema de medição inovador, que é descrito em detalhes no próximo capítulo. Este é baseado no processamento das imagens adquiridas por três câmeras, junto com um sistema de iluminação homogênea para aquisição da textura.

A reconstrução tridimensional será realizada através da triangulação inversa - técnica que fornece uma nuvem de pontos regular com menos esforço computacional. A utilização da triangulação inversa utilizando a textura natural do duto para a correlação fornece aspectos positivos que serão melhor explorados no próximo capítulo.

⁶ Embora o termo “textura” seja por vezes associado à microgeometria de uma superfície técnica, neste trabalho “textura” é usada para se referir ao aspecto visual da superfície.

5 TRIANGULAÇÃO INVERSA TRINOCULAR BASEADA EM TEXTURA

Uma abordagem inovadora foi desenvolvida no contexto deste trabalho para a utilização de um sistema trinocular, objetivando a inspeção da geometria e textura internas de dutos. O algoritmo desenvolvido utiliza projeção inversa com o auxílio da textura para identificação dos pontos homólogos no interior de cilindros.

5.1 ALGORITMO DE TRIANGULAÇÃO INVERSA BASEADO NA TEXTURA

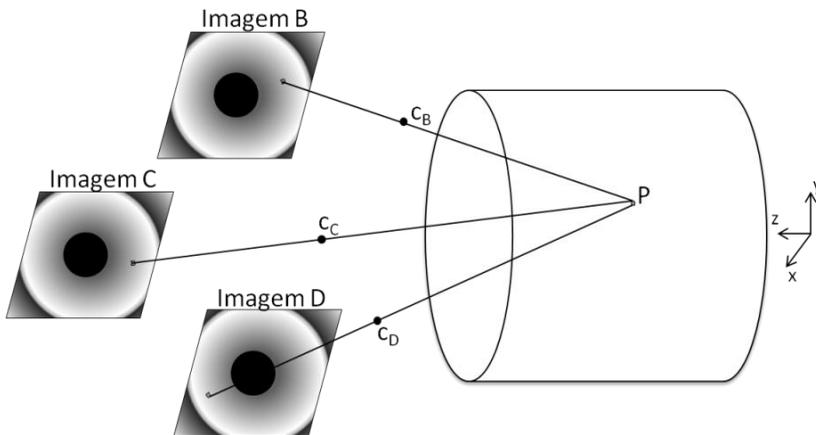
Os algoritmos clássicos de triangulação determinam as coordenadas tridimensionais partindo das coordenadas dos pontos homólogos nas imagens. A triangulação inversa parte de uma estimativa da coordenada 3D do ponto interrogado, que é projetado nas imagens. A coordenada estará correta quando for obtida a condição de máxima correlação. Para aplicar a triangulação inversa na medição com múltiplas câmeras da superfície interna de dutos foi necessária a adaptação dessa abordagem.

Primeiro é necessário definir o sistema de coordenadas global que será utilizado, assim como os parâmetros da malha de discretização. Como visto no item 3.3.2, a definição da malha de pontos que será percorrida pelo algoritmo definirá a resolução lateral da nuvem de pontos resultante. Usando coordenadas cilíndricas - sistema adequado a medição de dutos - alinha-se o eixo z com o duto, e a coordenada a ser determinada na superfície é o raio. A definição do tamanho da malha é compatível com o comprimento do trecho de interesse do duto a ser medido, sendo necessário especificar valores de z máximo e mínimo (comprimento do trecho medido), e os valores de θ máximo e mínimo (normalmente utiliza-se de 0° até 359°). O volume de medição é definido ao se fixar a faixa de busca através dos valores de raio (r) máximo e mínimo. Além disso, a resolução lateral da nuvem é determinada pelos incrementos nas coordenadas z e θ . A resolução do raio também é definida previamente, com valores adequados para a incerteza necessária ao sistema de medição.

Partindo de um ponto interrogado da malha cilíndrica escolhe-se um valor-tentativa de raio para caracterizar a posição tridimensional do ponto. Para verificar se o valor escolhido para o raio está correto, procede-se a projeção do ponto nas imagens, como ilustrado na figura

40. Como a calibração resultou na definição de um sistema de coordenadas cartesiano, para cada ponto em coordenadas cilíndricas é realizada uma transformação para coordenadas cartesianas para a projeção nas imagens. A projeção é simples, pois todas as matrizes de projeção e parâmetros de distorção das câmeras são previamente determinados pela calibração. O eixo axial do duto é o eixo z do sistema cilíndrico e coincide com o eixo z do sistema cartesiano, definido na calibração das câmeras.

Figura 40 - Esquema mostrando a projeção de um ponto tridimensional da casca do duto nas imagens.

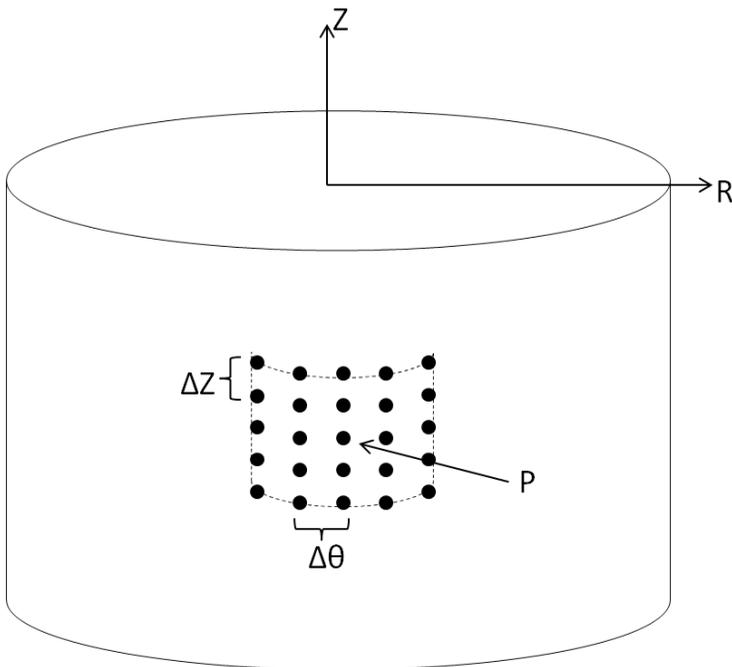


Fonte: Autor.

Para entender como funciona a triangulação inversa, considere que um ponto P pertencente à superfície cilíndrica seja pintado de vermelho. Consequentemente, as três imagens projetadas conterão um ponto vermelho. Se a coordenada 3D do ponto pintado de vermelho for conhecida, suas projeções, calculadas a partir das matrizes de projeção, coincidirão exatamente com as posições dos pontos vermelhos nas imagens de cada câmera. Se o valor do raio estiver incorreto, as projeções não mais coincidirão com os pontos vermelhos nas imagens. Assim, para achar o valor correto do raio é suficiente varrer os valores ao longo do raio até que os valores dos pixels nas três imagens sejam todos vermelhos, sendo este o critério de convergência. No mundo real, não se tem pontos vermelhos, mas pontos rodeados por uma textura aleatória. E é esta característica que deve ser aproveitada para identificar os pontos homólogos.

Para utilizar essa característica é proposto avaliar a similaridade entre regiões vizinhas ao ponto. Assim, em torno de cada ponto interrogado, é definida uma região discretizada centralizada em torno do ponto tridimensional, cercado por um número (j^2-1) de elementos, variados por um $\Delta\theta$ e ΔZ previamente definidos, mas com o mesmo valor de raio. Essa região será denominada de *casca cilíndrica de interrogação* e está ilustrada na figura 41. A casca cilíndrica de interrogação pode ser entendida como a versão tridimensional das janelas de busca utilizadas para correlação de imagens planas.

Figura 41 - Definição da casca cilíndrica de interrogação.

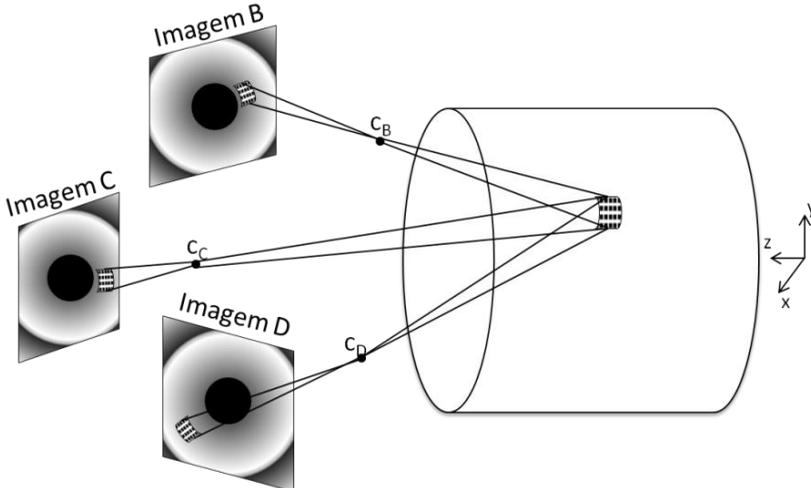


Fonte: Autor.

A triangulação inversa é realizada usando as projeções de cada um dos j^2 pontos da casca cilíndrica de interrogação, definida pelo ponto central $P = P(r, \theta, z)$, nas três imagens. Um critério de correspondência avalia a similaridade entre as matrizes formadas pelos níveis de cinza das projeções dos pontos da casca cilíndrica de interrogação (figura 42). A variação do raio é realizada partindo de um raio mínimo, que é incrementado por ΔR pré-definido, até atingir o raio máximo, onde o ΔR

é a resolução radial desejada. O valor do raio r no qual o coeficiente de correspondência é máximo será atribuído ao ponto P .

Figura 42 - Esquema mostrando a projeção da casca cilíndrica do 3D para o 2D.



Fonte: Haertel, Pinto e Albertazzi (2014*).

5.2 CRITÉRIOS DE CORRESPONDÊNCIA

A determinação de pontos homólogos deve ser feita usando dados das três imagens. É uma operação necessária para a reconstrução tridimensional da cena. Para um determinado ponto P escolhido na malha definida em coordenadas cilíndrica a busca é feita variando o valor do raio r da casca cilíndrica de interrogação até que o critério de correspondência seja atingido. Para cada valor de r , uma matriz de intensidades de dimensões $j \times j$ é obtida a partir das projeções de cada ponto da casca cilíndrica de interrogação em cada uma das três imagens. A similaridade entre as três matrizes é analisada. Para tanto foram testados alguns critérios de correspondência baseados em funções de correlação.

Se fossem consideradas apenas duas matrizes, a utilização do coeficiente de correlação linear poderia ser uma boa solução. Essa estratégia é bem conhecida e utilizada na reconstrução tridimensional estereoscópica binocular. Para três matrizes de dados, no entanto, o caminho tem que ser diferente. Para o sistema de medição proposto foram avaliados três caminhos para encontrar o ponto homólogo

comparando as matrizes obtidas nas três imagens: desvio padrão médio, correlação tripla e soma das correlações.

5.2.1 Coeficiente de Desvio Padrão Médio

Para aplicar este caminho é necessário iniciar com um pré-processamento dos dados de cada matriz. O valor médio de cada matriz é calculado e subtraído de cada elemento. Com isso pretende-se minimizar a influência de pequenas diferenças entre as câmeras, como o brilho ou regulagem do diafragma, que afetam predominantemente o valor médio da imagem. Embora as três câmeras sejam do mesmo modelo e tenham sido configuradas com os mesmos parâmetros, elas não se comportam exatamente da mesma forma.

Após a subtração do valor médio para cada matriz, é calculado o desvio padrão entre os dados das três matrizes. O cálculo é feito para cada elemento da matriz j^2 : por exemplo, um coeficiente é calculado entre os elementos (0,0) das três matrizes, outro para os elementos (0,1) e assim por diante. Após, é calculada a média entre os desvios padrões, somando todos os coeficientes calculados e dividindo a soma pelo número de elementos.

Figura 43 – Uma das imagens internas do tubo de PVC com textura artificial simulada.



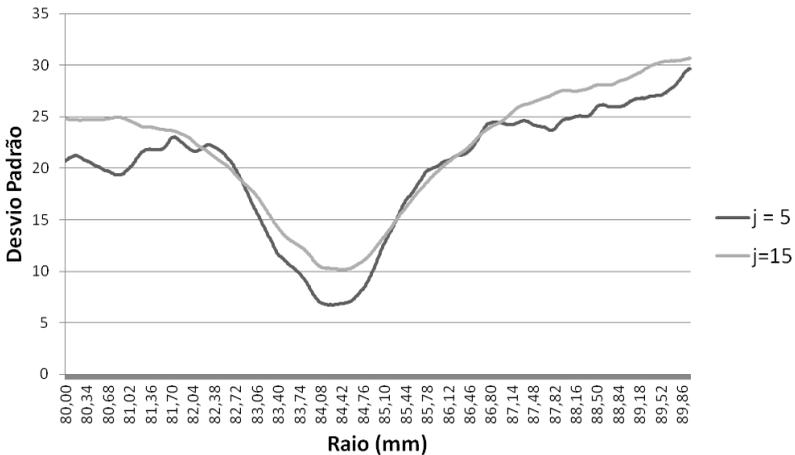
Fonte: Autor.

Neste caso, o valor do raio r é aquele que resulta no menor desvio padrão médio. Um experimento foi realizado com um tubo de PVC, com 190 mm de diâmetro, usando uma textura artificial heterogênea (Figura 43) para observar o comportamento do desvio padrão médio entre o raio

mínimo e máximo para alguns pontos $P=P(z,\theta)$ usando um sistema trinocular. Para produzir a textura artificial foi colada no interior do tubo uma folha de papel branca com padrões de pontos em tons de cinza aleatórios.

Pode-se observar na figura 44 a existência de um ponto de mínimo próximo ao raio nominal (85 mm), porém não é muito bem definido, uma vez que o vale formado tem grande extensão, variando entre 84 e 85 mm, o que dificulta a identificação precisa do ponto de mínimo.

Figura 44 - Gráfico mostrando o comportamento o desvio padrão médio com a variação do raio do ponto projetado. Nota-se um ponto de mínimo próximo ao raio nominal, porém eles não coincidem. As duas linhas correspondem a simulações com dois diferentes tamanhos de cascas cilíndricas de interrogação (j).



Fonte: Autor.

5.2.2 Coeficiente de Correlação Tripla

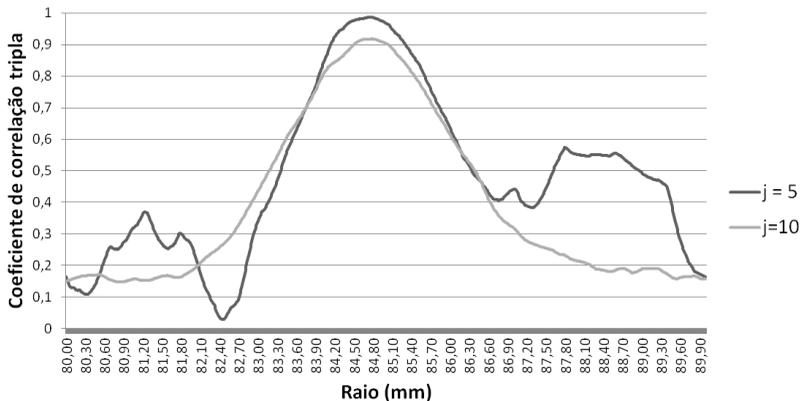
O coeficiente de correlação tripla ($\hat{\rho}_T$) (LIRA, 2009) refere-se à correlação entre três conjuntos de variáveis (y , x_1 e x_2), onde duas são variáveis independentes. Como o problema é simétrico e a textura observada é a mesma para todas as câmeras, não faz diferença a escolha de qual câmera é considerada dependente. Neste caso, a câmera B foi considerada a variável dependente.

O coeficiente de correlação tripla relaciona os diferentes coeficientes de correlação linear das variáveis conforme a equação (16). Este coeficiente varia entre (0;1).

$$\hat{\rho}_T = \sqrt{\frac{\hat{\rho}_{x_1y}^2 + \hat{\rho}_{x_2y}^2 - 2\hat{\rho}_{x_1y}\hat{\rho}_{x_2y}\hat{\rho}_{x_1x_2}}{1 - \hat{\rho}_{x_1x_2}^2}} \quad (16)$$

Onde $\hat{\rho}_{iw}$ se refere ao coeficiente de correlação linear entre as matrizes obtidas de duas câmeras, aqui genericamente referidas como i e w (equação 13). No cálculo da correlação linear é realizada a subtração do nível de intensidade médio para cada imagem. O critério de convergência é o valor do raio r da casca cilíndrica de interrogação que resulta no valor máximo de $\hat{\rho}_T$. Foi realizado um experimento com as mesmas imagens do item 5.2.1, e o resultado para um ponto ilustra-se na figura 45.

Figura 45 - Gráfico mostrando o comportamento do coeficiente de correlação tripla com a variação do raio do ponto projetado. Observa-se claramente um ponto de máximo destacado próximo ao valor nominal de raio do tubo. As duas linhas correspondem a simulações com dois diferentes tamanhos de cascas cilíndricas de interrogação (j)



Fonte: Autor.

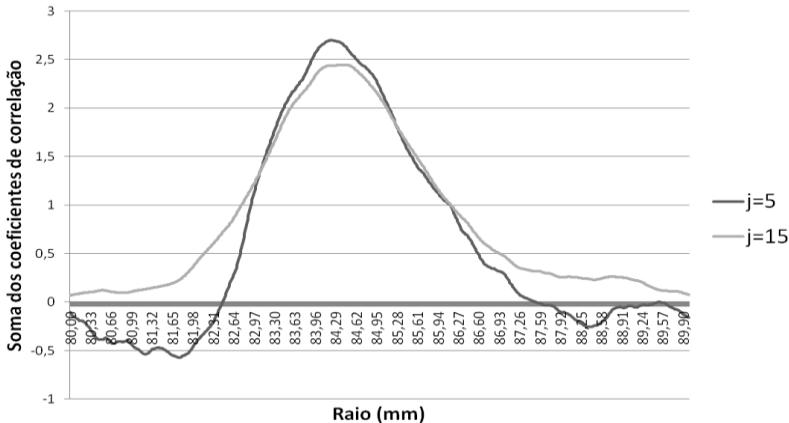
5.2.3 Soma dos Coeficientes de Correlação Linear

O terceiro caminho envolve a soma aritmética dos três coeficientes de correlação linear (ρ_S) calculados para as matrizes tomadas duas a duas (equação 17), após a subtração do nível médio.

Com isso, o valor deste coeficiente varia entre (-3;+3). Também aqui o critério de convergência é o valor do raio da casca cilíndrica de interrogação que resulta no valor máximo. Resultados da aplicação deste coeficiente, nas mesmas condições dos itens 5.2.1 e 5.2.2 estão na figura 46.

$$\rho_S = \hat{\rho}_{x_1x_2} + \hat{\rho}_{x_1y} + \hat{\rho}_{x_2y} \quad (17)$$

Figura 46 - Gráfico mostrando o comportamento da soma dos coeficientes de correlação linear com a variação do raio do ponto projetado. Há um ponto de máximo destacado próximo ao raio nominal do tubo. As duas linhas correspondem a simulações com dois diferentes tamanhos de cascas cilíndricas de interrogação (j)



Fonte: Autor.

5.2.4 Definição do Critério de Correspondência

Os experimentos realizados no tubo com textura heterogênea (Figura 44/Figura 45/Figura 46) mostram o comportamento dos três critérios de correspondência com a variação do raio. Esses experimentos foram realizados para vários pontos do tubo de PVC com diâmetro de 190 mm, obtendo sempre resultados similares. Para validação, foram repetidos os mesmos experimentos em um tubo metálico com textura natural e levemente oxidada (Figura 47), onde os resultados se mostraram comparáveis.

Desta forma, optou-se pela correlação tripla com função de correspondência entre as três imagens, levando em conta principalmente o fato de ter o pico de correlação mais bem definido.

Para deixar o algoritmo mais robusto foi implementado um artifício que exclui correspondências que resultam em baixos valores de correlação: o ponto só será considerado válido se o coeficiente de correlação tripla for maior que um limiar. Neste trabalho o valor limiar adotado foi 0,8.

Figura 47 - Imagem retirada do interior do tubo com textura real.



Fonte: Autor.

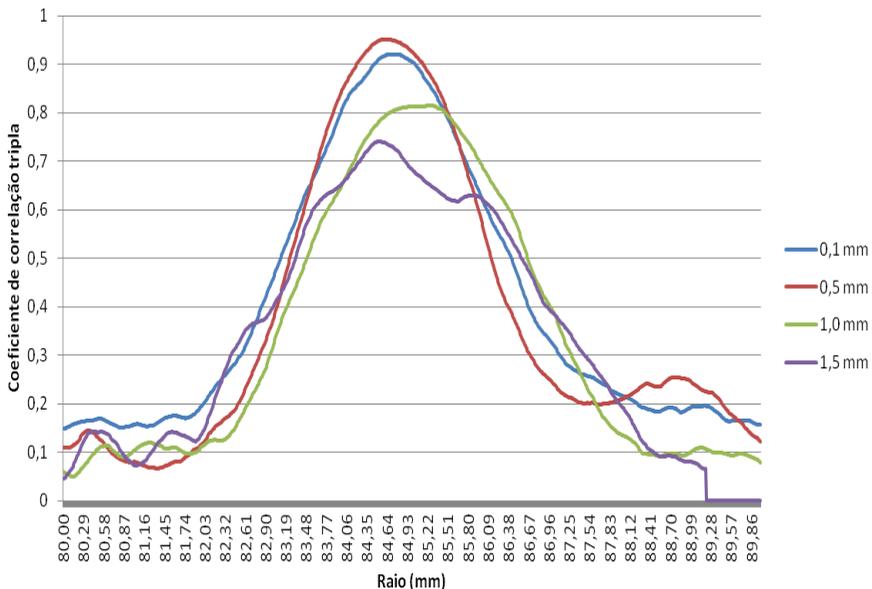
5.3 DEFINIÇÃO DE $\Delta\theta$, ΔZ e j

As variações $\Delta\theta$ e ΔZ foram definidas a partir de experimentos, transformando o valor de $\Delta\theta$ em distância na parede do duto. Para obter uma malha com elementos quadrados, o valor de $\Delta\theta$ deve ser igual a ΔZ . Não há motivos que justifiquem utilizar uma casca cilíndrica de interrogação não quadrada, assim, adota-se $\Delta\theta = \Delta Z$ e o número de elementos (j) é o mesmo nas duas direções.

Os valores ótimos de $\Delta\theta$ e ΔZ dependem de vários fatores, principalmente a heterogeneidade da superfície e do volume de medição. Ter valores muito pequenos de $\Delta\theta$ e ΔZ podem levar dificuldades no algoritmo de correspondência através do coeficiente de correlação tripla, chegando até mesmo a não obter resultados confiáveis. Na figura 48 pode-se observar o comportamento do coeficiente de correlação tripla para diferentes $\Delta\theta$. Para essa curva, foi selecionado um ponto na malha cilíndrica, e definido que $\Delta\theta$ possui valor igual a ΔZ , e que a janela de busca tem 15 x 15 elementos. O valor do coeficiente de correlação foi

calculado para cada raio. O valor máximo do coeficiente de correlação tripla define o raio correspondente ao ponto. Para valores pequenos de $\Delta\theta$ e ΔZ , a estimativa do pico máximo fica prejudicada. Optou-se pela utilização do valor igual a 0,5 mm, onde conseguiu-se experimentalmente uma boa definição do pico de máxima correlação, tanto para o tubo de PVC (Figura 43) quanto para o tubo real (Figura 47).

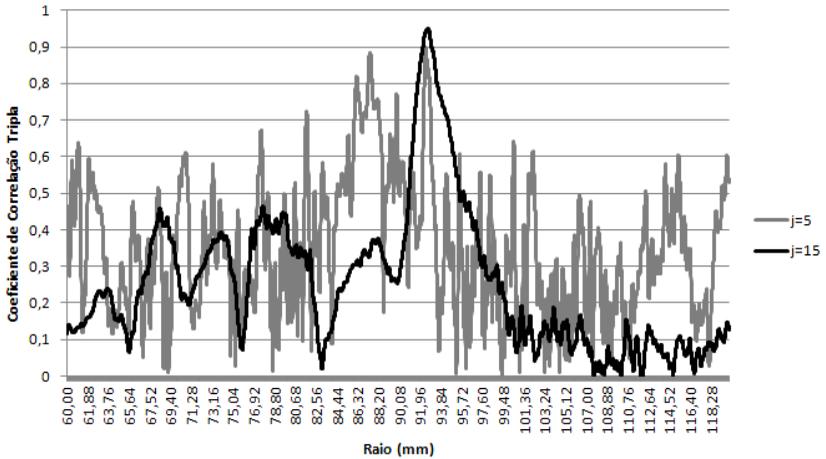
Figura 48 - Gráfico mostrando a relação entre $\Delta\theta$ e ΔZ e a determinação do pico de máximo do coeficiente de correlação tripla. A variação angular foi transformada em comprimento do arco na superfície do tubo.



Fonte: Autor

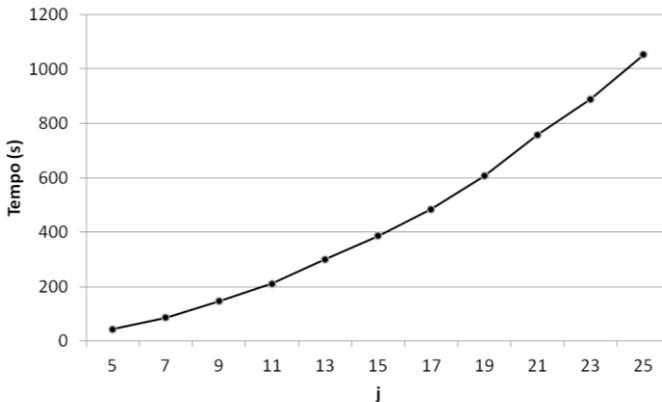
A definição de j , o número de elementos que constituirá o lado da casca cilíndrica de interrogação, também tem importância no resultado de medição. Quando se escolhe poucos elementos, o pico de máxima correlação pode não ficar tão bem definido, como observado na figura 49. Por outro lado, escolher muitos elementos, o tempo de processamento do algoritmo aumenta, conforme pode ser notado na figura 50. É necessário lembrar que a casca cilíndrica funciona como um filtro passa-baixas na nuvem, de forma que um número muito grande de pontos pode prejudicar na definição do pico de correlação.

Figura 49 - Gráfico mostrando a relação entre o número j de elementos da aresta da janela em relação a determinação do pico de máxima correlação.



Fonte: Autor.

Figura 50 - Gráfico mostrando a relação entre o tamanho da janela da casca cilíndrica de busca (j) e o tempo de processamento para uma seção de $z - 360$ pares (z, θ) - com $\Delta R=0,01$ mm.



5.4 DEFINIÇÃO DO PONTO DE BUSCA P

Cada ponto P da malha cilíndrica define uma casca cilíndrica de interrogação que é função do raio de busca. Por isso, além dos parâmetros da casca cilíndrica de interrogação, há também os parâmetros de definição do ponto P. O ângulo θ e a altura z são variados

segundo passos regulares previamente definidos (resolução em θ e z). A busca no raio também possui limitações: um raio máximo, um raio mínimo e uma resolução ΔR . Essas características definem a quantidade de pontos a serem buscados, influenciam no tempo de processamento e na qualidade dos resultados obtidos. As resoluções em θ e z , e o ΔR , por exemplo, influenciam na forma com que os defeitos são notados na nuvem de pontos: resoluções muito grosseiras podem "esconder" defeitos em seu interior, ou até mesmo, não os caracterizar adequadamente.

A escolha do ponto P é repetida para cada outro ponto da superfície cilíndrica. Em síntese, o algoritmo de triangulação inversa adotado pode ser descrito nos passos contidos na figura 51.

5.5 CONCATENAÇÃO DE NUVEM DE PONTOS E HODOMETRIA

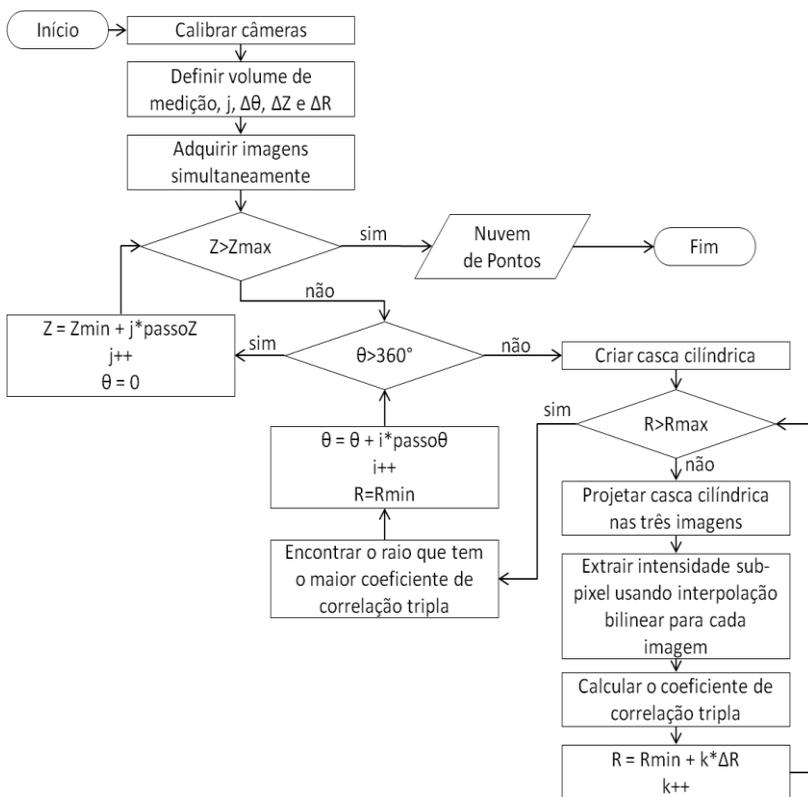
Objetivando a medição de trechos contínuos de dutos que superam o maior comprimento que pode ser medido a partir de um único posicionamento do sistema é necessário realizar a concatenação entre as nuvens de pontos medidas trecho a trecho. Cada posicionamento do sistema resulta na medição de um trecho axial de comprimento finito. Junto com as coordenadas 3D dos pontos que caracterizam a superfície interna do duto, o tom de cinza relativo a cada ponto também é armazenado.

Há vários algoritmos desenvolvidos para a concatenação de nuvens, incluindo cenários complexos como transformação de superfícies não-rígidas e pré-alinhamento. Nesta tese observa-se um cenário mais amigável: sabe-se que o protótipo irá deslocar-se no eixo axial de um trecho de tubo reto, onde pode haver também pequena rotação do sistema em torno do seu próprio eixo. A concatenação só será realizada em trechos retos, visto que o protótipo poderá passar por curvas, mas não as medirá. Há a possibilidade de haver amassamentos e outras alterações significativas na geometria, porém considera-se um máximo de 10 mm de desvio do raio original, o que não interfere significativamente no procedimento de concatenação.

A hodometria por imagem é muito utilizada em sistemas robóticos (OLSON et al, 2003; CHENG et al, 2006). A utilização em robôs de inspeção é relativamente nova e pouco explorada em sistemas comerciais de inspeção. Mesmo assim, sua utilização é promissora, visto que a maioria dos robôs de inspeção utiliza um hodômetro (translação) e um inclinômetro (rotação), ou até mesmo sistemas inerciais para

determinar sua posição em relação ao duto. Comumente o hodômetro mecânico é utilizado para tal fim, sendo disposto numa roda auxiliar, para medir a translação do sistema a partir de apenas um ponto de contato.

Figura 51 - Fluxograma apresentando os processos envolvidos no algoritmo de definição da nuvem de pontos. Fonte:



Fonte: Autor.

A substituição de um sistema eletrônico composto por um hodômetro, ou mais sensores, pela análise das imagens adquiridas por uma câmera é bem vinda, principalmente considerando que a informação de translação e rotação provém dos dados captados por toda a imagem, ou seja, utilizando os dados de toda a circunferência do duto.

Na literatura encontram-se muitos algoritmos destinados a esse fim, a maioria baseado na teoria de Fluxo Óptico (CHENG et al, 2006;

COMPORT, MALIE e RIVES, 2010). Para a solução da hodometria por imagem neste trabalho é utilizado correlação entre as nuvens de pontos com as restrições cabíveis ao sistema proposto: movimento axial ao longo do duto com luminosidade não uniforme e alguma possível pequena rotação.

No caso do protótipo trinocular foi possível elaborar um algoritmo com restrições de movimento e iluminação. A restrição de movimento surge a partir da suposição que as câmeras sempre se deslocarão paralelas ao eixo do duto. A restrição de iluminação surge do fato de se utilizar uma iluminação homogênea e pontual. Sabe-se também que nesse caso, o movimento da cena é causado simplesmente pelo movimento da câmera – nenhum objeto da cena irá se mover.

O ponto de partida são dois trechos de nuvens de pontos, contendo valores de tom de cinza para cada ponto e deslocados axialmente de um valor relativamente grande e desconhecido e com uma eventual pequena rotação. A primeira etapa do cálculo é a busca por pontos semelhantes nas duas nuvens. Essa busca é realizada partindo de um ponto arbitrário na nuvem A, onde delimita-se uma janela com j pontos de lado, criando uma matriz para a comparação. Para cada ponto da nuvem B é criada a mesma matriz com j^2 elementos, e o coeficiente de correlação linear de Pearson entre essas duas matrizes é calculado. Os pontos cujas as matrizes apresentarem coeficiente de correlação próximos a 1 são considerados pontos pares - o mesmo ponto nas duas nuvens.

Idealmente, o método deveria encontrar pares para todos os pontos das duas nuvens, porém, com as alterações de iluminação entre as nuvens e o deslocamento entre elas, chega-se a conclusão que é necessário um critério de escolha. Neste caso, apenas pares cujo coeficiente de correlação tenha valor maior que 0,9 serão considerados no cálculo.

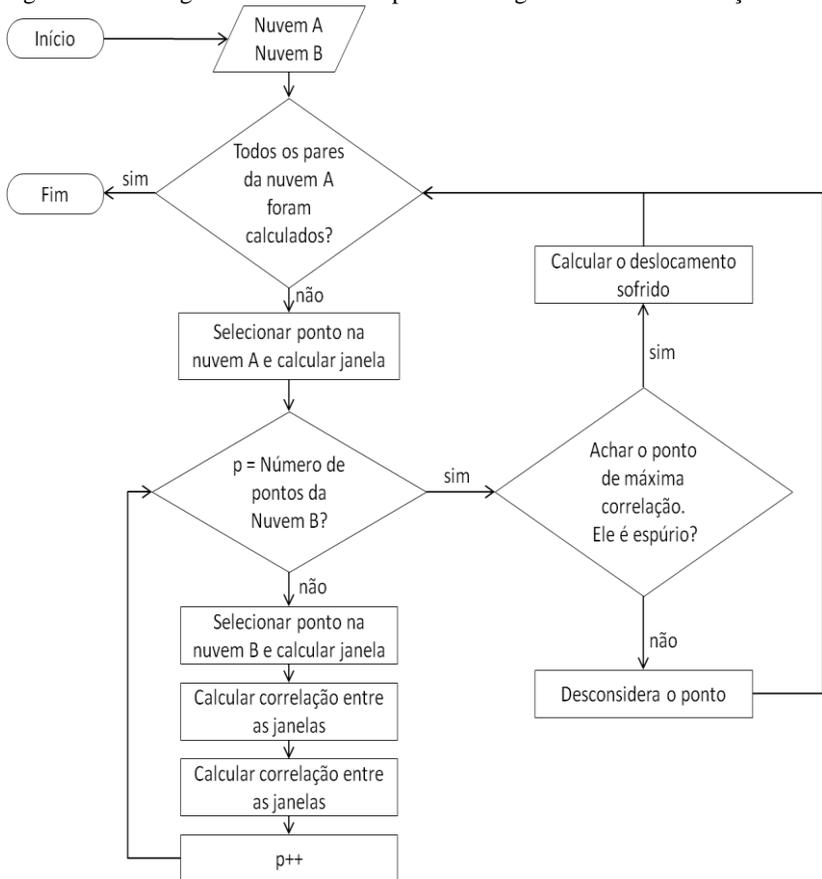
Após o encontro das coordenadas pares, são utilizados as coordenadas conhecidas de cada ponto (r, θ, z) para calcular o deslocamento e a rotação sofrido pela nuvem B em relação a nuvem A. Dessa forma, se considerarmos o par de pontos $P_A = P(r_A, \theta_A, z_A)$ e $P_B = P(r_B, \theta_B, z_B)$, o deslocamento axial (z_D) e a rotação (θ_D) são dadas por:

$$z_D = z_B - z_A \quad (18)$$

$$\theta_D = \theta_B - \theta_A \quad (19)$$

Pode-se visualizar o algoritmo desenvolvido na figura 52.

Figura 52 - Fluxograma mostrando os passos do algoritmo de concatenação.



Fonte: Autor.

Após o cálculo, tendo as distâncias axial e angular entre as nuvens é possível fazer a concatenação das nuvens. A concatenação, neste caso, constitui a simples fusão das nuvens. Os pontos da nuvem B são subtraídos por z_D e θ_D em suas coordenadas. O valor do tom de cinza do ponto para cada nuvem é normalizado, e nos pontos pares, são utilizados os valores médios entre os dois pontos. É importante notar que haverá um erro acumulado na hodometria.

6 SISTEMA DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO

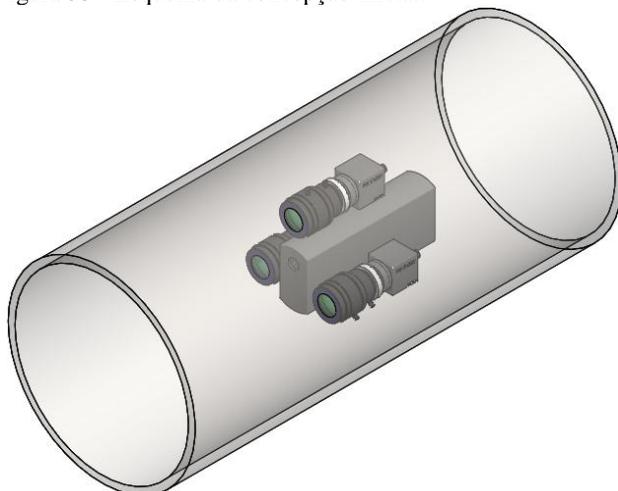
Levando em conta tanto as informações obtidas com a busca de equipamentos existentes para inspeção interna de dutos assim como as características desejáveis para um sistema com tal função, foi concebido um sistema para realizar a hometria, medição da geometria interna e aquisição da textura de dutos utilizando três câmeras e iluminação não estruturada baseado nos princípios descritos no capítulo 5.

6.1 HARDWARE

O sistema é composto por um conjunto de três câmeras, dispostas no formato de um triângulo equilátero, junto com um sistema de iluminação localizado no baricentro deste triângulo. O sistema de iluminação é uma fonte de luz LED homogênea e branca.

A concepção inicial é mostrada na figura 53. A redundância decorrente do uso das imagens de três câmeras cria condições favoráveis para lidar com as oclusões e viabiliza o mapeamento da geometria e textura com melhor desempenho. Entre os desafios para execução desta proposta está a otimização do sistema de iluminação, a estratégia, qualidade e velocidade dos algoritmos de correspondência, e a hometria por imagem.

Figura 53 - Esquema da concepção inicial.



Fonte: Autor

A utilização de três câmeras e um sistema de iluminação traz aspectos positivos e também desafios. Como aspectos positivos são destacados:

- a) Configuração axialmente compacta: a composição das três câmeras e o sistema de iluminação resultará em um conjunto compacto quando se considera a dimensão paralela ao eixo do duto. Esta característica favorece a capacidade do sistema em fazer curvas além de viabilizar a instalação do sistema em um veículo robotizado ou na extremidade de outro dispositivo de inspeção já existente.
- b) Redundância: imagens de duas câmeras constituem o mínimo necessário para medir a forma 3D. O uso de três câmeras trás redundância de dados que, além de potencialmente melhorar a desempenho do sistema de medição de formas 3D, da textura e da posição axial, também o torna potencialmente mais robusto para conviver com oclusões.
- c) Escalabilidade: a mesma configuração básica pode ser utilizada em dutos de diferentes diâmetros. Em alguns casos, poderá haver o afastamento entre as câmeras e uma nova calibração do sistema de medição.
- d) Hodometria: a redundância de imagens e o fato da geometria interna do duto ser estável no tempo tornam possível a determinação da posição axial e rotações.

Dentre os desafios a serem vencidos está a disparidade limitada, ou seja, a pequena separação espacial entre as câmeras, principalmente em tubos de diâmetros menores, limita o desempenho do sistema para medir formas 3D. A utilização inteligente de dados redundantes deve compensar esta característica.

Se considerada a utilização de três câmeras *Point Grey Flea 2*, o sistema poderá fazer curvas acima de 500 mm de raio num duto de 200 mm (8") de diâmetro, como pode-se observar na figura 54, o que atende, com folga, as demandas de dutos usados na indústria do petróleo e gás.

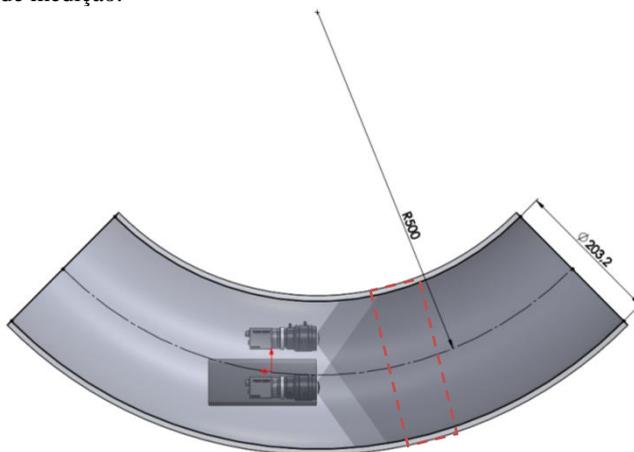
A comunicação será feita por cabo umbilical e o processamento das imagens em computador externo.

6.1.1 Definição do Posicionamento das Câmeras

Para analisar a viabilidade e otimizar a disposição das três câmeras foi utilizado um software de simulação que gera imagens que seriam vistas por uma câmera posicionada dentro de um tubo fictício

com textura artificial. Foi usado também outro software, de projeção, que utiliza as múltiplas imagens e parâmetros de câmera do primeiro software e projeta pontos, linhas ou círculos contidos num sistema de coordenadas global nas imagens, simulando a posição dessa geometria nas imagens.

Figura 54 – Visão lateral com o sistema passando por uma curva com raio de 500 mm num duto de 203,2 mm (8”). A região pontilhada constitui o volume de medição.



Fonte: Autor

Para auxiliar na definição do hardware foi construído um software de simulação das imagens das câmeras usando C# no Visual Studio 2013. O software de simulação de imagens é uma ferramenta onde é possível selecionar uma imagem digital e mapeá-la como textura na parede interior de um cilindro e observá-la a partir de uma câmera livremente posicionada. Sendo assim, os parâmetros raio do tubo, posição inicial e final do tubo, são selecionados em milímetros para a delimitação do trecho de interesse no tubo. O tamanho do pixel, posição do centro da pupila, distância focal e resolução são alterados para simular cada câmera que será avaliada para utilização no protótipo.

Em conjunto, foi desenvolvido em C# um software de projeção, que utiliza as imagens e parâmetros do software de simulação. Utilizando as matrizes de calibração da câmera (parâmetros intrínsecos e extrínsecos) é possível calcular as projeções de um mesmo ponto no espaço 3D em cada uma das imagens. Com estas ferramentas de análise

foi possível realizar ensaios que definiram alguns dos parâmetros do sistema de medição a ser desenvolvido.

O estudo inicial utilizou câmeras e lentes que estavam disponíveis e que aparentemente atendiam às necessidades iniciais do protótipo. A câmera utilizada é a *Point Grey Flea 2*, colorida, modelo FL2G-13S2C-C de 1,3 MP, com sensor *Sony ICX445 CCD* de 1/3", com pixel de 3,75 μm , *global shutter* e resolução de 1288x964 pixels a 30 FPS.(Point Grey, 2013)

A lente considerada é a *Theia MY125M*, com distância focal de 1,28 mm, com montagem tipo C, F/1,8, com resolução acima de cinco megapixels e menos de 3% de distorção. (Theia Tech, 2013)

Desta forma, chega-se ao conjunto de valores a serem utilizados na simulação, conforme a tabela 2. Os parâmetros em relação ao tubo definem o sistema de coordenadas global: o eixo z é o eixo do tubo. O raio do tubo é simplesmente a metade do diâmetro definido do tubo a ser medido de 203,2 mm (8"). As coordenadas do centro da pupila (X, Y, Z) são definidas em milímetros com base no posicionamento das câmeras em relação ao sistema de coordenadas global e formando um triângulo equilátero.

Tabela 2 – Parâmetros e valores utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Raio do Tubo	101,6 mm
Início do Tubo	0 mm
Final do Tubo	300 mm
Distância Focal	1,28 mm
Tamanho do Pixel	0,00375 mm
Resolução	1024x1024
Centro da Pupila	(X,Y,Z) mm

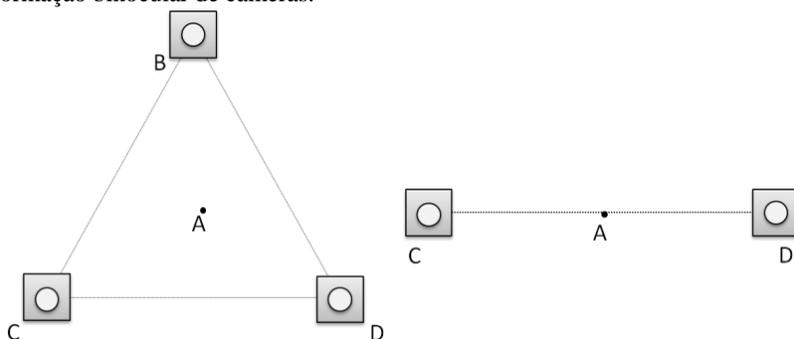
Fonte: Autor

Como textura interna do cilindro, foram utilizadas imagens com gradações de cinza linearmente variáveis e com disposições horizontais, verticais e anguladas. Estas texturas artificiais foram úteis para a determinação de alguns parâmetros do sistema de medição.

Na sequência foi realizada uma análise comparativa entre o inverso da sensibilidade dos sistemas binocular e trinocular (Figura 55). O inverso da sensibilidade é aqui entendido como a razão entre o comprimento em milímetros de um segmento situado sobre a linha diametral do tubo e o correspondente tamanho em pixels do mesmo segmento projetado na imagem. Em outras palavras, é a relação

milímetro por pixel e depende da distância ao longo de z onde se encontra da câmera. O valor do inverso da sensibilidade deve ser adequado ao mensurando. No caso, considera-se que para a detecção de *pits* de corrosão o valor adequado é de, no máximo, 1 mm/pixel. Acima disto, pode haver perda significativa da resolução lateral na caracterização da geometria da superfície, impossibilitando a detecção de detalhes menores.

Figura 55 - À esquerda, proposta de formação trinocular de câmeras. À direita, formação binocular de câmeras.



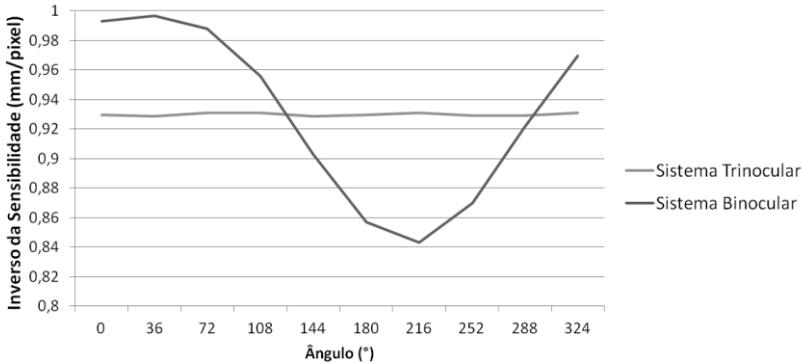
Fonte: Autor

Para um determinado z e ângulo das câmeras em relação ao eixo z , foi projetada uma reta, na direção radial, de 10 mm nas imagens. A distância em pixels do início ao fim da reta foi calculada para cada câmera e o tamanho em milímetros foi dividido pela quantidade de pixels. O inverso da sensibilidade médio foi calculado pela média dos valores para as três câmeras. Pode-se observar na figura 56, que o inverso da sensibilidade para um sistema trinocular é mais constante do que para um sistema binocular ao longo de uma circunferência da superfície cilíndrica. Variando a coordenada z obteve-se o mesmo comportamento, alterando apenas os valores numéricos.

A partir disso, assume-se que o posicionamento das três câmeras será nos vértices de um triângulo equilátero. Para estimar a distância entre as câmeras, calcula-se o maior e o menor lado possível. O maior é o lado do triângulo inscrito na circunferência com raio compatível com o duto a ser medido. O duto possui diâmetro igual a 200 mm. A câmera utilizada possui aresta de 30 mm (Point Grey, 2013). Dessa forma, desprezando espaço para o sistema mecânico do protótipo, ou seja, considerando somente o triângulo formado pelas câmeras e o tubo,

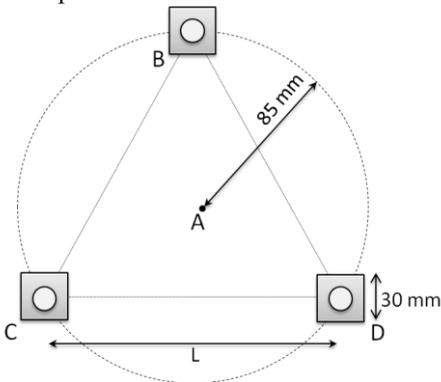
chega-se ao raio máximo de 85 mm. A equação (20) determina como o tamanho máximo do lado cerca de 147 mm.

Figura 56 - Comparação entre o inverso da sensibilidade de um sistema trinocular e um sistema binocular em função do ângulo medido ao longo de uma circunferência definida de uma seção transversal da superfície cilíndrica.



Fonte: Autor.

Figura 57 - Esquema mostrando o posicionamento das câmeras, B, C e D, e outros parâmetros do sistema trinocular.



Fonte: Autor

$$L = R\sqrt{3} \quad (20)$$

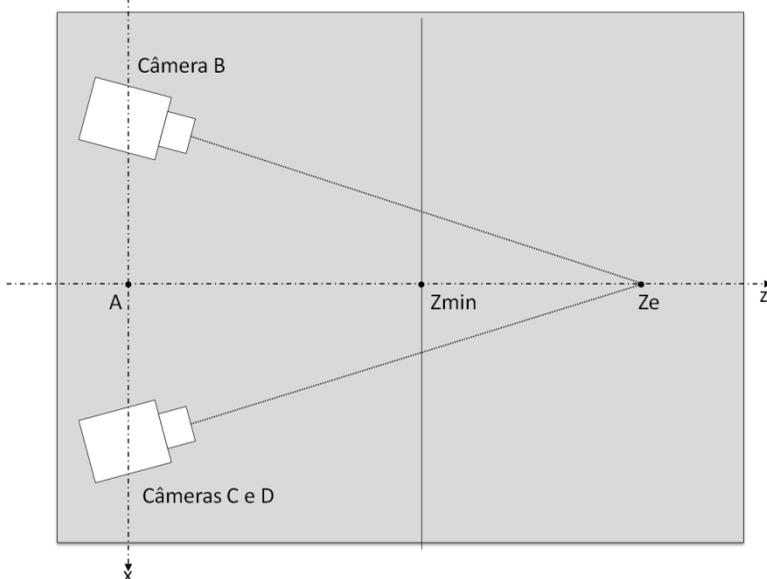
No limite inferior, o menor triângulo equilátero formado pelas três câmeras é definido como a barreira física entre as três câmeras, ou seja, a menor distância em que é possível colocar as câmeras sem haver superposição entre elas. Dessa forma, considerando o centro da pupila

como centro da câmera física, que tem 30 mm de aresta, o lado do menor triângulo também é 30 mm. Na figura 57 observa-se um esquema mostrando as câmeras (B, C e D) em relação ao centro do duto (A). O triângulo, de lado L , inscrito no círculo define o posicionamento delas.

Utilizando o simulador, foi possível determinar a menor distância do sistema trinocular na qual é possível visualizar toda a borda do duto. Para isso, usando o software de projeção, foi projetada uma circunferência nas imagens. O software parte de um sistema de coordenadas global, onde estão posicionadas as câmeras. Um círculo teórico é definido nessas coordenadas e projetado nas imagens. Dessa forma, determina-se a menor distância entre o círculo e o conjunto de câmeras onde é possível ver todo o perímetro do círculo em todas as imagens - ou seja, a mínima distância de trabalho (Z_{min}). Essa distância altera-se com diferentes L e diferentes ângulos das câmeras (determinados por Z_e : que define a inclinação das câmeras em relação ao eixo do duto).

A figura 58 mostra, numa visão lateral, o centro do sistema de coordenadas global (ponto A) e os pontos Z_{min} e Z_e em relação à posição das câmeras.

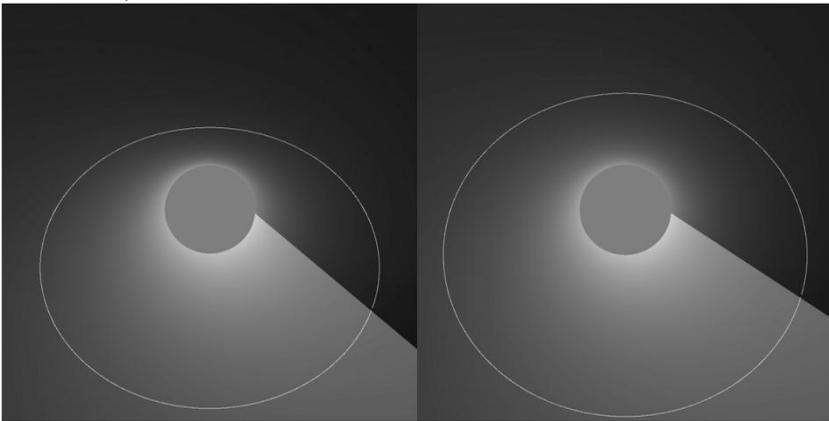
Figura 58 - Vista lateral do sistema num duto. O ponto A mostra o centro do sistema de coordenadas, Z_e e Z_{min} .



Fonte: Autor.

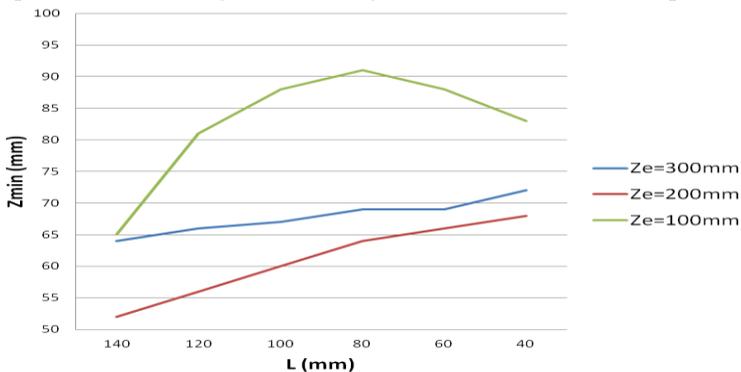
Na figura 59 está a visão da câmera B para a distância mínima (Z_{min}) onde é possível ver todo o círculo projetado para diferentes L . O resultado da figura 60 mostra a relação entre a distância mínima (Z_{min}), e diferentes tamanhos do lado (L) do triângulo para diferentes ângulos, caracterizados pela análise de Z_e . A definição do Z_e mostra a inclinação da câmeras em relação ao eixo do duto, visto que Z_e é o ponto no eixo para qual todas as câmeras estão apontadas.

Figura 59 - A partir da visão da câmera B na simulação computacional do sistema trinocular, as imagens mostram um círculo projetado na menor distância onde é possível ver toda a borda do círculo, para $L = 140$ mm, à esquerda e $L = 110$ mm, à direita.



Fonte: Autor.

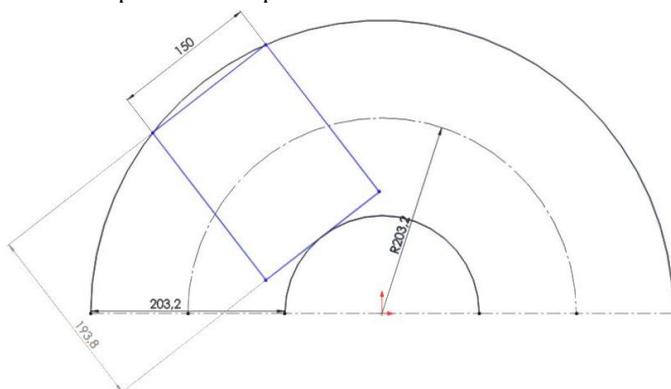
Figura 60 - Mínima distância de trabalho como função do lado do triângulo equilátero (L) e do ângulo de convergência das câmeras (definido por Z_e).



Fonte: Autor.

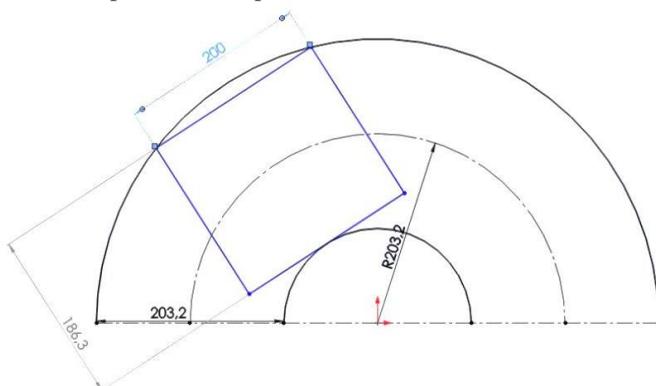
Para a determinação da distância L entre as câmeras foi ainda considerado que o sistema deve ser capaz de passar por um trecho curvo de duto com raio igual a um diâmetro ($1D$). Utilizando a lente com maior comprimento físico disponível para testes como parâmetro, estipulou-se que o sistema deverá ter entre 150 e 200 mm de comprimento na direção do eixo do tubo. Neste caso, para um tubo com diâmetro 203,2mm (8") projetou-se como diâmetro máximo do protótipo como um todo (incluindo sua carcaça), conforme a figura 61 e a figura 62.

Figura 61 – Determinação do diâmetro máximo para que um sistema com 150 mm de comprimento ultrapasse uma curva de $1D$.



Fonte: Autor

Figura 62 – Determinação do diâmetro máximo para que um sistema com 200 mm de comprimento ultrapasse uma curva de $1D$.



Fonte: Autor

Para estimar a distância máxima entre as câmeras levou-se em conta:

- A existência de defeitos de no máximo 10 mm de altura no interior da curva;
- O espaçamento para rodas e carcaça do protótipo, cerca de 50 mm;
- O comprimento do sistema ser igual à 200 mm;

Desta forma, o diâmetro do sistema óptico deve ser de, no máximo, 126,3 mm. Para o trabalho inicial foi utilizada 120 mm, o que gera uma distância (L) entre as câmeras, se posicionadas conforme um triângulo equilátero, de cerca de 100 mm. O Z_e foi definido em 200 mm, com um Z_{min} de 60 mm. A escolha do máximo valor é importante para haver a máxima disparidade entre as imagens.

6.1.2 Definição das Lentes

Para o protótipo foram testadas três lentes objetivas com distâncias focais distintas. Observou-se a necessidade de uma pequena distância focal visto que objetiva-se uma distância de operação relativamente pequena nas medições, cerca de 100 mm.

Para o teste inicial, utilizaram-se as seguintes lentes disponíveis no laboratório:

- *Theia* MY125M, $f=1,28$ mm;
- *Rainbow* L163VCS, $f=1,6-3,4$ mm;
- *Kowa* LM5JC1M, $f=5$ mm;

Foram adquiridas imagens com cada uma das lentes de um padrão de calibração posicionado dentro de um tubo de teste. Considerando apenas a qualidade das imagens, o ângulo de visão e o fato de haver duas lentes já disponíveis, optou-se pela escolha da lente *Theia* MY125M, $f=1,28$ mm.

6.1.3 Sistema de Iluminação

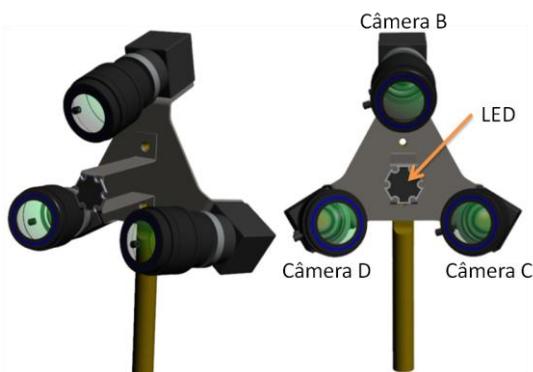
Para o sistema de iluminação havia a necessidade de uma iluminação homogênea, cor constante, baixo consumo, baixa geração de calor e com grande ângulo de abertura. A utilização de LEDs se encaixou nos requisitos e foram testados três tipos, todos na cor branca fria: LED de alta potência (*Power LED*) de 1W, LED piranha (*Super Flux*), e LED alto brilho. Optou-se pela utilização de apenas um LED de alta potência no centro do triângulo formado pelas câmeras, visto que há

boa homogeneidade em sua iluminação e cerca de 120° de ângulo de abertura.

6.1.4 Projeto mecânico final

Considerando todos os testes e simulações realizadas acima, o sistema de medição foi constituído por uma chapa de aço de 2 mm, com dobras para a fixação das câmeras e espaço para o LED centralizado, conforme a figura 63. Na figura 64 observa-se o protótipo construído.

Figura 63 - Projeto final do sistema de medição., em duas vistas.



Fonte: Autor.

Figura 64 - Fotografia mostrando o sistema de medição construído.



Fonte: Autor.

6.2 SOFTWARE

A reconstrução tridimensional a partir de múltiplas câmeras é uma área bem conhecida da visão computacional, inclusive medindo geometrias com baixas incertezas. A utilização de métodos com múltiplas câmeras e projeção (de padrões estruturados ou não) é nova para a medição da geometria interna de dutos por robôs de inspeção para distâncias médias e longas. Mesmo se considerados videoscópios, como o citado na seção 2.2, o comprimento de inspeção do sistema é de até 9,6 m.

Após montadas na base triangular, as câmeras são calibradas usando o mesmo padrão de calibração tipo tabuleiro de xadrez. A calibração das câmeras utiliza o bem conhecido método de Zhang (2000). Os parâmetros extrínsecos, intrínsecos e de distorção são calculados (BOUGUET, 2014) e armazenados num arquivo texto.

O software desenvolvido adquire as imagens das câmeras, as processa, e armazena os resultados obtidos na forma de uma tabela de coordenadas cilíndricas (r , θ , z , cor), mais favorável às medições de dutos. Essa tabela pode ser visualizada com inúmeros softwares, inclusive o *Matlab*.

6.2.1 Aquisição de imagens

A captura das imagens foi realizada utilizando bibliotecas disponibilizadas pelo fabricante das câmeras. Dessa forma, só foi necessário fazer uma interface onde fosse possível manter as configurações das três câmeras com valores conhecidos, e fazer a aquisição simultânea das três imagens.

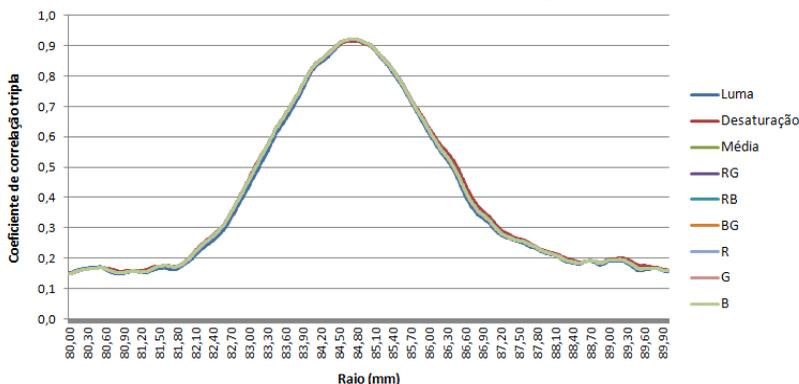
6.2.2 Pré-processamento

As imagens capturadas pelo software possuíam 24 bits e eram coloridas. Optou-se por utilizar câmeras coloridas em vista da adição de textura ao final da medição. Porém observou-se poucas cores no interior do duto, mesmo na caracterização de defeitos, não havendo impacto positivo no cálculo da correlação. Além disso, a utilização de imagens monocromáticas reduz o esforço computacional.

Com a informação em três canais, pode-se fazer a escolha quanto ao método de transformação das imagens de coloridas para escala de cinza. Para tanto, foram feitas simulações utilizando imagens de um duto, com textura heterogênea, retiradas pelo sistema, visando à

comparação da correlação para vários tipos de conversão, como pode ser observado na figura 65. Foram comparados sete diferentes formas clássicas de conversão de RGB para tom de cinza (GIMP, 2014; GONZALEZ; WOODS, 2010): desaturação; luma; média aritmética; média dois a dois $:(R+G)/2, (R+B)/2$ e $(G+B)/2$; e apenas um canal: R, G e B, como é possível ver nas figuras 66 e 67. O método utilizado foi o luma porque, embora não apresente grande diferença no cálculo da correlação, resulta numa imagem com mais contraste para a visão humana, melhorando a observação da textura na nuvem de pontos final.

Figura 65 - Gráfico comparando os resultados do coeficiente de correlação tripla para vários conversores clássico de imagens coloridas para escala de cinza.



Fonte: Autor.

Figura 66 - Imagem original, e sua conversão para escala de cinza usando os canais R (direita acima), B(esquerda abaixo) e G (direita abaixo).



Fonte: Autor.

Figura 67 - Conversão da imagem original usando luma (esquerda acima), média dos canais RGB (direita acima), médias dos canais R e G (esquerda abaixo), e desaturação (direita abaixo).



Fonte: Autor.

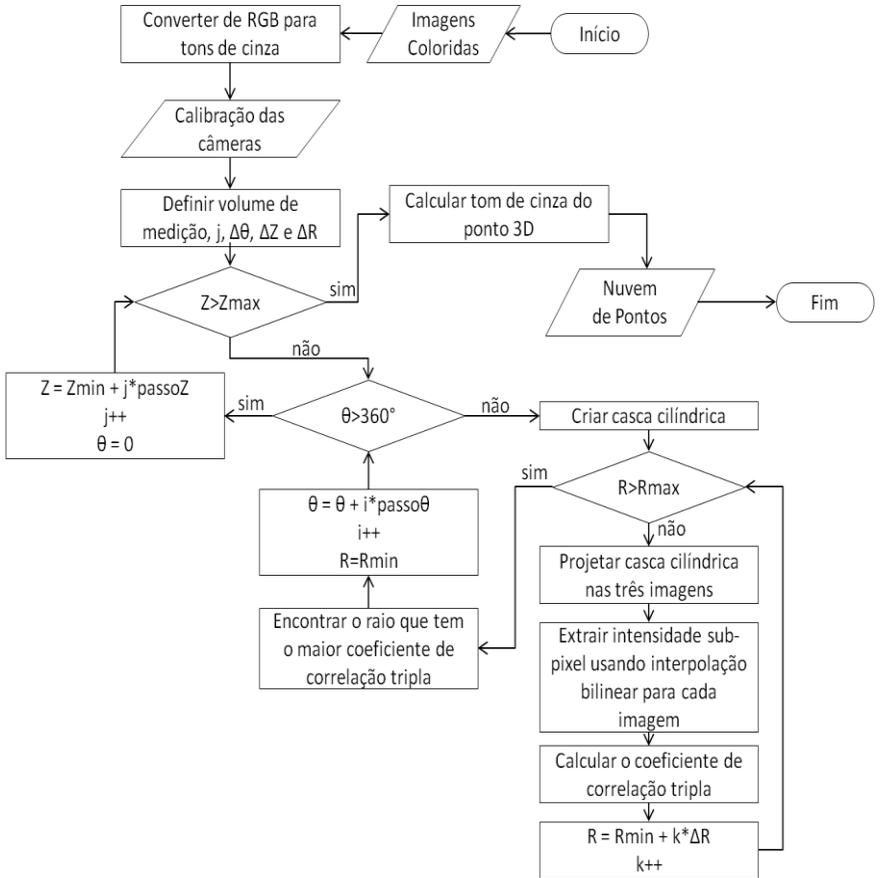
6.2.3 Processamento

O software desenvolvido utiliza como partida os arquivos de calibração de cada uma das câmeras. Como saída, o software salva um arquivo de texto com a nuvem de pontos de coordenadas cilíndricas e cartesianas. O arquivo em coordenadas cartesianas auxilia a visão na nuvem de pontos em softwares comerciais. Além das coordenadas, a nuvem também contém o tom de cinza de cada ponto. O tom é caracterizado como a média dos tons de cinza do ponto (r, θ, z) projetado em cada uma das três imagens.

Visto a necessidade de um alinhamento do eixo do tubo com o eixo do sistema de coordenadas cilíndricas, foi utilizado um algoritmo que calcula o eixo do cilindro medido. Esse algoritmo utiliza o Método de Mínimos Absolutos (MMA). Com essa informação é possível recalcular a nuvem de pontos com o sistema de coordenadas global corrigido.

Para o processamento de um trio de imagens (das câmeras B, C e D), os passos definidos no capítulo 5 são utilizados. Como o foco é o processamento das imagens após a sua aquisição, observar as etapas através de um fluxograma (Figura 68).

Figura 68 - Etapas do processamento das imagens lidas a partir de arquivo.



Fonte: Autor.

7 RESULTADOS

Após a definição das características e construção do protótipo, foram realizados ensaios para validar o método desenvolvido. Foram utilizados tubos com textura simulada e natural para validar as medições, assim como comparações com um sistema de medição de referência. Considerações sobre as incertezas de medição finalizam o capítulo.

7.1 MEDIÇÕES

7.1.1 Tubo de PVC com Textura Simulada

Os ensaios iniciais foram realizados em um tubo de PVC com 190 mm de diâmetro e 330 mm de comprimento cuja textura interna foi artificialmente intensificada pela colagem de papel branco no qual foi impresso um padrão aleatório de pontos em tons de cinza. Dessa forma, foi possível avaliar o desempenho do sistema desenvolvido utilizando textura com alta heterogeneidade.

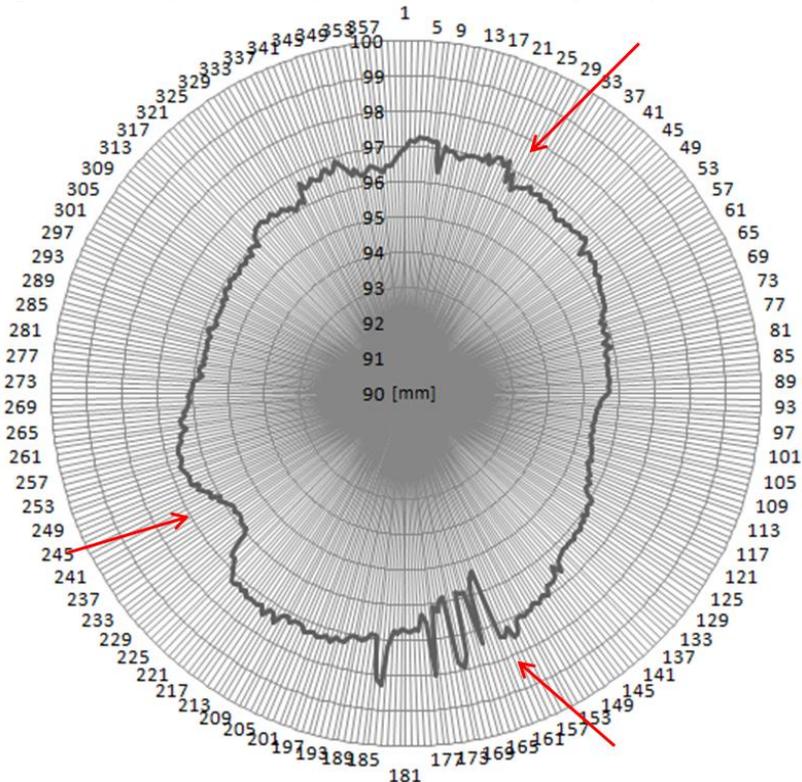
Figura 69 - Imagem do sistema trinocular posicionado no tubo de PCV com textura artificial. O eixo z da malha coincide com o eixo do tubo, tendo sentido positivo para fora do tubo.



Fonte: Autor.

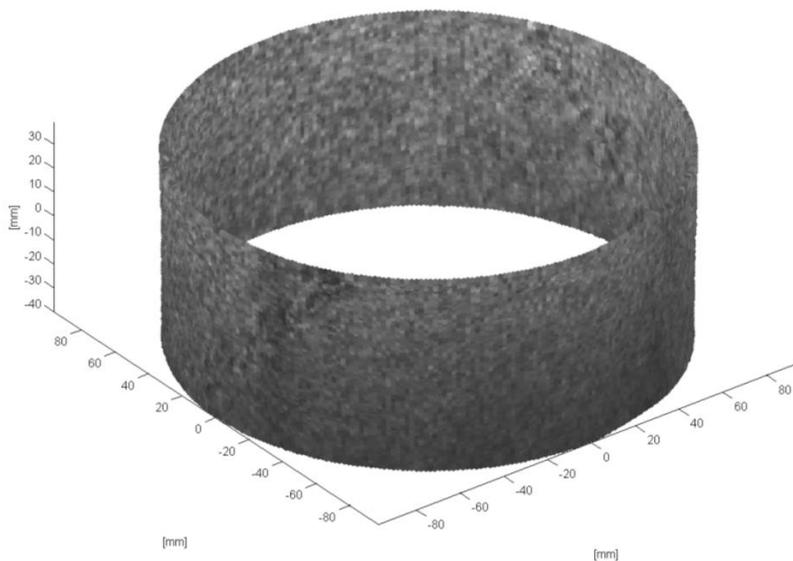
A medição utilizou os seguintes parâmetros: $\Delta\theta = 1^\circ$, $\Delta Z = 1$ mm, $\Delta R = 0,01$ mm e $j = 15$. Com a textura artificial foi possível medir, com apenas um posicionamento, um trecho de 80 mm de comprimento axial, região na qual o coeficiente de correlação tripla ficou com valor acima de 0,8. Na figura 70 é possível observar uma seção do tubo de PVC medida pelo sistema trinocular, onde é notável o limite entre as folhas coladas no seu interior (setas vermelhas). Na figura 71 tem-se a nuvem de pontos medida com textura, onde toda a seção de 80 mm medida é mostrada. A cor de cada ponto é definida como a média do tom de cinza projetado nas três imagens.

Figura 70 - Medição de uma seção do tubo de PVC num gráfico polar.



Fonte: Autor

Figura 71 - Nuvem de pontos do tubo de PVC

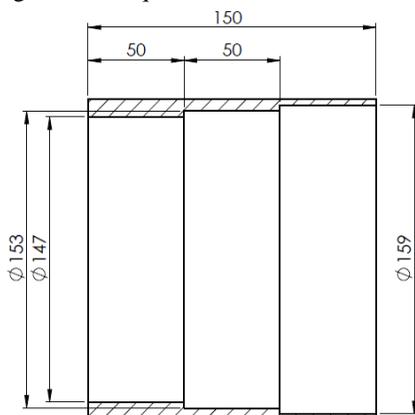


Fonte: Autor.

7.1.2 Tubo Escalonado

Para validação do protótipo foi realizada a medição de um tubo de alumínio escalonado com diâmetros internos nominais de 147, 153 e 159 mm, conforme a figura 72.

Figura 72 - Esquema mostrando as dimensões do tubo escalonado.



Fonte: Autor.

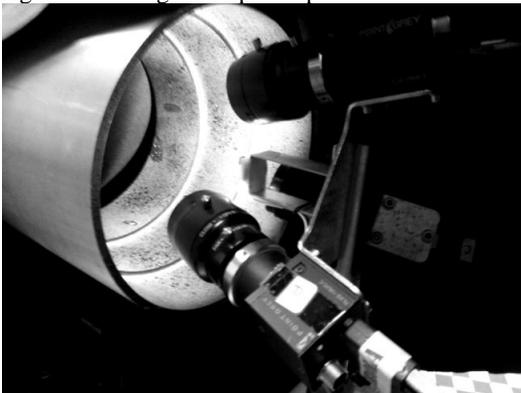
Essa medição foi comparada com a medição de referência de uma máquina de medir por coordenadas (MMC), que tem uma incerteza de medição não pior que 0,02 mm em todo o seu volume de medição. Em todas as medições tomou-se o cuidado de manter a temperatura da peça constante para evitar dilatação térmica.

Para a medição no protótipo trinocular foi necessário um preparo prévio da superfície interna do tubo, para que a mesma tivesse uma textura heterogênea. Esse processo foi realizado com pintura em tinta *spray* comum, utilizando as cores preta, cinza e branca. A textura resultante desse processo pode ser observada na figura 73.

O resultado da medição realizada com o protótipo trinocular resultou em um trecho com cerca de 50 mm de comprimento axial, sendo realizado dois posicionamentos para medição do interior do tubo. Os parâmetros utilizados foram $\Delta\theta = 1^\circ$, $\Delta Z = 1$ mm, $\Delta R = 0,01$ mm e $j = 15$.

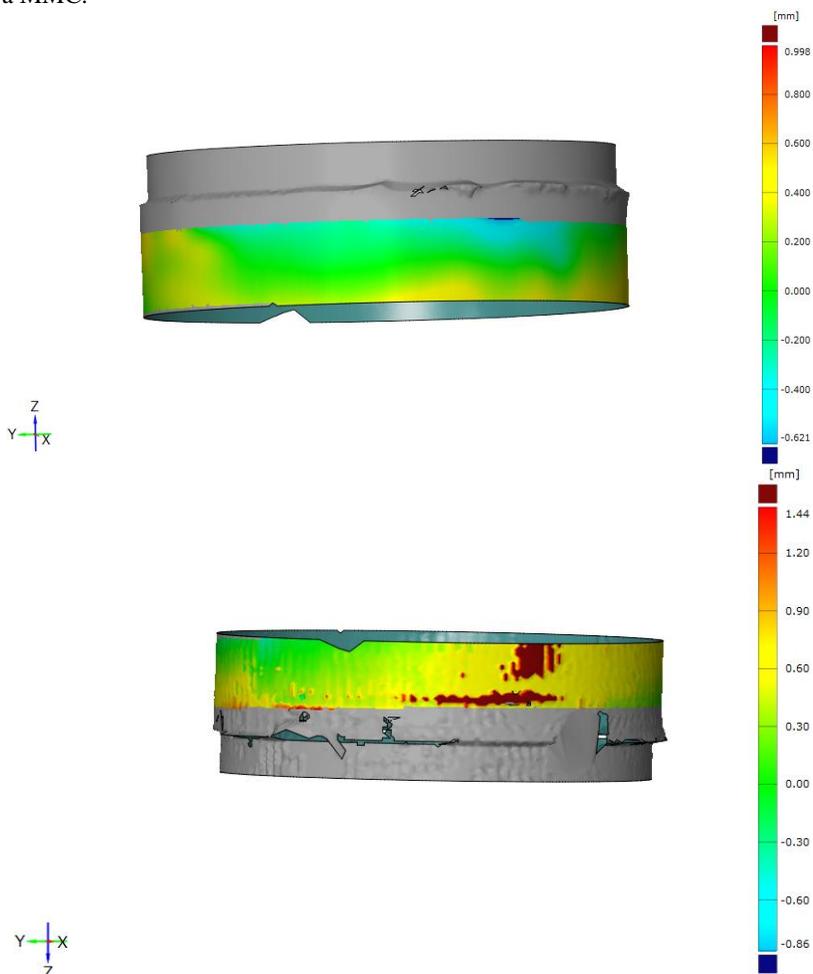
A peça, após a pintura, foi medida pela MMC, realizando a medição de uma seção em cada diâmetro do tubo, afastadas de 10 mm, 25 mm e 35 mm da respectiva borda de cada degrau com diâmetro constante. Dessa forma, foi possível realizar uma comparação ponto a ponto para uma seção de cada degrau, assim como criar uma malha de pontos a partir dos dados da MMC. O perfil medido pela MMC possui 360 pontos, assim como a malha calculada pelo sistema. Com essa malha foi possível gerar um mapa de erros da medição do sistema trinocular usando as medições da MMC como referência, utilizando o software GOM Inspect (GOM, 2014), que pode ser observada na figura 74.

Figura 73 - Imagem do protótipo no tubo escalonado.



Fonte: Autor.

Figura 74 - Superfícies de comparação entre a medição no protótipo trinocular e a MMC.



Fonte: Autor.

A medição da MMC mostrou que o maior diâmetro interno (159 mm) possuía melhor cilindricidade (calculada em 0,05 mm), sendo esse diâmetro utilizado para realizar uma comparação ponto a ponto e fazer um mapa de erros. A medição pelo sistema trinocular resultou numa nuvem contendo o degrau e um pequeno trecho do próximo degrau. Dessa forma, conhece-se a distância entre o degrau e as seções medidas pela MMC, sendo possível realizar uma comparação ponto a

ponto. O ponto inicial ($\theta = 0^\circ$) de cada seção foi alinhado por uma marcação realizada no tubo e levada em consideração nas duas medições.

Para a comparação foi calculada a diferença, ponto a ponto, entre a medição trinocular e a MMC. Após, foram calculados a média e o desvio padrão destas medições. O erro sistemático (erro médio) foi de 0,29 mm. A provável causa deste erro estaria no padrão de calibração do sistema, que foi construído no laboratório.

Além disso, foi calculado o desvio padrão das diferenças entre os pontos medidos pelos dois métodos, cujo valor encontrado foi 0,26 mm.

Na região da borda do degrau observou-se uma grande quantidade de pontos espúrios. Isso se deve em parte pela região do degrau não ter uma textura heterogênea, gerando inclusive pontos espúrios com grande correlação. Porém, o principal motivo para o mau resultado nesta região é a própria natureza do algoritmo, que usa uma casca de interrogação cilíndrica, com raio constante, o que se afasta muito da forma geométrica da região do degrau. Desta forma, observa-se a ineficiência do algoritmo em regiões com alteração abrupta do raio.

O segundo posicionamento do protótipo no interior do tubo mediu o degrau cujo diâmetro nominal é 153 mm e parte do degrau de 147 mm. Nos dois diâmetros a cilindricidade é maior que 0,1 mm. Para a comparação entre as medições dos três diâmetros, foi realizada a avaliação apenas da seção central (25 mm). Os valores estão relacionados na tabela 3.

É necessário salientar que a seção medida no diâmetro de 147 mm estava fora da região de medição. Para abrangê-la, foi necessária a medição de uma seção de 70 mm, diminuindo inclusive o limite da correlação para 0,6. Isso explica o desempenho ser inferior nesta região.

Tabela 3 - Relação dos diâmetros medidos junto com o valor do raio médio medido pelo sistema trinocular, o erro sistemático em relação à medição com a MMC, desvio padrão dos valores medidos e desvio padrão do erro sistemático.

Raio Nominal (mm)	Raio Médio (MMC) (mm)	Raio Médio (Trinocular) (mm)	Erro Sistemático (mm)	Desvio Padrão (mm)	Desv.Pad. do Erro Sistemático (mm)
73,50	73,46	74,04	0,58	1,35	1,35
76,50	76,49	76,82	0,33	0,28	0,27
79,50	79,48	79,77	0,29	0,21	0,26

Fonte: Autor.

7.1.3 Tubo com Textura Natural

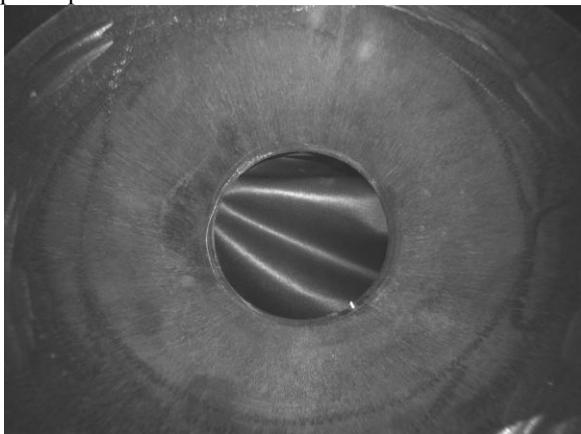
Para validar a utilização do protótipo em tubos com textura natural levemente oxidada, foi realizada a medição de um trecho de tubo de aço com diâmetro interno de 147 mm e comprimento 110 mm. (figura 75 e figura 76).

Figura 75 - Trecho de tubo de aço com 150 mm de diâmetro.



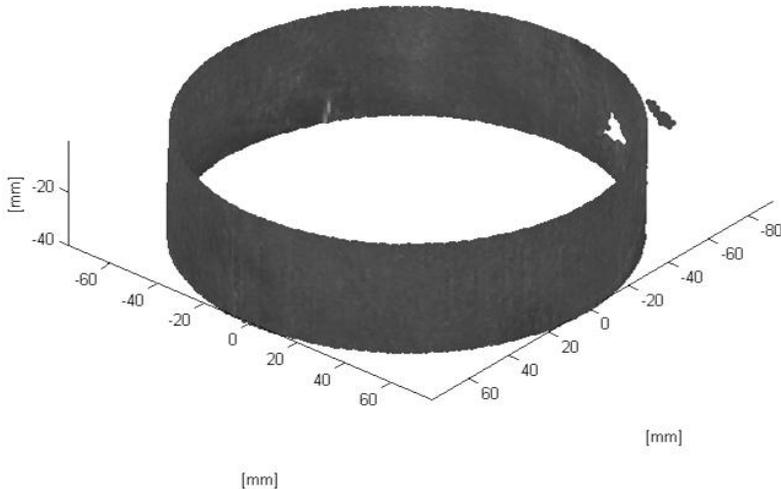
Fonte: Autor.

Figura 76 - Imagem interna do tubo de aço, captada por uma das câmeras do protótipo trinocular.



Fonte: Autor.

Figura 77 - Nuvem de pontos do duto real com textura.



Fonte: Autor.

Foi realizada a medição de um trecho de 50 mm de comprimento, onde é possível perceber uma pequena área com pontos espúrios na figura 77, causado por uma área de textura não heterogênea. Nos pontos espúrios a correlação é menor que 0,8.

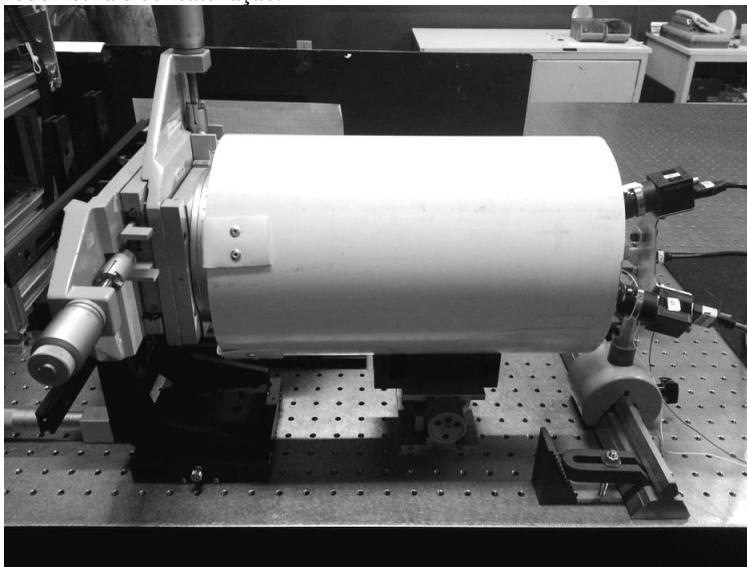
O raio médio deste trecho de duto havia sido calibrado anteriormente com a MMC, tendo valor de 77,23 mm. Com o protótipo trinocular, fez-se uma média de 20 seções com 360 pontos para chegar a um valor médio: 77,53 mm com desvio padrão de 0,21 mm da diferença ponto a ponto. Esses valores foram calculados em seções que não continham pontos espúrios.

Desta forma, a medição da textura natural mantém os mesmos resultados da textura simulada, mostrando um bom desempenho.

7.2 CONCATENAÇÃO E HODOMETRIA

Para a validação do algoritmo de hodometria desenvolvido foi montado um aparato experimental, onde foi possível realizar deslocamentos axiais e angulares de forma controlada. Foram utilizadas duas mesas, uma micrométrica linear e outra rotativa, para auxiliar no deslocamento do duto. O aparato experimental pode ser observado na figura 78.

Figura 78 - Aparato experimental montado para a validação do algoritmo de hodométria e concatenação.



Fonte: Autor

Inicialmente foi avaliada a performance do algoritmo para a translação axial do protótipo. Para cada deslocamento, foram adquiridas três imagens e calculada uma nuvem de pontos ($\Delta\theta = 1^\circ$, $\Delta Z = 1$ mm, $\Delta R = 0,01$ mm e $j = 15$). Os deslocamentos realizados encontram-se na tabela 4. A resolução da mesa micrométrica utilizada é de 0,01mm.

Tabela 4 - Posições axiais realizadas.

Nuvem	Posição
G	0 mm
F	10 mm
E	20 mm
D	25 mm
C	30 mm
B	40 mm
A	50 mm

Fonte: Autor.

As nuvens foram comparadas duas a duas, e os resultados encontram-se na tabela 5. O erro foi calculado utilizando a concatenação entre nuvem G e as demais. É possível notar que a diferença entre os

deslocamentos gerados e calculados estão dentro da resolução axial das nuvens (1 mm). Outra informação importante é o percentual de sobreposição das nuvens, que para o caso, vai de 87,5% (para 10 mm) até 37,5% (para 50 mm). Uma explicação para isso é a diferença de sensibilidade do protótipo trinocular ao longo do eixo z, fazendo com que as nuvens adquiridas em diferentes posições axiais, mesmo que observando as mesmas seções do duto, tenham texturas diferentes. O deslocamento de 50 mm (37,5% de sobreposição) apresentou erro maior, visto a diferença de sensibilidade entre as nuvens. Por isso, a utilização de sobreposição de até 50% é recomendada.

Tabela 5 - Deslocamentos axiais gerados e calculados.

Deslocamento Axial (mm)		
Gerado	Calculado	Erro
10,0	10,0	0,0
20,0	19,0	1,0
25,0	24,0	1,0
30,0	29,0	1,0
40,0	39,0	1,0
50,0	48,6	1,4

Fonte: Autor.

Para a avaliação angular, foram realizados os deslocamentos da tabela 6. A resolução da mesa angulada é de $0,1^\circ$.

Tabela 6 - Posições angulares avaliadas. O deslocamento positivo indica rotação no sentido anti-horário.

Nuvem	Posição
H	0°
I	10°
J	20°
K	30°

Fonte: Autor.

Nos resultados deste experimento, apresentados na tabela 7, observou-se erro dentro do erro esperado (1°) apenas nos deslocamentos de 10° , não importando o sentido da rotação. Nos demais ângulos, o algoritmo não resultou em boa performance, gerando erros de até 4° . Os resultados mostraram uma grande diminuição do número de pontos válidos (correlação maior que 0,9) conforme o aumento do deslocamento angular. Isso se deve a existência de um pequeno

desalinhamento entre o eixo de sistema trinocular e do tubo. Dessa forma, quanto maior o ângulo deslocado, maior a possibilidade das regiões a serem comparadas estarem em outras posições. A simples procura em dois eixos (θ e z) não seria o suficiente para avaliar esta situação.

Embora os resultados para medição angular não tenham o desempenho esperado, o deslocamento angular esperado para o protótipo trinocular no duto é de, no máximo, 10° . Neste caso o algoritmo estaria apto a medir pequenas rotações.

Tabela 7 - Deslocamentos angulares gerados e calculados.

Deslocamento Angular ($^\circ$)		
Gerado	Calculado	Erro
10	9,6	0,4
20	17,0	3,0
30	26,0	4,0

Fonte: Autor.

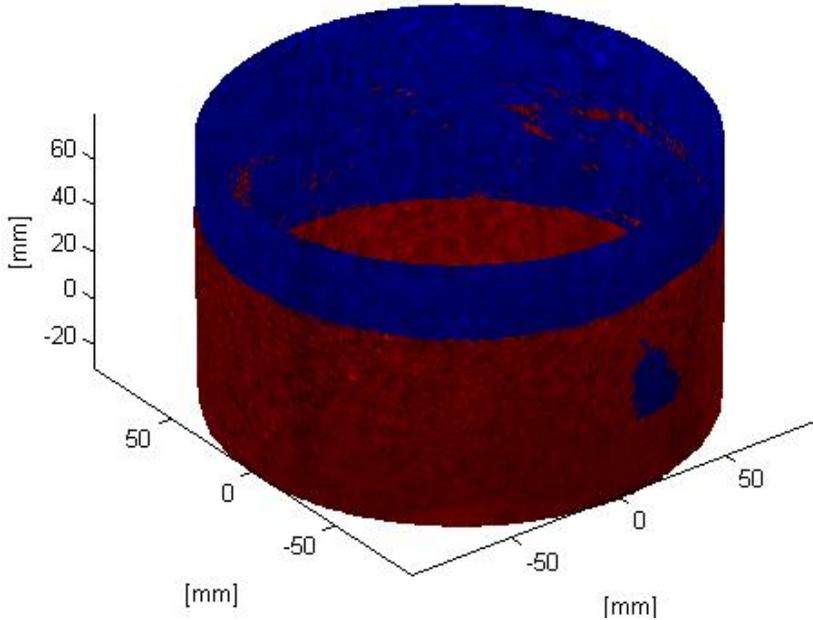
Com as informações de deslocamento angular e axial é realizada a concatenação das nuvens adquiridas. Para que o resultado da concatenação seja fiel à textura do duto foi necessária uma correção na intensidade do tom de cinza ao longo do eixo z . Isso se fez necessário visto que a iluminação proveniente do LED diminui a sua intensidade ao longo do eixo z também, gerando tons mais escuros referentes às coordenadas dos pontos mais afastadas do protótipo numa mesma nuvem. Essa correção leva em conta a intensidade média do início e do final da nuvem, normalizando o tom de cinza. A constante de proporcionalidade foi definida empiricamente. A equação (21) mostra a função de correção para o novo valor de intensidade do tom de cinza (C_{Nova}), que relaciona a intensidade do ponto (C_{Antiga}), com a coordenada z deste ponto e a coordenada z mínima da seção (z_M).

$$C_{Nova} = C_{Antiga} - 0,31(z - z_M) \quad (21)$$

Um resultado de medição pode ser observado na figura 79.

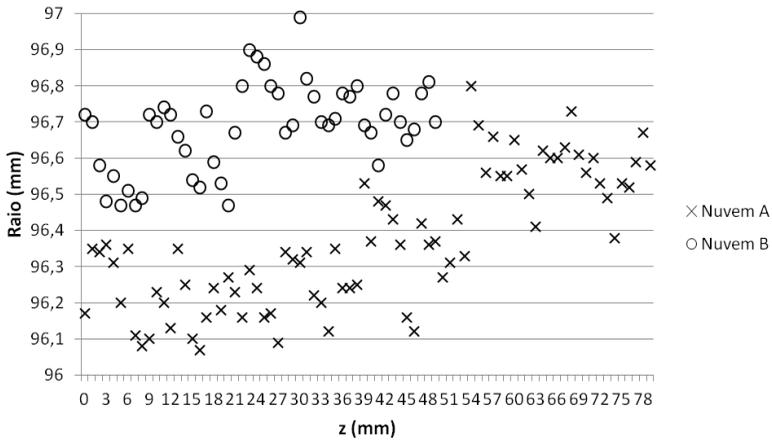
Na figura 80, pode-se observar a região de sobreposição das nuvens A e B para o ângulo de 60° . O desvio entre os valores das duas nuvens está dentro do erro encontrado no algoritmo de hodometria (menor que 1 mm).

Figura 79 - Medição concatenada entre as nuvens E, em vermelho, e G, em azul.



Fonte: Autor

Figura 80 - Gráfico mostrando o perfil lateral da nuvem concatenada para o ângulo de 60° .



Fonte: Autor.

7.3 COMENTÁRIOS FINAIS

Os ensaios realizados mostraram que o protótipo trinocular é capaz de medir a geometria e adquirir a textura interna de dutos. As incertezas apresentadas são compatíveis com as exigências para a detecção de corrosão severa. Embora tenha uma incerteza maior que alguns sistemas do Capítulo 2, o protótipo se destaca na medição da geometria e aquisição simultânea da textura, sendo, no futuro, uma ferramenta para uma rápida avaliação da superfície.

Dentro da comparação com a medição da MMC, chegou-se a um erro sistemático de cerca de 0,3 mm. A incerteza das medições ficou na faixa de 0,5 mm (Tabela 8). Adicionalmente, foram realizados ensaios com tubos de PVC maiores e texturas simuladas, mostrando um bom desempenho do sistema para tubos de até 250 mm.

Tabela 8 - Resultados obtidos com para o desempenho do sistema em textura natural e simulada.

Textura	Diâmetro Nominal (mm)	Raio Médio (Trinocular) (mm)	Erro Sistemático (mm)	Repetibilidade (mm)
Simulada	147	74,04	0,57	2,70*
	153	76,82	0,32	0,56
	159	79,64	0,29	0,42
Natural	155	77,53	0,30	0,42

*Considerando volume de medição fora do determinado.

Fonte: Autor.

A repetibilidade apresentada na última coluna da tabela corresponde à repetibilidade (95% de nível de confiança) com que o valor do raio de cada ponto seria determinado se o raio do tubo fosse considerado constante. Essa característica também pode ser definida como a dispersão radial do ponto.

O algoritmo de hometria e concatenação tem seu limite exposto no nível da resolução das nuvens a serem comparadas. Além disso, ele não comporta outros deslocamentos, diferentes do axial e angular.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou, da concepção à avaliação, um sistema óptico para medição da geometria e textura interna de dutos limpos e secos. O protótipo, composto por três câmeras, mostrou-se capaz de realizar a medição e adquirir informações relativas à textura do duto. Assim, foi desenvolvido um algoritmo inovador utilizando a triangulação inversa e correlação tripla tirando vantagens de um sistema trinocular. O elemento chave foi a utilização de uma casca cilíndrica de interrogação geometricamente compatível com o mensurando. Além disso, aproveita uma característica pouco utilizada em dutos: a textura.

A inovação principal nesta tese é a definição e utilização de uma janela de correlação, aqui denominada de casca cilíndrica de interrogação, que é projetada matematicamente em cada imagem adquirida, extraindo informação para o cálculo da correção.

8.1 ASPECTOS POSITIVOS

O protótipo trinocular é portátil e de fácil adaptação em outros sistemas que se movimentam dentro de dutos. Em trechos retos, limpos e secos, ele é capaz de medir a geometria interna, formando nuvens de pontos com a informação geométrica e de tons de cinza da textura. A adição do tom de cinza auxilia na inspeção, visto que melhora a classificação dos defeitos e a decisão sobre a condição do duto.

Dentre as vantagens do método desenvolvido, em relação às técnicas usuais existentes, pode-se citar que a nuvem de pontos resultante é regular e naturalmente estruturada em coordenadas cilíndricas, com passos angulares e axiais facilmente configuráveis. A escolha dos parâmetros da malha regular deve ser compatível com o tipo de defeito esperado. Não deve resultar em uma malha grosseira, incapaz de detectar defeitos localizados, nem refinada demais para não aumentar demasiadamente o esforço computacional.

A determinação das coordenadas 3D de cada ponto ocorre de forma simultânea com a identificação de pontos homólogos, o que economiza um passo adicional no processamento quando comparado com o método tradicional de busca de pontos homólogos em estereoscopia.

Testes em laboratório mostraram que o protótipo pode ser usado em dutos com diâmetro a partir de 150 mm, até 250 mm, sem alteração no seu *hardware*, mostrando a característica multidiametro do protótipo.

O ensaio com o tubo escalonado mostrou um erro sistemático 0,29 mm com repetibilidade de 0,42 mm. O desvio representa 0,6% do valor do raio medido no tubo.

O algoritmo de hodometria e concatenação funcionou satisfatoriamente para pequenos deslocamentos, onde a sobreposição for maior que 50% e a rotação menor que 15°.

Observou-se o bom desempenho do sistema trinocular na medição de tubos com textura natural. A sua utilização no tubo de aço mostrou que o algoritmo consegue levar em consideração a textura natural.

8.2 LIMITAÇÕES

Como todo sistema novo, além de aspectos positivos, há limitações. Dentre elas, pode-se citar o grande esforço computacional, resultando em elevados tempos de processamento, decorrentes da grande quantidade de cálculos realizada para cada vez que a casca cilíndrica de interrogação é projetada. Acredita-se que com a utilização de processamento paralelo possa ser possível melhorar o tempo de processamento, de forma a ser possível realizar o processamento on-line enquanto as imagens são adquiridas.

Caso haja regiões de textura homogênea no tubo, o algoritmo os identifica e não as leva em consideração: para essas regiões não há informação sobre a geometria 3D e não há como fazer a hodometria relativa a essas regiões.

Da forma como o software do sistema foi implementado, a concatenação e a hodometria só podem ser realizadas quando os deslocamentos axial e angular são múltiplos inteiros do passo da malha. Esta limitação possivelmente pode ser contornada através de técnicas de interpolação iterativas. Porém, esta possibilidade não foi explorada neste trabalho.

Finalmente, por limitações de tempo, não foi possível realizar um conjunto maior de ensaios com tubos com textura natural para enriquecer a validação metrológica do método e do sistema desenvolvidos.

Contudo, esta tese mostrou que a triangulação inversa aliada a correlação é um meio viável para a reconstrução tridimensional da geometria e da textura da superfície interna de tubos.

8.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Extensão do trabalho para dutos curvos;
- Ensaios com aquisição sequencial e em trechos longos;
- Testes com protótipo trinocular acoplado num sistema de suporte com movimento no duto;
- Detecção automática de corrosão severa;
- Quantificação ou sinalização de áreas com corrosão leve, média e severa;
- Utilização uma malha de digitalização adaptativa, isto é, ela automaticamente se refina na região de defeitos e é mais grosseira nas regiões não acidentadas;
- Utilizar algoritmos de hometria mais precisos e eficientes (como o uso do algoritmo de orientação global);
- Explorar o uso de computação paralela para melhorar o tempo de processamento;
- Usar dados de cores, pelo menos, na visualização da nuvem;
- Analisar outros protocolos de transmissão de dados para as câmeras, assim como análise para identificação dos parâmetros adequados para a definição das câmeras;
- Melhorar o desempenho metrológico.

REFERÊNCIAS

ADANSOR SYSTEMS INTEGRATION. GigE / Fibre Optic Weld System. Disponível em: < <http://www.adansor.com/gige-fibre-optic-inspection-system.html>>. Acesso em 13 de janeiro de 2012. 2012a.

ADANSOR SYSTEMS INTEGRATION. Hybrid Crawler System. Disponível em: < <http://www.adansor.com/hybrid-crawler-system.html>>. Acesso em 13 de janeiro de 2012. 2012b.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, Brasil). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**: 2013. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/?pg=66833>>. Acesso em 17 de janeiro de 2014.

AGRAWAL, M.; DAVIS, L. S. Trinocular Stereo using Shortest Paths and the Ordering Constraint. **International Journal of Computer Vision**. v. 47n.1-3. p.43-50. Abril a Junho de 2002.

ALBERTAZZI, A. G.; HOFMANN, A. C.; FANTIN, A. V.; SANTOS, J. M. C. Photogrammetric endoscope for measurement of inner cylindrical surfaces using fringe projection. **Applied Optics**. v. 47, n. 21, p.3868-3876. Julho de 2008.

Atlas Inspection Technologies. **Remote Visual Solutions**: Glossary of Terms. Disponível em: <<http://www.atlas-inspection.com/glossary.html>>. Acesso em 30 de dezembro de 2011.

BALIHAR, D. **What is a pinhole camera?** 2013. Disponível em: <<http://www.pinhole.cz/en/pinholecameras/whatis.html>>. Acesso em 17 de fevereiro de 2014.

BERTO JUNIOR, C. A.; LOURENÇO, R. Sistema de monitoramento da corrosão interna de gasoduto por meio de processamento digital de sinais. **Revista Exacta**, São Paulo, v.4, n.2, p. 391-400, jul/dez 2006.

BESL, P. J.; McKAY, N. D. A method for registration of 3-D shapes. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. v.14 n.2, p.239-256. Fevereiro de 1992.

- BLAKE, A.; McCOWEN, D.; LO, H. R. LINDSEY, P. J. Trinocular active range-sensing. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. v.15, n.5, p.477 – 483. Maio de 1993.
- BODENMANN, A. et al. Visual Mapping of Internal Pipe Walls using Sparse Features for Application on board Autonomous Underwater Vehicles. In: OCEANS 2009 – EUROPE, 2009. Bremen. **Proceedings**. Bremen: IEEE, outubro de 2009. p.1-8.
- BROWN, D. C. Close-Range Camera Calibration. **Photogrammetric Engineering**, v. 37, n.01, p.855-866. Janeiro de 1971.
- BOUGUET, J. **Camera Calibration Toolbox for Matlab**. Disponível em: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. Acesso em 14 de julho de 2014
- BUSCHINELLI, P. D. V; et al. Optical profilometer using laser based conical triangulation for inspection of inner geometry of corroded pipes in cylindrical coordinates. In: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII. 2013. Munich. **Proceedings**. Bellingham: Proc. SPIE 8788, abril de 2013.
- BYRÖD, M.; JOSEPHSON, K. ÅSTRÖM, K. Fast Optimal Three View Triangulation. In: 8th Asian Conference on Computer Vision. 2007. Tokyo. **Proceedings**. Tokyo: Springer Berlin Heidelberg, novembro de 2007. v.2, p.549-559.
- CHERNEWSKI, A. **Pinhole history**. Disponível em: <http://www.alternativephotography.com/wp/history/pinhole-history>. Acessado em 18 de dezembro de 2014.
- CHENG, Y.; MAIMONE, M.; MATTHIES, L.Y. Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 2005. Hawaii. **Proceedings**. Hawaii: IEEE, janeiro de 2006.
- CLARKE, T.; GOOCH, R. **Internal Weld Scanner**. OMS, 2009. Disponível em: < http://www.optical-metrology-services.com/uploads/pdf/Internal_Weld_Scanning.pdf >. Acesso em 17 de janeiro de 2012.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

Emergências Químicas. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/gerencia-mento-de-riscos/emergencias-quimicas/133-dutos-introducao>>. Acesso em 17 de janeiro de 2014.

CONCI, A.; AZEVEDO, E.; LETA, F. R. **Computação Gráfica. v2.** 2a. reimpressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

COMPORT, A. I.; MALIS, E.; RIVES, P. Real-time Quadrifocal Visual Odometry. **The International Journal of Robotics Research**, v. 29, n.2 – 3, p.245 – 266, fevereiro/março de 2010.

CORRELATED Solutions. **Correlated Solutions Products.** Disponível em: <<http://www.correlatedsolutions.com/products/>> . Acessado em 05 de agosto de 2014.

COSTA, A.; RESENDE, J.; CEDRO, M; FERNANDES, V. S. Robô de inspeção tubular protótipo PIC – Pipeline Inspection Gauge. **Anais.** In: SEMINÁRIO ESTUDANTIL DE PRODUÇÃO ACADÊMICA. v. 11, n1 . UNIFACS: 2007.

DANTEC Dynamics. **Digital Image Correlation – DIC.** Disponível em: <http://www.dantecdynamics.com/digital-image-correlation>. Acessado em 05 de agosto de 2014.

DHOND, U. R.; AGGARWAL, J. I. Binocular Versus Trinocular Stereo. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990. Cincinnati, OH. **Proceedings.** Cincinnati: IEEE, maio de 1990. p. 2045 – 2050, vol.3.

DURAN, O.; ALTHOEFER, K.; SENEVIRATNE, L.D. Automated sewer inspection using image processing and a neural classifier. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 2002.Honolulu. **Proceedings.** Honolulu: IEEE, agosto de 2002.

EVEREST VIT. **Rovver: Maintenance & Operation Manual.** Versão 08/20/03. Disponível em: <<http://www.ge-mcs.com/download/RVI/Rovver%20400/rovvermanual.pdf>>. Acesso em 12 de janeiro de 2012.

EVEREST VIT. **Rovver 900**. Disponível em: < http://www.ge-mcs.com/download/RVI/Rovver%20900/rovver900_0805.pdf >. Acesso em 12 de janeiro de 2012.

FANTIN, A. V.; PINTO, T. L. F. C.; ALBERTAZZI, A. An Efficient Mesh Oriented Algorithm for 3D Measurement in Multiple Camera Fringe Projection. In: Optical Metrology 2007, 2007. Munique-Alemanha. **Proceedings** of SPIE, 2007. v. 6616.

FERREIRA, L. A.; et al. **Curso de formação de operadores de refinaria**: química aplicada - corrosão. Curitiba : PETROBRAS, UnicenP, 2002. Disponível em: <http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/petrobras/corrosao.pdf>. Acessado em 29 de dezembro de 2014.

FRISIUS, R. G. **De radio astronomico et geometrico liber**. 1558. Disponível em <http://books.google.com.br/books?id=Ftk5AAAAcAAJ&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>. Acessado em 16 de julho de 2014.

FUKAI, H.; XU, G. Fast and Robust Registration of Multiple 3D Point Clouds. In: 20th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication Proceedings. 2011 RO-MAN. Atlanta. **Proceedings**. Atlanta: IEEE, julho e agosto de 2011. p.331-336.

GE. **Advances in high accuracy measurement in remote visual inspection**. 2010. Disponível em: < <http://www.ge-mcs.com/download/RVI/XLG3/tech-paper-3d-measurement.pdf> >. Acesso em 30 de dezembro de 2011.

GE. **Informações técnicas da XLG3**. Disponível em < http://www.ge-mcs.com/download/RVI/XLG3/GEIT-65043PB_xlg_3ds.pdf >. Acesso em 30 de dezembro de 2011.b.

GE. **XLG3 VideoProbe**. Disponível em: <<http://ge-mcs.com/pt/remote-visual-inspection/.../xl-g3-videoprobe.html>>. Acesso em 30 de dezembro de 2011.

GIMP. **5.5 Conversion to Grayscale**. Disponível em:<<http://gimp-savvy.com/BOOK/index.html?node54.html>>. Acessado em 16 de dezembro de 2014.

GOM. **GOM Inspect Software**. Disponível em:<
<http://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>>. Acessado em 12
de janeiro de 2015.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens
digitais**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2010. 509 p.

HABEB, A.; BOUFAMA, B. Three-dimensional projective
reconstruction from three views. In: 15th International Conference on
Pattern Recognition, 2000. Barcelona. **Proceedings**. Barcelona: IEEE,
setembro de 2000. v.1, p. 415 – 418.

HAERTEL, M. E. M.; PINTO, T. L. F. C.; ALBERTAZZI, A.
Trinocular stereo system with object space oriented correlation for inner
pipe inspection. **Measurement**. p. 1-14. (sob avaliação, submetido em
08 de dezembro de 2014*).

HANSEN, P.; ALISMAIL, H.; RANDER, P.; BROWNING, B.
Monocular Visual Odometry for Robot Localization in LNG Pipes. In:
IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND
AUTOMATION - ICRA, 2011. Shanghai. **Proceedings**. Shanghai:
IEEE, agosto de 2011. p. 3111 – 3116.

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple view geometry in
computer vision**. 2a. ed. Cambridge: Cambridge University Press,
2003. 665 p.

HEIKKILÄ, J.; SILVÉN, O. A Four-step Camera Calibration Procedure
with Implicit Image Correction. In: IEEE Computer Society Conference
on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97), 1997, San
Juan, Puerto Rico. **Proceedings** of CVPR: San Juan, 1997. p. 1106-
1112.

HEMAYED, E. E.; FARAG, A. A. A Geometrical-based Trinocular
Vision System For Edges Reconstruction. In: International Conference
on Image Processing, 1998. ICIP 98. Chicago, IL. **Proceedings**.
Chicago: IEEE, outubro de 1998. p. 162 – 166, vol.2.

HORN, B. K.; SCHUNCK, B. G. Determining Optical Flow. **Artificial
Intelligence**, v. 17. n.01, p.185 – 203. Agosto de 1981.

HUFFINGTON POST. Digital Camera Inventor Explains How **Technology Took Down Kodak**. Tech. 05/21/2013. Disponível em: <http://www.huffingtonpost.com/2013/05/21/digital-camera-inventor-kodak-bankruptcy_n_3315622.html>. Acessado em 16 de dezembro de 2014.

International Organization for Standardization. **ISO 8373:2012(en): Robots and robotic devices — Vocabulary**. 2012. Disponível em <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>>. Acessado em 12 de janeiro de 2015.

KAWAGUCHI, Y.; et al. Internal Pipe Inspection Robot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1995. Nagoya. **Proceedings**. Nagoya: IEEE, agosto de 2002. p.857 – 862.

LARKINS, R. L.; CREE, M. J.; DORRINGTON, A. A. Analysis of ICP variants for the registration of partially overlapping time-of-flight range images. In: 25th International Conference of Image and Vision Computing New Zealand, IVCNZ 2010. Queenstown. **Proceedings**. Queenstown: IEEE, novembro de 2010. p.01-08.

LEAL, A.; ANTUNES, J. **Buraco de Agulha**. 2003. Disponível em: <http://pinhole.no.sapo.pt/historia.html>. Acessado em 16 de julho de 2014.

LEE, D.; MOON, H.; CHOI, H. R. Autonomous Navigation of In-pipe Working Robot in Unknown Pipeline Environment. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2011. Shangai. **Proceedings**. Shangai: IEEE, agosto de 2011. p. 1559 – 1564.

LIRA, S. A. **ANÁLISE DE CORRELAÇÃO**: Abordagem Teórica e de Construção dos Coeficientes com Aplicações. 2004. 209 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Pós- Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Departamento de Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia da, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LUCAS, B. D.; KANADE, T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In: IMAGING UNDERSTANDING WORKSHOP. **Proceedings**: 1981. p.121-130.

MORALEDA, J.; OLLERO, A.; ORTE, M. A robotic system for internal inspection of water pipelines. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v.6, n.3, p. 30-41, setembro de 1999.

MOZEROV, M.; GONZALEZ, J.; ROCA, X.; VILLANUEVA, J. J. Trinocular Stereo Matching with composite disparity space image. In: 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2009. Cairo. **Proceedings**. Cairo: IEEE, novembro de 2009. p. 2089 – 2092.

MULLIGAN, J.; ISLER, V. DANILIDIS, K. Trinocular Stereo: a Real-Time Algorithm and its Evaluation. **International Journal of Computer Vision**. v.47, n.1-3, p.51-61. Abril de 2002.

NACE. **Corrosion Basics**. Disponível em: < <http://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Corrosion-Basics/#forms> >. Acesso em 29 de dezembro de 2014.

National Institute of Standards and Technology. **Fiftieth Anniversary of First Digital Image Marked**. 2007. Disponível em: < http://www.nist.gov/public_affairs/releases/image_052407.cfm >. Acesso em 03 de fevereiro de 2014.]

NORDBERG, K. Efficient Three-view Triangulation Based on 3D Optimization. In: 19th British Machine Vision Conference. BMVC 2008. Leeds. **Proceedings**. Leeds: BMVA Press, setembro de 2008. p.19.1-19.9.

NORDBERG, K. The Key to Three-View Geometry. **International Journal of Computer Vision**. v.94, n.3, p.282-294. Setembro de 2011.

OLSON, C. F. et al. Rover navigation using stereo ego-motion. **Robotics and Autonomous Systems**. v. 43, p. 215 – 229, junho de 2003.

Olympus. **Industrial Endoscope System Guide**. Disponível em: <http://www.olympus-ims.com/pt/.downloads/download/?file=285213285&fl=en_US>. Acesso em 23 de janeiro de 2012.

Olympus. **IPLEX LX/ IPLEX LT**. Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/pt/rvi-products/iplex-lx/>>. Acesso em 30 de dezembro de 2011.

OMC. **OMC Laser Profiler 15/50**. Disponível em: <http://www.optical-metrologycentre.com/Downloads/Products/OMC_Product_Guide_Profiler.pdf>. Acesso em 12 de dezembro de 2014.

OMS. **Weld Checker**. 2010. Disponível em: <http://www.omsmeasure.com/uploads/pdf/internal_welding_scanning.pdf>. Acesso em 17 de janeiro de 2012.

PCL. **What is PCL?**. Disponível em: <<http://pointclouds.org/about/>>. Acesso em 07 de maio de 2014.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de Imagens Digitais: Princípios, algoritmos e aplicações**. São Paulo: Thomson Learning, 2008.

Point Grey. **Cameras: IEEE 1394: Flea2 CCD Camera**. Disponível em <http://www.ptgrey.com/products/flea2/flea2_firewire_camera.asp>. Acessado em 27 de maio de 2013.

QUEST INTEGRITY GROUP. **Steam reformer tube inspection system – LOTIS**. Disponível em: <www.questintegrity.com/technology/steam-reformer-tube-inspection>. Acesso em 30 de dezembro de 2011.

REMONDINO, F., FRASER, C. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. **Proceedings**. In: ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology. IAPRS: Dresden/Germany, setembro de 2006. p.266-272.

RITTER, M.; FREY, C. W. Rotating optical geometry sensor for inner pipe-surface reconstruction. In: IMAGE PROCESSING: MACHINE VISION APPLICATIONS III, 2010, San Jose. **Proceedings** of SPIE-IS&T Electronic Imaging. SPIE: San Jose, 2010. p. 753803-9.

ROBERT, R. D. **Advancements In Laser Profilometry Applied To Reformer Tubes For Detection Of Creep Damage Provides A Step Change In Steam Methane Reformer (SMR) Management**. 2003.

Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/v08n09/roberts/roberts.htm>>. Acesso em 12 de dezembro de 2014.

ROSEN INSPECTION. **RoVisual**. 2011. Disponível em: <http://www.roseninspection.net/NR/rdonlyres/1EA1F0BF-3C87-40CE-A64B-B374ADDB6AC7/2780/RoVisual_SF_E_201108.pdf>. Acesso em 30 de dezembro de 2011.

RUSINKIEWICZ, S.; LEVOY, M. Efficient Variants of the ICP Algorithm. In: International Conference on 3-D Digital Imaging and modeling. 2001 3DIM. Quebec City. **Proceedings**. Quebec City: IEEE, junho de 2011. p. 145-152.

SALVI, J.; FERNANDEZ, S.; TRIBANIC, T.; LLADO, X. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. **Pattern Recognition**. v. 34, 2010. p. 2666–2680.

SCHREIER, H.; ORTEU, J.; SUTTON, M. A. **Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications**. Nova York: Springer, 2009.

STEWART, C. V.; DYER, C. R. The Trinocular General Support Algorithm: A Three-camera Stereo Algorithm For Overcoming Binocular Matching Errors. In: Second International Conference on . Computer Vision. 1988. Tampa. **Proceedings**. Tampa: IEEE, dezembro de 1988. p. 134 – 138.

TAM, G. K. L. et al. Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey from Rigid to Nonrigid. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**. v.19 n. 7. p.1199-1217. Julho de 2013.

Theia Tech. **MY125**. Disponível em <<http://www.theiatech.com/prod/specs.php?lens=MY125>>. Acessado em 27 de maio de 2013.

THIELEMANN, J. T.; BREIVIK, G. M.; BERGE, A. **Optical 3D measurements aid pipeline inspection**. 2009. Disponível em: <http://spie.org/documents/Newsroom/Imported/1545/1545_5703_0_2009-03-26.pdf>. Acesso em 20 de outubro de 2011.

TSAI, R.Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-self TV cameras e lenses.

IEEE Internacional Journal of Robotics and Automation. v.3 n.04. p. 323-344. Agosto de 1987.

UESHIBA, T. An Efficient Implementation Technique of Bidirectional Matching for Real-time Trinocular Stereo Vision. In: 18th International Conference on Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. Hong Kong. **Proceedings.** Hong Kong: IEEE, agosto de 2006. v.1, p. 1076 – 1079.

UNNIKRISHNAN, P. V.; THORNTON, B.; URA, T.; NOSE, Y. A Conical Laser Light-Sectioning Method for Navigation of Autonomous Underwater Vehicles for Internal Inspection of Pipelines. In: OCEANS 2009 – EUROPE, 2009. Bremen. **Proceedings.** Bremen: IEEE, outubro de 2009. p.1-9.

Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012.

WILSON, S; LOVELL, B.; CHANG, A. e MASTERS, B. **Visual odometry for quantitative bronchoscopy using optical flow.** In: APRS WORKSHOP ON DIGITAL IMAGE COMPUTIONG - WDIC, 2005. Brisbane. Proceedings. Brisbane: The Australian Pattern Recognition Society, fevereiro de 2005. Disponível em: < <http://itee.uq.edu.au/~aprs/wdic2005/papers/26.pdf>>. Acesso em 27 de dezembro de 2011.

WENG, J.; COHEN, P.; HERNIOU, M. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Inteligence.** v.14. n.10. p.965-980. Outubro de 1992.

YOSHIZAWA, T. **Handbook of optical metrology:** principles and applications. Boca Raton: CRC Press, 2008.

YAO, Y.; LINTON, R. J.; PADIR, T. GPU Based Real-time Trinocular Stereovision. In: Intelligent Robots and Computer Vision XXX: Algorithms and Techniques. 2013. Burlingame. **Proceedings.** Bellingham: SPIE, fevereiro de 2013. v.8662 p. 86620A-1.

ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. v.22, n.11, 2000. p.1330-1334.