

Everson Siqueira

Fusão Sensorial para Navegação em Tubulações Utilizando Filtro de Kalman

Brasil

2017

Everson Siqueira

Fusão Sensorial para Navegação em Tubulações Utilizando Filtro de Kalman

Defesa de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação da Universidade Federal do Rio Grande

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Centro de Ciências Computacionais -C3

Orientador: Vinícius Menezes de Oliveira

Coorientador: Rodrigo Zelir Azzolin

Brasil

2017

Ficha catalográfica

S618f Siqueira, Everson Brum.

Fusão sensorial para navegação em tubulações utilizando filtro Kalman / Everson Brum Siqueira. – 2017.
83 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-graduação em Engenharia da Computação, Rio Grande/RS, 2017.

Orientador: Dr. Vinícius Menezes de Oliveira.

Coorientador: Dr. Rodrigo Zelir Azzolin.

1. Tubulação 2. Inspeção Robótica 3. Fusão Sensorial 4. Postura dentro da Tubulação I. Oliveira, Vinícius Menezes de II. Azzolin Rodrigo Zelir III. Título.

CDU 681.5.01



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fusão Sensorial para Navegação em Tubulações Utilizando Filtro de Kalman

Everson Brum Siqueira

Banca examinadora:

Prof. Dr. Edson Roberto de Pieri

Profa. Dra. Silvia Silva da Costa Botelho

Eng. Rosa Irene Terra Pinto

Prof. Dr. Rodrigo Zelir Azzolin
Co-orientador

Prof. Dr. Vinicius Menezes de Oliveira
Orientador

Este trabalho é dedicado à minha família e aos meus amigos

Agradecimentos

Os agradecimentos são direcionados à minha família que sempre esteve do meu lado, e nunca desistiu de mim.

A todos os professores que me acompanharam durante o mestrado, em especial ao Prof. Rodrigo Azzolin, a Profa. Sílvia Botelho e ao Prof. Vinícius Oliveira.

Aos meus amigos que sempre me ajudaram quando precisei e quando não precisei também. São eles: Átila Weis, Amanda Duarte, Braian Konzgen, Cristiano Steffens, Eduardo Leivas, Letieri Ávila, Lucas Caetano, Guilherme Zaffari, Joel Gaya, Jusoan Mór, Luciane Soares, Matheus Machado, Nathan Nyland, Rômulo Thiago, Rodrigo Silva, Thiago Fonseca, Valquíria Hutller.

A Universidade Federal do Rio Grande pelo apoio e pelo ensino de qualidade.

“A persistência é o menor caminho do êxito”. Charles Chaplin

Resumo

Os oleodutos são a maneira mais eficiente de transportar hidrocarbonetos, como (óleo, gás, água, por exemplo). Estas tubulações apresentam problemas de desgaste, corrosão e obstrução com alguns materiais internos. Dependendo do produto que é transportado pode ser perigoso. Uma alternativa para evitar esse risco é realizar inspeções regularmente. Muitos dos tubos estão localizados em difícil acesso aos seres humanos. Então, o desenvolvimento da tecnologia nos traz o emprego de robôs para inspecionar tubulações. O maior desafio para aplicar robôs no ducto são os problemas de localização. As técnicas de localização de robôs permitem adquirir a posição de falha de tubulação. O principal proposto deste trabalho é aplicar uma técnica para localizar o protótipo mecânico desenvolvido pela FURG para inspecionar tubulações da refinaria brasileira de óleo.

Palavras-chaves: Tubulação. Inspeção Robótica. Fusão Sensorial. Atitude dentro da Tubulação.

Abstract

Pipelines are the most efficiently way to convey hydrocarbons such as (oil, gas, water eg). These pipelines present problems with wear, corrosion and obstruction with some internal materials. Depending of product that is conveyed can be dangerous. An alternative avoid this risk is to realise inspections regularly. Many of pipes are located in hardly access to humans. Then, the development of the technology brings us the employment of robots to inspect pipes. The biggest challenge to apply robots in duct is the localization problems. The localization techniques of robots allows to acquire the position of pipe failure. The main proposed of this work is to apply a technique to localize the mechanical prototype developed by FURG to inspect pipes of brazillian refinery of oil. **Key-words:** Pipelines. Robotic inspection. Sensorial Fusion. Attitude inside pipe.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Acidente na Vila Socó em 1984. Fonte disponível no (SOCO, 1984) . . .	24
Figura 2 – Acidente em Taiwan. Fonte: disponível em (TAIWAN, 2014)	25
Figura 3 – DutoBot dentro do duto	26
Figura 4 – Técnica de inspeção baseada na geração de campo magnético. Dispo- nível em (INSPECAO. . . ,)	28
Figura 5 – Técnica de inspeção baseada em líquido penetrante. Disponível em (LI- QUIDO. . . ,)	29
Figura 6 – Técnica de Inspeção Visual. Disponível em (VISUAL. . . ,)	30
Figura 7 – Técnica de Ultra-Som. Disponível em (INSPECAOULTRASOMTESTE,)	30
Figura 8 – Robô proposto por (WANG et al., 2010).	32
Figura 9 – (REBER et al., 2002).	32
Figura 10 – Proposta de Inspeção em (CHOI; RYEW, 2002).	33
Figura 11 – Proposta de Inspeção em (ROH; CHOI, 2005).	33
Figura 12 – Proposta de Inspeção em (MASUTA et al., 2013).	34
Figura 13 – Proposta de Inspeção em (KUNTZE; HAFFNER, 1998).	34
Figura 14 – Proposta de Inspeção em (KIM; SHARMA; IYENGAR, 2010).	35
Figura 15 – Proposta de Inspeção em (KWON; YI, 2012).	35
Figura 16 – A visão 3D do robô TRIPILLAR.	36
Figura 17 – Proposta de robô para inspecionar tubulações de água (KIM et al., 2009)	36
Figura 18 – O robô Piko (FJERDINGEN et al., 2009).	37
Figura 19 – O robô Explorer (SCHEMPF et al., 2003).	37
Figura 20 – Proposta de Inspeção em dutos pequenos (ANTHIERENS; CIFTCI; BETEMPS, 1999).	38
Figura 21 – Proposta de Inspeção em dutos pequenos (YU; MA; CAO, 2005). . . .	38
Figura 22 – Funcionamento do Giroscópio MEMS	40
Figura 23 – Giroscópio Mecânico.	40
Figura 24 – Funcionamento do Giroscópio Óptico. fonte: http://http://www.neubrex.com/htm/applications/gyro-principle.htm	41
Figura 25 – Funcionamento do Giroscópio MEMS	41
Figura 26 – Funcionamento do Encoder. fonte: http://sistemaembutido.com.br/article.php?id=34	43
Figura 27 – Sistemas de Coordenadas ECI (SISTEMAECI,)	44
Figura 28 – Sistemas de Coordenadas ECEF (Department of Defense World Geo- detic System 1984 et. al,2000)	44

Figura 29 – Modelo Proposto para Aquisição da Pose do Robô.	46
Figura 30 – Posição angular de Referência no eixo X.	53
Figura 31 – Posição angular de Referência no eixo Y.	53
Figura 32 – Posição angular de Referência no eixo Z.	53
Figura 33 – Simulações da velocidades angulares de referência da UMI.	54
Figura 34 – Simulações da acelerações de saída da UMI sem ruído (a_{ref}) e com ruído nos três eixos (a_{gauss}).	56
Figura 35 – Variação da Temperatura.	57
Figura 36 – Variação do bias.	57
Figura 37 – Comparação entre a saída da integração do giroscópio e a referência de posição nos três eixos	57
Figura 38 – Comparação entre a saída da integração do giroscópio e a referência de posição	58
Figura 39 – Erro entre a saída da integração do giroscópio e a técnica de DCM apresentada nos três eixos.	59
Figura 40 – Circuito 3d de deslocamento da UMI	59
Figura 41 – Aceleração simulada da UMI no sistema de coordenadas RPY.	60
Figura 42 – A saída de aceleração linear de referência (a_{ref}) e a saída de aceleração linear estimada (a_{lin}) no sistema NED.	61
Figura 43 – A relação entre a orientação de referência e estimada utilizando dcm.	61
Figura 44 – Velocidades angulares de entrada do algoritmo dcm.	62
Figura 45 – Aceleração nos três eixos de entrada do algoritmo dcm.	62
Figura 46 – Posição 3D de apenas dados da aceleração linear	63
Figura 47 – Erro quadrático entre a posição real e a posição estimada usando apenas os dados do acelerômetro nos três eixos.	63
Figura 48 – Posição no eixo X	64
Figura 49 – Comparação entre o mapeamento 3d utilizando os dados do encoder e UMI.	64
Figura 50 – Comparação entre o mapeamento 3d utilizando os dados do encoder e UMI e o filtro de kalman.	65
Figura 51 – Comparação entre o erro quadrático entre a posição de referência e o modelo estimado e posição de referência e dados simulados do encoder.	65
Figura 52 – O formato da tubulação doado pela refinaria.	66
Figura 53 – Posição angular de referência nos três eixos.	66
Figura 54 – Comparação entre a aceleração de referência e simulada nos três eixos.	67
Figura 55 – Comparação entre a aceleração linear de referência e a aceleração linear simulada nos três eixos em relação ao referencial inercial NED.	68
Figura 56 – O formato da tubulação doado pela refinaria.	68

Figura 57 – Erro quadrático em relação aos dados do acelerômetro e de referência nos três eixos.	69
Figura 58 – A saída do encoder simulada.	69
Figura 59 – A criação do mapa tridimensional utilizando os dados do encoder e da UMI.	69
Figura 60 – Erro quadrático em relação aos dados do encoder e de referência nos três eixos.	70
Figura 61 – A criação do mapa tridimensional utilizando os dados do encoder e da UMI.	70
Figura 62 – Erro quadrático em relação aos dados da fusão sensorial e de referência nos três eixos.	71
Figura 63 – A estrutura para experimentações práticas.	72
Figura 64 – Modelo da UMI GY-88.	73
Figura 65 – Arduino Uno.	73
Figura 66 – Shield Ethernet W5100.	74
Figura 67 – Encoder de baixo custo.	74
Figura 68 – Estrutura Tubular para Ensaios Práticos.	75
Figura 69 – Projeção da Trajetória real no matla	75
Figura 70 – Saída do Encoder	75
Figura 71 – Saída do Método de Localização e Mapeamento usando Kalman e DCM.	76
Figura 72 – Ângulo de Guinada na Prática.	76

Lista de abreviaturas e siglas

ANP	Agência Nacional do Petróleo
DCM	Matriz de cossenos diretores (<i>Direct Cosin Matrix</i>)
DOF	<i>Degree of Freedom</i> Graus de Liberdade
ECI	<i>Earth- Centered-Inertial</i>
ECEF	<i>Earth-Centered Earth-Fixed</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
ENU	<i>East-North -UP</i>
EFK	Filtro de Kalman Estendido
FastSlam	Filtro de partículas aplicado ao SLAM
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
FK	Filtro de Kalman
GLN	Gás natural liquefeito
INS	Sensor de Navegação Inercial
LPT	<i>Local Tangent Plane</i>
MEMS	MicroEletroMecânicos
NED	<i>North-East-Down</i>
TOF	<i>Time-of-Flight</i>
RPR	Refinaria de Petróleo Rio Grandense
RPY	<i>Roll-Pitch-Yaw</i>
SLAM	Localização e Mapeamento Simultâneos
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
UMI	Unidade de Medida Inercial

Lista de símbolos

A_{or}	Matriz de transição de orientação
A_{pos}	Matriz de transição de posição
\mathbf{a}	Vetor de aceleração
a_{real}	Aceleração real de saída
a_x	Aceleração no eixo X
a_y	Aceleração no eixo Y
a_z	Aceleração no eixo Z
B_{or}	Matriz de controle de orientação
B_{pos}	Matriz de controle de posição
C	Matriz de observância
dp	Desvio padrão
θ	Arfagem
g_b	bias do giroscópio
a_b	bias do acelerômetro
k	Instante k de tempo
K	Matriz de ganho do Kalman
FastSlam	Filtro de partículas aplicado ao SLAM
$\lambda_{ref}(k)$	Vetor posição angular no instante k
$\lambda_{ref}(k + 1)$	Vetor posição angular no instante k+1
\vec{f}	Vetor saída do acelerômetro
g	Módulo da gravidade
\vec{g}	Vetor gravidade
ϕ	Guinada

$I2C$	<i>Inter- Integrated Circuit</i>
P	Matriz de covariância do erro
Q	Matriz de covariância do ruído do processo
R	Matriz de covariância do ruído de medição
$p(k+1)$	Posição no instante $k+1$
φ	Rolagem
SLAM	Localização e Mapeamento Simultâneos
SDA	<i>Serial Data</i>
SDL	<i>Serial Clock</i>
σ_b	Variância predita do bias do giroscópio
σ_c	Variância predita do estados do DCM
T	Tempo de discretização
X	Vetor de estados
X_{or}	Vetor de estados de orientação
X_{pos}	Vetor de estados de posição
X_{DCM}	Vetor de saída do método de Cosseno da Matriz Diretores
\hat{X}	Média do estado predito
$v(k+1)$	Velocidade linear no instante $k+1$
${}^g v$	Ruído Gaussiano do giroscópio
${}^a v$	Ruído Gaussiano do acelerômetro
ω_x	Velocidade Angular X
ω_{ref}	Velocidade Angular de Referência
ω_y	Velocidade angular Y
ω_z	Velocidade angular Z

Sumário

1	Introdução	23
2	Conceitos Básicos de Inspeção de Dutos	27
2.1	Inspeção Manual	27
2.1.1	Gamagrafia, Radiografia e Radioscopia	28
2.1.2	Partículas Magnéticas	28
2.1.3	Emissão Acústica	29
2.1.4	Líquido Penetrante	29
2.1.5	Inspeção Visual	29
2.1.6	Ultra-Som	30
2.1.7	Fuga de Campo Magnético	30
2.2	Inspeção Robotizada	31
2.2.1	Sistema de Locomoção <i>PIG</i>	31
2.2.2	Sistema de Locomoção por Rodas	32
2.2.3	Sistema de Locomoção por Lagarta	34
2.2.4	Sistema de Locomoção do tipo Cobra	36
2.2.5	Sistema de Locomoção do tipo <i>Inch-worm</i>	37
3	Metodologia Proposta para Aquisição da Attitude do Dutobot	39
3.1	Unidade de Medida Inercial- UMI	39
3.1.1	Modelagem da UMI	42
3.2	Encoder	42
3.3	Metodologia Proposta para Inspeção de dutos de óleo/gás	43
3.3.1	Transformação de Coordenadas	45
3.3.2	Filtro de Kalman	47
3.3.3	Filtro de Kalman Estendido	48
3.4	Representação da Aquisição da Pose por Espaço de Estados em Tempo Discreto	49
3.4.1	Orientação	49
3.4.2	Posição	51
4	Resultados	53
4.1	Relação entre Ângulos de Euler e Dados da UMI	54
4.2	Simulando a Aquisição de Posição	59
4.3	Resultados Práticos	72

5 Conclusão	77
Referências	79

1 Introdução

Segundo o Anuário Estatístico 2016 da Agência Nacional do Petróleo (ANP), estima-se que existam mais de 19.700 km de tubulações para transporte de fluido (ANP...). No entanto, a quantidade de tubulações no Brasil é bastante inferior em comparação com países como o México (42.000 km), Argentina (28.000 km) e Estados Unidos (440.000 km).

As estruturas tubulares são a forma mais eficiente, segura e econômica para transportar hidrocarbonetos (gás, óleo e petróleo) além de água e esgoto por longas distâncias. Atualmente, busca-se reduzir o tempo de deslocamento dos produtos e reduzir o custo de transporte. As tubulações estão sendo cada vez mais aplicadas para o transporte de fluidos em curtas, médias e longas distâncias e o número de tubulações que devem ser inspecionados têm crescido ao longo dos anos.

As tubulações podem ser encontradas em diversos setores econômicos da sociedade, como por exemplo, nas indústrias para alimentar cadeias produtivas com matéria prima ou para geração de energia, intra-cidades, para transporte de gás, eletricidade, água, esgoto entre outros. O uso intensivo desse meio de transporte fluídico exigiu mudanças nas legislações pelo mundo para a adoção do uso de tecnologia de monitoramento. Essa tecnologia permite obter um controle mais adequado para evitar acidentes provocados por falhas nas tubulações. Uma das formas de monitorar é desenvolver um sistema de controle. Esse sistema de controle visa proteger a tubulação e equipamentos através de monitoramento e ajustes de variáveis da operação, acionar alarmes quando os limites de operação forem ultrapassados e detectar vazamentos (KENNEDY, 1993). A não utilização desse sistema de monitoramento e a negligência para inspeção das tubulações provocam acidentes e dependendo do produto a ser transportado, causa danos físicos e ambientais.

As tubulações estão sujeitas a diversas falhas: corrosão, falha de soldagem, erro na escavação, equipamentos, forças naturais e outras fontes externas de forma que podem ter consequências desastrosas para o uso que se faz das tubulações. A corrosão é a transformação de um material pela sua interação química ou eletroquímica com o meio, sendo a falha mais comum presentes em tubulações (IDE; ROSOSTOLATO, 2013). A falha na soldagem e escavação são erros provocados por imperícia humana. As forças naturais são provenientes de terremotos, maremotos entre outros que podem provocar ruptura dos dutos. Essas rupturas são responsáveis por perdas humanas, desastres ambientais e prejuízos financeiros.

Em 1984 uma falha em dutos subterrâneos da Petrobras espalhou 700 mil litros de gasolina nos arredores da Vila Socó, em Cubatão (SP). A imagem de uma casa totalmente

destruída, depois do acidente, pode ser visualizada na Fig. 1. Após o vazamento, um incêndio destruiu parte da favela. No total foram contabilizados 93 mortos.



Figura 1: Acidente na Vila Socó em 1984. Fonte disponível no (SOCO, 1984)

No ano de 1997 o rompimento de um duto da Petrobras que liga a Refinaria de Duque de Caxias (RJ) provocou o derramamento de 2,8 milhões de óleo combustível em manguezais na Baía de Guanabara (RJ), afetando a biodiversidade da região. No ano de 2000, em Araucária no estado do Paraná, Brasil, estima-se que quatro milhões de litros de óleo tenham sido despejados nos rios Barigui e Iguazu, por causa de uma ruptura de uma tubulação da Refinaria Presidente Getúlio Vargas. No ano de 2014, um vazamento de gás causou um incêndio deixou ao menos 25 mortos e 270 feridos em Kaohsiung, Taiwan. A explosão seguida de incêndio, destruiu a cidade taianesa, conforme pode ser observado na Fig. 2. Uma das maneiras de evitar esses acidentes, é realizar inspeções regularmente.

A inspeção dos dutos pode ser realizada manualmente por um técnico especializado utilizando um sensor não destrutivo. Dessa forma, o técnico posiciona o sensor em lugares diferentes da superfície, os quais são escolhidos aleatoriamente ou após identificação visual das zonas mais comprometidas. Dependendo do sensor, o uso dessa técnica em larga escala dependeria tempo, por isso, a escolha de pontos específicos para inspeção. A desvantagem dessa técnica é que os pontos mais comprometidos podem passar despercebidos por erro humano, aumentando a probabilidade de havendo, portanto, a possibilidade de ocorrência de acidentes graves mesmo com a inspeção.

O desenvolvimento tecnológico e o aumento significativo da utilização de dutos na indústria impulsionou a criação de soluções para inspeção em larga escala em menor tempo. Uma das soluções propostas é a realização de inspeção dos dutos na parte in-



Figura 2: Acidente em Taiwan. Fonte: disponível em (TAIWAN, 2014)

terna utilizando estruturas mecânicas ou até mesmo robôs. Essas soluções permitem o acoplamento de diversos sensores para inspeção da superfície interna, além de sensores para identificação da postura do robô dentro do duto. Dessa forma, as informações de degradação interna da superfície e da posição da degradação podem ser adquiridas pelo operador remotamente.

O Grupo de Automação e Robótica Inteligente (NAUTEC), pertencente ao Centro de Ciências Computacionais (C3) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), desenvolveu uma plataforma robótica capaz de realizar ensaios não destrutivos em diferentes diâmetros de dutos. A utilização dessa plataforma por técnicos de inspeção, permite auxiliar na tomada de decisão para troca ou não de partes do duto em análise. Essa plataforma foi construída, inicialmente, para aprimorar os procedimentos de inspeção durante o período de manutenção da Refinaria de Petróleo Riograndense (RPR), situada no município de Rio Grande. Uma das vantagens desse modelo, é a adaptabilidade de diferentes diâmetros de duto. No entanto, devido a razões de segurança, a estrutura mecânica é guiada apenas por cabos de aço, sendo necessário o uso de reboque para deslocar-se dentro do duto. Uma outra desvantagem, é o uso em trechos horizontais, pois é necessário atravessar os cabos de aço. O protótipo fornece o espaço para acoplamento de três câmeras posicionadas em um círculo com distância angular de 120 graus na parte frontal. Assim, é possível obter o imageamento de toda a superfície interna do duto, conforme pode ser visualizado na Fig. 3.

A aplicação de robôs e plataformas móveis para inspeção de dutos trouxeram desafios relacionados a navegação e localização em tempo real (*Simultaneous Localization and Mapping - SLAM*). O SLAM está relacionado com o problema de construção de um mapa em um ambiente desconhecido por um robô móvel enquanto ao mesmo tempo navega no ambiente usando o próprio mapa construído (RIISGAARD; BLAS, 2012). Dessa forma, o técnico pode realizar a inspeção remotamente obtendo as informações de posição



Figura 3: DutoBot dentro do duto

e orientação da plataforma dentro do duto e, assim, encontrar a posição das falhas dentro do duto.

Este trabalho tem por objetivo propor um método para localização, aplicado a uma plataforma desenvolvida para inspecionar os dutos da Refinaria de Petróleo Rio-grandense (RPR). Para isso, serão utilizados uma unidade de medida inercial (UMI) e um *encoder* de baixo custo. Assim, o uso independente desses sensores diminui a confiabilidade da aquisição da atitude (orientação nos eixos de rolagem e arfagem) do protótipo, conseqüentemente, a aquisição da atitude das falhas é comprometida. Para contornar esse problema, é proposta a utilização de uma técnica de fusão sensorial que tem por objetivo dar maior consistência para os dados obtidos.

O Capítulo 2 apresenta de forma sucinta os robôs mais referenciados na área de inspeção de dutos e também, uma breve descrição de sensores para inspeção e aquisição de posição e orientação dos robôs. No capítulo 3 está descrito os fundamentos de navegação e localização simultâneos (SLAM) e alguns trabalhos relacionados à inspeção de tubulações. A metodologia proposta para aquisição de posição e orientação está descrita no Capítulo 4. No Capítulo 5 se apresenta os resultados de simulação e resultados experimentais obtidos com o protótipo desenvolvido. Por fim, no capítulo 6 estão algumas conclusões e discussões sobre os resultados deste trabalho e, também, indicações de trabalhos futuros para o avanço deste projeto de pesquisa.

2 Conceitos Básicos de Inspeção de Dutos

A detecção de falhas aplicados na inspeção de dutos é um procedimento que visa quantificar a vida útil da tubulação. Os dutos de aço carbono (encontrados na Refinaria RIOGRANDENSE) possuem maior potencial corrosivo, devido a contaminantes no material a ser transportado (GEREMIA, 2012).

Em empresas de refino de petróleo e petroquímica existem diversos processos de separação do petróleo bruto em petróleo utilizável. Para isso, centenas de metros de tubulações são empregadas para transporte do petróleo e seus derivados dentro da empresa em diversas etapas de produção. No entanto, a presença de contaminantes no petróleo podem causar problemas de formação de incrustação no interior da tubulação. Como consequência, o líquido escoante flui com maior velocidade para a mesma vazão.

Uma das maneiras de detectar esses problemas é realizar inspeções regularmente. A realização de ensaios nos dutos podem ser dividida em dois métodos: Destrutivos (ED) e Não Destrutivos (END). Os ensaios destrutivos causam a destruição ao longo da inspeção, comprometendo a integridade do material a ser inspecionado. Por outro lado, ensaios não destrutivos são técnicas não invasivas para avaliar a integridade do material a ser inspecionado. As técnicas de END permitem verificar a presença de discontinuidades presentes na superfície externa e até mesmo interna do material, sem alterar suas propriedades. Por possuir esse tipo de característica, os ensaios não destrutivos são amplamente utilizados na inspeção de tubulações regulamentada pela norma (NR-13,).

Nesse capítulo são apresentados os conceitos de inspeção manual e inspeção automatizada de ensaios não destrutivos em tubulações.

2.1 Inspeção Manual

A inspeção manual ainda é aplicada em ambientes que possuem pequenas quantidades de tubulações. Além disso, esse tipo de inspeção é utilizado como metodologia complementar para inspecionar trechos já inspecionados por outras técnicas.

Existem diversos métodos de inspecionar manualmente por ensaios não destrutivos, tais como: gamagrafia, partículas magnéticas, emissão acústica, inspeção visual, ultra-som entre outros.

2.1.1 Gamagrafia, Radiografia e Radioscopia

O método é baseado na mudança de atenuação da radiação eletromagnética (Raios-X ou Gama), causada pela presença de descontinuidades internas, quando a radiação passar pelo material e deixar sua imagem gravada em um filme.

O ensaio de radiografia foi o primeiro método de ensaio não destrutivo aplicado na indústria para inspecionar defeitos internos em materiais (BARROSO, 2011). Este método de ensaio possui um vasto campo de aplicação incluindo ensaio de soldas de chapas para tanques, navios, oleodutos entre outros. Segundo (GEREMIA, 2012), o Raios-X industrial abrange varias técnicas, sendo elas Radiografia, Gamagrafia e Radioscopia.

A Radiografia usufrui de imagens via filme radiográfico, com gerador de Raios-X por ampola de metal cerâmica. Gamagrafia, utilizando da mesma técnica faz uso de Iridio, Cobalto ou Selênio para obtenção das imagens via filme.

Já a radioscopia pode ser caracterizada por manipular a peça a distância dentro de uma cabine a prova de radiação, proporcionando uma imagem instantânea de toda peça em movimento. As imagens podem ser agrupadas por um software possibilitando um efeito de cortes mostrando as descontinuidades em três dimensões.

2.1.2 Partículas Magnéticas

O método de ensaio está baseado na geração de um campo magnético que percorre toda a superfície do material ferromagnético, conforme pode ser visualizado na Fig. 4. As linhas magnéticas do fluxo induzido no material desviam-se de sua trajetória ao encontrar uma descontinuidade superficial ou sub superficial(JILES, 1990). No instante em que se provoca esta magnetização na peça, aplicam-se as partículas magnéticas por sobre a peça que será atraída à localidade da superfície que contiver uma descontinuidade, ou seja, será possível encontrar o local de falhas.



Figura 4: Técnica de inspeção baseada na geração de campo magnético. Disponível em (INSPECAO...,)

2.1.3 Emissão Acústica

O método baseia-se na detecção de ondas acústicas emitidas por um material em função de uma força ou deformação aplicada nele. Caso este material tenha uma trinca, descontinuidade ou defeito, a sua propagação irá provocar ondas acústicas detectadas pelo sistema.

2.1.4 Líquido Penetrante

O líquido penetrante pode ser aplicado com o auxílio de instrumentos manuais como pincel, pistola, aerossol ou imersão da superfície a ser ensaiada, conforme pode ser visualizada na Fig. 5. Após o tempo de espera de penetração do líquido no duto, efetua-se a retirada do líquido da superfície, com água ou solventes, para então, aplicar um revelador ou talco que irá reagir com o líquido penetrante e mostrar a localização de falhas superficiais com precisão (BARROSO, 2011). As principais vantagens são a velocidade de teste e os baixos custos relacionados à aplicação dessa técnica. As desvantagens estão relacionadas à detecção de somente falhas superficiais. Além disso, em certas superfícies com contraste de cores acentuadas a técnica pode apresentar imprecisão (KOHAN, 1997).



Figura 5: Técnica de inspeção baseada em líquido penetrante. Disponível em (LIQUIDO...,)

2.1.5 Inspeção Visual

A inspeção visual é um importante recurso na verificação de alterações dimensionais, padrão de acabamento superficial e na observação de descontinuidades superficiais tais como trincas, corrosões, deformações, alinhamento, cavidades, porosidade entre outros. Na Fig. 6 pode-se visualizar um técnico realizando a inspeção visual na tubulação.

Para inspeção de espaço confinado, como dutos, a inspeção visual pode ser realizada por micro câmeras de TV com alta resolução com um excelente sistema de iluminação. A inspeção visual apresenta como desvantagem baixa precisão, principalmente em ambientes escuros. No entanto, apresenta baixo custo de operação.



Figura 6: Técnica de Inspeção Visual. Disponível em ([VISUAL...](#),)

2.1.6 Ultra-Som

Os ensaios de ultra-som utilizam dispositivos de estado sólido projetados para detecção sem contato de objetos sólidos ou líquido. A técnica é utilizada para determinar a espessura da tubulação (LOPES et al., 2010).

O princípio de funcionamento está baseado na geração de um pulso ultra sônico transmitido através de um transdutor especial, encostado ou acoplado ao material. Os pulsos sônicos refletidos por uma descontinuidade são captados pelo transdutor, e consequentemente convertidos em sinais elétricos e mostrados na tela LCD, conforme a Fig 7. A vantagem desse método de inspeção não destrutivo está relacionada à alta sensibilidade na detecção de pequenas falhas internas. A desvantagem é relacionada à exigência do conhecimento teórico por parte do técnico.



Figura 7: Técnica de Ultra-Som. Disponível em ([INSPECAOULTRASOMTESTE,](#))

2.1.7 Fuga de Campo Magnético

Um ímã permanente forte é introduzido na parte interna do duto de forma que quase satura as parede dos dutos com o fluxo magnético fluindo na direção axial. Quando

uma anomalia é encontrada no duto, uma porção do fluxo se perde. Essa perda de fluxo pode ser detectada por um sensor Hall (NESTLEROTH; BUBENIK, 1999).

2.2 Inspeção Robotizada

Nessa seção, são apresentados os principais robôs encontrados na literatura capazes de inspecionar tubulações divididas de acordo com o sistema de locomoção (TUR; GARTHWAITE, 2010). A escolha de uma solução robotizada depende do tipo de tubulação, do produto a ser transportado e a variação de diâmetro dos dutos. Após o levantamento inicial desses dados, define-se a melhor forma de locomoção do robô de acordo com a classificação pré-estabelecida na literatura: *PIG*, rodas, lagarta, com pernas, cobra e *inch-worm*. Além disso, a escolha do tipo de sensor para inspecionar, bem como o método de aquisição da pose do robô é importante para localizar e identificar as possíveis falhas dentro do duto.

2.2.1 Sistema de Locomoção *PIG*

Os dispositivos do tipo *PIG* são equipamentos modulares inseridos dentro dos dutos e movimentados pelo próprio fluido dentro do duto com o intuito de limpar ou até mesmo inspecionar a superfície interna (OKAMOTO et al., 1999; REBER et al., 2002; TIANLU et al., 2005; WANG et al., 2008; WANG et al., 2010). A principal desvantagem dessa aplicação é a dificuldade de inspecionar em trechos verticais de dutos, além da necessidade de utilizar o fluido responsável por deslocar o dispositivo.

Em (REBER et al., 2002; TIANLU et al., 2005; WANG et al., 2008) descrevem robôs inteligentes autônomos que utilizam sensores ultrasônicos para detectar defeitos além de enviar as informações para serem gravadas e analisadas posteriormente no computador. Um robô com 128 sensores ultra-sônicos que inspeciona dutos de 150mm a 350mm de diâmetro com a distância de 20km é proposto no artigo (TIANLU et al., 2005). Em outro trabalho, o robô proposto possui 32 sensores ultrasônicos e utilizam comunicação de baixa frequência para comunicar com o computador central (WANG et al., 2010). No entanto, a comunicação sem fio limita o alcance de 11m, conforme pode ser visualizado na Fig. 8.

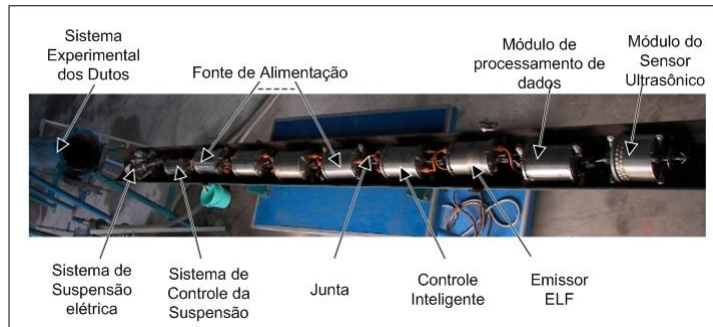


Figura 8: Robô proposto por (WANG et al., 2010).

Em um outro trabalho, um robô é proposto para inspecionar os dutos, no entanto, não especifica o número de sensores ultra-sônicos (REBER et al., 2002). Esses sensores são aplicados para medir a espessura da parede e detecção de buracos na superfície interna.

A inspeção pode ser realizada entre 508mm e 1422mm e a detecção de buracos entre 508 e 1066mm como pode ser visualizado na Fig. 9. A maioria dos robôs do tipo PIG utiliza encoder (hodômetro) para obtenção da posição. Um trabalho sugere a utilização de UMI com encoder usando uma técnica de fusão sensorial (SANTANA; MARUYAMA; FURUKAWA, 2010).



Figura 9: (REBER et al., 2002).

2.2.2 Sistema de Locomoção por Rodas

Os robôs do tipo com rodas são do tipo de locomoção ativa que mantém contato com a superfície interna do duto. Os robôs podem adaptar-se facilmente com o diâmetro do duto usando molas ou motores de corrente contínua (DC) para tracionar as rodas em direção as paredes do duto como em (CHOI; RYEW, 2002; FJERDINGEN et al., 2009; KEPLIN; SCHOLL; BERNIS, 1999; LI et al., 2008; LU et al., 2007; MASUTA et al., 2013; ROH; CHOI, 2005; SCHEMPF et al., 2003; SCHOENEICH et al., 2010; SCHOLL et al., 2000; TÂCHE et al., 2009; TÂCHE et al., 2010; WALTER et al., 2012).

Nos artigos (CHOI; RYEW, 2002) e (ROH; CHOI, 2005) estão presentes robôs semi autônomos para inspecionar dutos de gás urbanos. O robô conhecido como MRINSPECT IV ((ROH; CHOI, 2005)) é um robô diferencial em miniatura que inspeciona dutos de 85 a 109 mm de diâmetro conforme pode ser visualizado na Fig. 11, enquanto que (CHOI; RYEW, 2002) é uma estrutura modular articulada que inspeciona dutos de 160-240mm

de diâmetro conforme a Fig. 10. A aquisição da posição dentro do duto é realizada através da identificação visual de pontos, como por exemplo, bifurcações e curvas presentes no trabalho (CHOI; RYEW, 2002). Para obter a posição do MRINSPECT IV é utilizado a construção 3D chamado de *Virtual Map*.

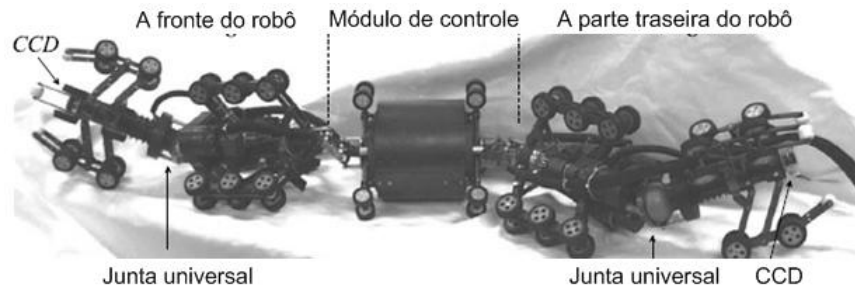


Figura 10: Proposta de Inspeção em (CHOI; RYEW, 2002).

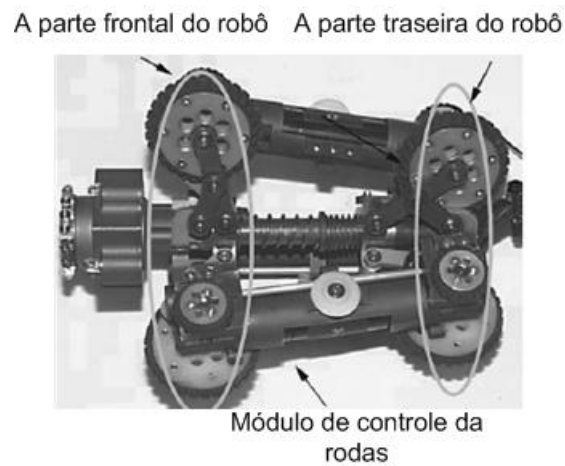


Figura 11: Proposta de Inspeção em (ROH; CHOI, 2005).

Em (MASUTA et al., 2013) está presente um robô semi-autônomo capaz de inspecionar dutos verticais. Esse robô é modular, ou seja, é composto por 3 módulos, parte rotacional, central e parte fixa de acordo com a Fig. 12. O robô pode operar em dutos de 150 a 500 mm de diâmetro. A posição do robô é adquirida através de uma câmera CCD e um laser afim de identificar a forma dos dutos e a distância em relação a possíveis obstáculos.

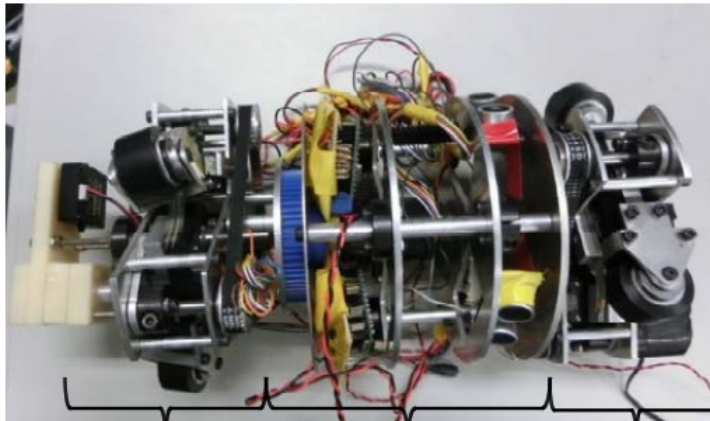


Figura 12: Proposta de Inspeção em (MASUTA et al., 2013).

Estimava-se que no ano de 1998 mais de 20% das tubulações de água da Alemanha estivessem danificadas por causa da idade da tubulação. Dessa forma, a construção de um robô autônomo (Karo) foi proposta como solução para inspecionar as tubulações (KUNTZE; HAFFNER, 1998), o protótipo real pode ser visualizado na Fig. 13. Esse robô é capaz de detectar o tipo de tubulação, a localização e o tamanho da falha. A parte frontal do robô é composta por uma câmera de alta resolução sensores ópticos, sensores ultrassônicos e um sensor de micro ondas. O sistema do robô permite detectar anomalias on-line durante a movimentação do robô dentro da tubulação. Além disso, um sistema de fusão e classificação de falhas baseado em lógica fuzzy foi aplicado.

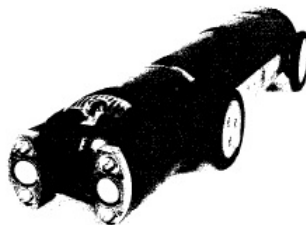


Figura 13: Proposta de Inspeção em (KUNTZE; HAFFNER, 1998).

2.2.3 Sistema de Locomoção por Lagarta

Os robôs do tipo lagarta possuem vantagens em relação aos robôs com rodas pela facilidade de transportar-se em terrenos muito acidentados. Por outro lado, os robôs

do tipo lagarta são maiores e mais complexos de controlar do que os demais tipos de locomoção, isso implica em maior gasto de energia para realizar as tarefas de inspeção. Os robôs desse tipo são descritos em (KIM et al., 2009; KIM; SHARMA; IYENGAR, 2010; KWON; YI, 2012; SCHOENEICH et al., 2011).

FAMPER é um robô autônomo composto por 4 lagartas que pressionam a superfície interna do duto (KIM; SHARMA; IYENGAR, 2010). FAMPER pode ser usado para inspecionar dutos de esgoto/água de 150 mm de diâmetro, conforme pode ser visualizado na Fig. 14. FAMPER possui uma camera RF-CCD que envia os dados via *stream* para a central do computador. O sensor sonar é aplicado para encontrar a posição de obstáculos e/ou curvas.

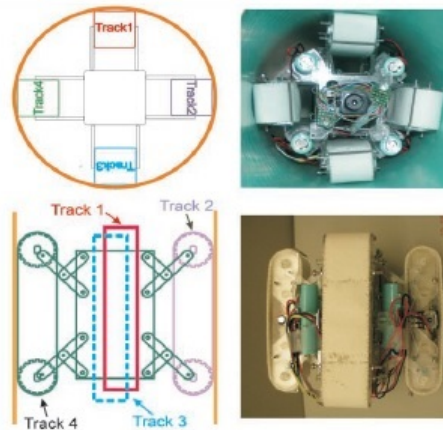


Figura 14: Proposta de Inspeção em (KIM; SHARMA; IYENGAR, 2010).

Um outro robô semi autônomo modular é descrito como um robô capaz inspecionar dutos de 80-100mm (KWON; YI, 2012), conforme pode ser visualizado na Fig. 15. Os módulos são conectados por molas que permitem navegar em diversos segmentos de dutos. O sistema é composto por um micro motor de corrente contínua com um encoder para obtenção da posição dentro do duto.



Figura 15: Proposta de Inspeção em (KWON; YI, 2012).

Um robô lagarta do tipo magnético foi construído no formato triangular para inspecionar dutos ferromagnéticos chamado de TRIPILLAR (SCHOENEICH et al., 2011), conforme a Fig. 16. Para calcular a posição e orientação do robô é utilizado o Arduino Mega, para então, enviar os dados para o computador central.

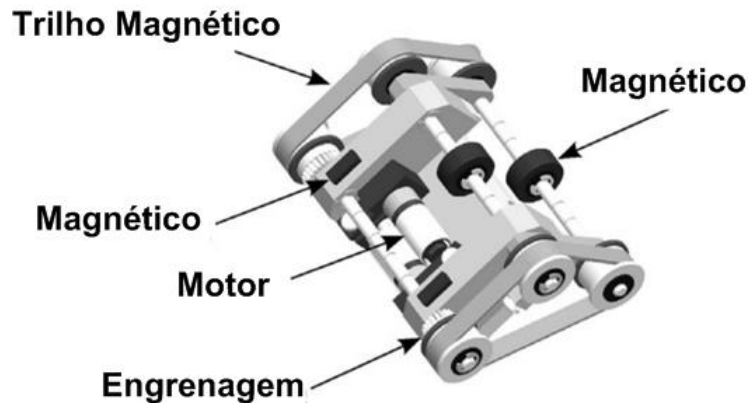


Figura 16: A visão 3D do robô TRIPILLAR.

Outro tipo de robô lagarta é composto por três hastes espaçadas 120 graus (KIM et al., 2009). Esse robô possui um controlador Proporcional Derivativo (PD) responsável por forçar as hastes em direção à superfície interna da tubulação, conforme a Fig. 17. O uso é indicado para inspecionar as tubulações de água com variação de 600 a 800 mm de diâmetro. A interface de sensoriamento consiste de encoders e sensores infravermelhos.

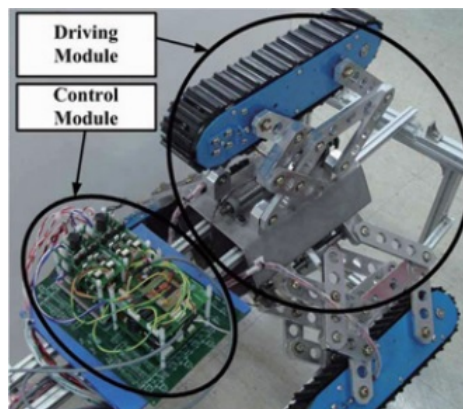


Figura 17: Proposta de robô para inspecionar tubulações de água (KIM et al., 2009)

2.2.4 Sistema de Locomoção do tipo Cobra

Os robôs do tipo cobra são aplicados em dutos com pequenos diâmetros. Esse tipo de locomoção é composto por diversos módulos que implicam no desenvolvimento de controles mais complexos, apresentando maior adaptabilidade em ambientes irregulares. Alguns robôs desse tipo podem ser encontrados em (BORENSTEIN; BORRELL, 2008;

DEBENEST; GUARNIERI; HIROSE, 2014; ROLLINSON; CHOSET, 2014; RUGGIU et al., 2001; SUZUMORI; WAKIMOTO; TAKATA, 2003; TSURUTA et al., 2000; YOON; PARK, 2010).

PiKo é um robô modular semi autônomo composto por rodas em cada módulo (FJERDINGEN et al., 2009). Em cada módulo, um microcontrolador Atmel AT90CAN128 MCU é instalado. O design do robô PiKo pode ser visualizado na Fig. 18. A posição é adquirida utilizando um encoder magnético. Os autores sugerem o uso de informações oriundas de uma câmera 3D para corrigir o erro cumulativo do encoder magnético (THIELEMANN; BREIVIK; BERGE, 2008). A câmera que capta 3D é utilizada para inspecionar as tubulações.



Figura 18: O robô Piko (FJERDINGEN et al., 2009).

Um robô do tipo cobra chamado *Explorer* foi desenvolvido para inspecionar dutos de 152 a 203 mm no sistema de transmissão de gás (SCHEMPF et al., 2003). Nesse robô, é utilizada uma câmera CCD para inspecionar a superfície interna do duto. O robô envia as informações da câmera e dos sensores remotamente. Para obter a posição do robô, é utilizada uma roda passiva com um sistema de encoder que determina a posição via *dead-reckoning*. O protótipo pode ser visualizado na Fig. 19.



Figura 19: O robô Explorer (SCHEMPF et al., 2003).

2.2.5 Sistema de Locomoção do tipo *Inch-worm*

Os robôs do tipo *inch-worm* são divididos basicamente em *clamber* e o atuador *extensor*. O *clamber* é usado para aderir o robô efetivamente no ambiente de locomoção, enquanto o *extensor* produz o movimento para frente (ANTHIERENS; CIFTCI; BETEMPS, 1999; CHOI; JUNG; KIM, 2004).

Um micro robô é usado para inspecionar tubos de 17mm de diâmetro em ambiente nuclear (ANTHIERENS; CIFTCI; BETEMPS, 1999). O robô é elétrico-pneumático con-

forme pode ser visualizado na Fig. 20. O compressor, servo válvulas, eletro-válvulas são usados para acionar os mecanismos de locomoção e um sensor *Hall* é usado para obter a posição do robô.

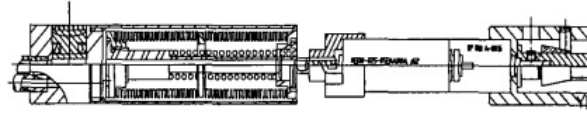


Figura 20: Proposta de Inspeção em dutos pequenos (ANTHIERENS; CIFTCI; BETEMPS, 1999).

Um robô possui 12 SMA (*Shape Memory Alloy*) atuadores lineares, formando um cubo (YU; MA; CAO, 2005). Esse robô possui um design que facilita o deslocamento em ambientes com obstáculos dentro das tubulações. O design dessa robô pode ser visualizado na Fig. 21. O robô foi construído para inspecionar tubos de diâmetros de 25.4 mm à 50.8 mm. No entanto, a velocidade de movimentação é reduzida e o consumo de corrente do SMA é elevado. Essa é uma das razões que o robô não pode se mexer sem o cabo de alimentação.



Figura 21: Proposta de Inspeção em dutos pequenos (YU; MA; CAO, 2005).

Não existem muitos robôs na literatura que utilizam o método de locomoção do tipo *Inch-Worm* para inspeção de tubulações.

3 Metodologia Proposta para Aquisição da Attitude do Dutobot

Nesse capítulo, é apresentada a metodologia proposta para aquisição da postura do robô dentro da tubulação, bem como as principais características dos sensores que serão utilizados e as suas respectivas modelagens. Para a aquisição da orientação do robô, será utilizado uma Unidade de Medida Inercial (UMI) e a posição será obtida utilizando um encoder com a saída linear do acelerômetro da UMI.

Segundo (SANTANA; FURUKAWA, 2006), as UMIs podem ser classificadas em três categorias: alta, média e baixa qualidade.

As UMIs de alta qualidade são capazes de navegar e sentir mudanças nas orientações com boa precisão por horas. As UMIs de média qualidade requerem auxílio de sensores externos para manter o mesmo desempenho que as UMIs de alta qualidade. A utilização de UMIs de média qualidade permite a utilização de boa precisão durante minutos. As UMIs de baixa qualidade operam em curtos intervalos de tempo (alguns segundos), sendo necessária a utilização de sensores externos para fornecer dados úteis. Nesse trabalho, será utilizada uma UMI de baixa qualidade.

3.1 Unidade de Medida Inercial- UMI

Uma unidade de medida inercial possui basicamente três acelerômetros e três giroscópios montados sobre eixos ortogonais coincidentes e fixados sobre uma mesma base rígida (TITTERTON; WESTON, 2004).

O acelerômetro é um sensor que mede a aceleração do corpo com a aceleração gravitacional. Na forma vetorial, a descrição da saída do acelerômetro é dada pela equação

$$\mathbf{f} = \mathbf{a} - \mathbf{g} \quad (3.1)$$

onde \mathbf{f} é o vetor força específica (saída do acelerômetro), \mathbf{a} é o vetor da aceleração com relação a um referencial inercial e \mathbf{g} é o vetor de aceleração gravitacional. Na Fig. 22 é possível observar um acelerômetro MEMS. A variância da capacitância de C1 e C2 altera conforme a aceleração que a massa sofre. Dessa forma, tem-se a relação entre uma grandeza física (aceleração) e uma grandeza eletrônica.

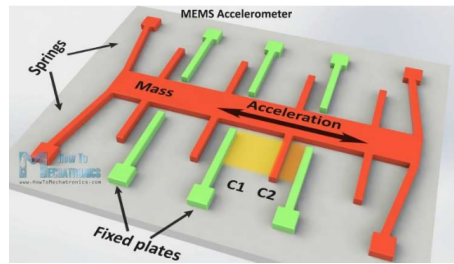


Figura 22: Funcionamento do Giroscópio MEMS

O giroscópio ou girômetro é um dispositivo formado por um corpo com simetria de rotação que gira ao redor do seu eixo de simetria. O princípio de funcionamento baseia-se na Lei da inércia de rotação. A inércia do plano de rotação mantém o giroscópio em sua posição inicial, durante o giro dos círculos, e ação desta força o impede de mudar de direção durante um movimento rápido dado à resistência proporcionada pela inércia.

Os giroscópios são classificados em três tecnologias de fabricação.

A primeira, é denominada giroscópios mecânicos. A figura que ilustra um giroscópio mecânico pode ser visualizado na Fig. 23. O princípio de funcionamento está relacionado com uma roda montada em um suporte especial. As argolas podem se movimentar em qualquer direção, permitindo ao eixo manter-se na mesma direção, mesmo que a base se mova.

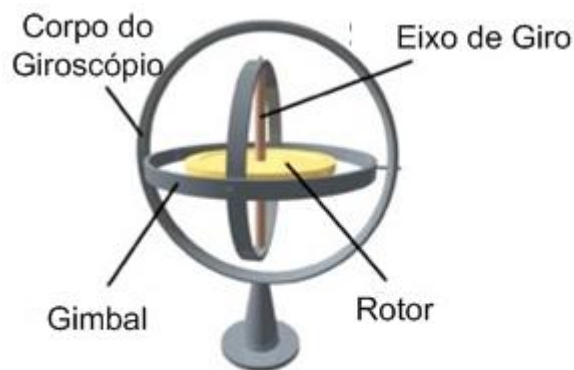


Figura 23: Giroscópio Mecânico.

A segunda geração, os giroscópios ópticos, conforme a Fig. 24, funcionam como raios de luz, ao invés de rodas. Esse tipo de giroscópio possui menor custo, volume e exatidão comparado ao giroscópio da primeira geração.

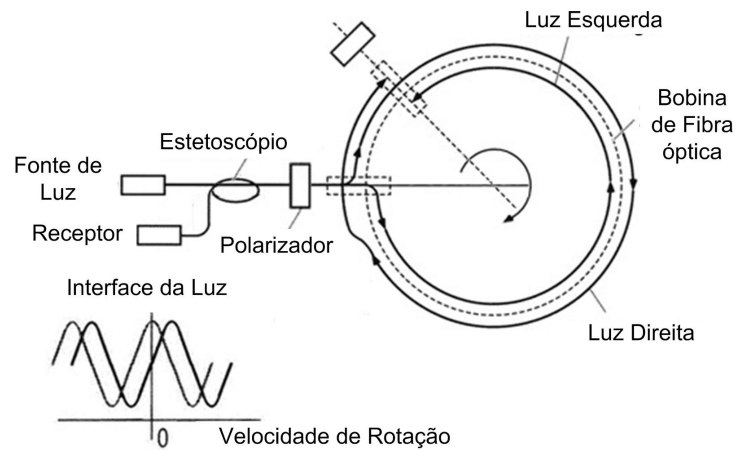


Figura 24: Funcionamento do Giroscópio Óptico. fonte: <http://http://www.neubrex.com/html/applications/gyro-principle.htm>

A terceira geração é formada pela tecnologia MicroEletroMecânicos (MEMS). A figura que ilustra essa geração pode ser visualizada na Fig. 25. Essa tecnologia pode ser entendida como um sistema eletromecânico projetado em escala micrométrica, formada por um sensor (e/ou atuador), uma interface analógica para aquisição, transmissão e amplificação do sinal originado do sensor e a parte de controle digital e processamento numérico. Essa geração apresenta menor custo e volume, no entanto, pior qualidade de medida.

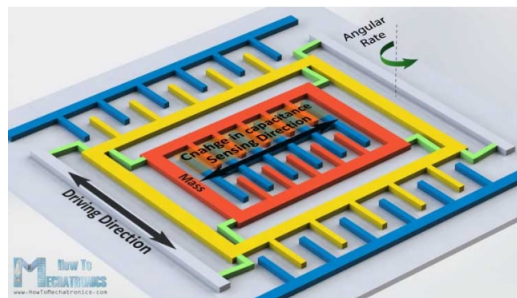


Figura 25: Funcionamento do Giroscópio MEMS

O giroscópio do tipo MEMS utiliza-se do efeito de Coriolis, ou seja, esse efeito imprime na massa um movimento em direção ortogonal à da rotação, de acordo com a Equação

$$\mathbf{F}_{\text{coriolis}} = 2m(\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}) \quad (3.2)$$

3.1.1 Modelagem da UMI

O comportamento dinâmico simplificado da unidade de medida inercial em termos de vetor de velocidade, pode ser expressa nas equações:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega} &= {}^gK\boldsymbol{\omega}_{real} + {}^g\mathbf{b} + {}^g\mathbf{v} , \\ \mathbf{a} &= {}^aK[{}^n_bC(\mathbf{g} + \mathbf{a}_{real})] + {}^a\mathbf{b} + {}^a\mathbf{v} ,\end{aligned}\tag{3.3}$$

onde, $\boldsymbol{\omega}$ é a saída do giroscópio, \mathbf{a} aceleração de saída da UMI, $\boldsymbol{\omega}_{real}$ é a velocidade angular real do giroscópio, \mathbf{a}_{real} é a aceleração real do acelerômetro, \mathbf{g} é a aceleração da gravidade. No modelo do acelerômetro e giroscópio, K é matriz conversão de escala, \mathbf{b} é o vetor de *bias* e \mathbf{v} é o ruído gaussiano.

O erro de *bias*, fator de escala, erro de quantização, *drift*, desalinhamento entre outros são exemplos de ruídos presentes em UMIs de baixo custo

O ruído de *bias* é um sinal tipicamente constante presente na medição, sendo que o sensor está parado. O vetor *bias* e o fator de escala do sensor inercial são funções dependentes do ambiente, em particular, da temperatura (SABATINI, 2006).

O erro de fator de escala refere-se a não correspondência direta do medido e do real, ou seja, a relação entre as grandezas observadas e reais não obedecem uma reta.

Um outro erro que pode estar presente é o desalinhamento mecânico entre os eixos, que originalmente, deveriam ser ortogonais.

A necessidade de implementação de UMI para uso prolongado exige que seja aplicada uma técnica de estimação e de extração do erro cumulativo.

3.2 Encoder

Os *encoders* são tipo de transdutores de posição, capazes de converter movimentos lineares ou angulares em sinais elétricos.

A leitura dos pulsos de um encoder é realizada através de um disco, formado de janelas transparentes e opacas alternadas, essas janelas são iluminadas perpendicularmente com uma fonte de luz infravermelha, onde o receptor do lado oposto do disco interpreta esse sinal em pulsos elétricos, conforme a Fig. 26.

Os encoders podem ser divididos em duas classes: Incremental e absoluto.

O encoder incremental fornece dois pulso quadrados defasados em 90 graus, chamados de canal A e B. A leitura de apenas um canal fornece a velocidade e não o sentido. Enquanto que a leitura de dois canais fornecem o sentido de movimento. A cada volta do encoder, existe uma quantidade fixa de pulsos e por isso a resolução de um encoder é dada por pulsos/revolução.

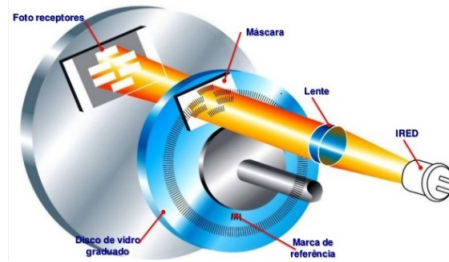


Figura 26: Funcionamento do Encoder. fonte: <http://sistemaembutido.com.br/article.php?id=34>

O encoder absoluto é basicamente igual ao encoder incremental. A diferença é que o incremental indica apenas um pulso para determinar o ponto zero, já o encoder absoluto possui distintos códigos que representam diferentes posições angulares. Dessa forma, mesmo que o encoder seja desligado, o encoder não perderá a informação de posicionamento.

3.3 Metodologia Proposta para Inspeção de dutos de óleo/gás

A utilização da UMI de baixo custo ao longo do tempo torna-se inviável devido ao acúmulo de erros. Existem diversas soluções relacionadas ao uso de UMI. Uma abordagem clássica é usada para aplicar uma técnica de estimação linear estendido (LEFFERTS; MARKLEY; SHUSTER, 1982; BARSHAN; DURRANT-WHYTE, 1995). Uma alternativa é usar um filtro complementar determinístico e um observador não linear (ZIMMERMANN; SULZER, 1991; BAERVELDT; KLANG, 1997; VIK; FOSSEN, 2001). Existem alguns trabalhos relacionados à fusão de dados da UMI com a informações da câmeras (LOBO; DIAS, 2003; REHBINDER; GHOSH, 2003; KIM; SUKKARIEH, 2003; CORKE et al., 2005) e o problema da fusão de dados e os dados do GPS (VIK; FOSSEN, 2001). Alguns trabalhos sugerem o uso da técnica de Mahony (MAHONY; HAMEL; PFLIMLIN, 2008), técnica de Madwick (MADGWICK, 2010) e filtro de Kalman estendido (FOXLIN, 2002).

A utilização da UMI em sistemas de navegação fornece informações relativas ao sistema de coordenadas local. Os sistemas de coordenadas utilizados em navegação inercial são constituídos por coordenadas cartesianas e sistemas de coordenadas esféricas (GREWAL; WEILL; ANDREWS, 2007). Segundo (SANTANA; FURUKAWA, 2006), os sistemas de coordenadas mais utilizadas são: Sistema *Earth-Centered-Inertial*-ECI, *Earth-Centered Earth-Fixed*-ECEF, *Local Tangent Plane*-LTP, *North-East-Down*-NED, *East-North-UP*-ENU, *Roll-Pitch-Yaw*-RPY e sistema curvilíneo mais detalhes (SANTANA; FURUKAWA, 2006).

O ECI possui o centro coincidente ao centro de massa da Terra sendo que o eixo X está direcionado na direção do equinócio vernal; o eixo Z está direcionado paralelamente

a rotação da terra e o eixo Y na direção que torna o sistema de coordenadas ortogonais obedecendo a regra da mão direita.

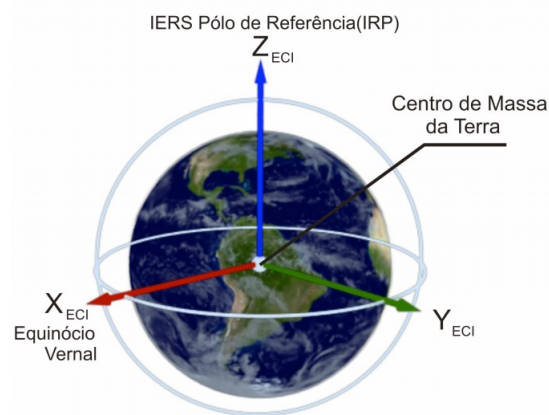


Figura 27: Sistemas de Coordenadas ECI (SISTEMA ECI,)

O ECEF é centrado e fixo na Terra sendo que o centro coincide ao centro de massa da terra. O eixo X passa através do equador no meridiano, o Eixo Z passa pelo pólo Norte e o eixo Y é determinado pela regra da mão direita, como pode ser melhor observado na Fig. 28.

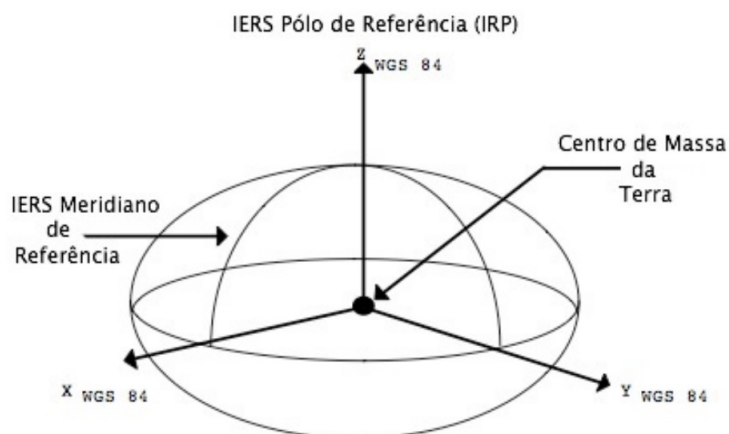


Figura 28: Sistemas de Coordenadas ECEF (Departament of Defense World Geodetic System 1984 et. al,2000)

O LTP considera a região de localização plana. Dessa forma, o eixo norte aponta na direção que a latitude cresce, o eixo leste aponta na direção em que a longitude cresce, e o eixo em cima aponta na direção que a altura cresce.

Serão utilizados dois sistemas de coordenadas nesse projeto, o sistema NED e sistema RPY. O sistema NED é conhecido como sistema de navegação local, onde a origem pode ser em qualquer ponto do globo terrestre. O sistema RPY é o sistema de navegação da plataforma, onde os eixos são fixos no robô.

3.3.1 Transformação de Coordenadas

Os girômetros ou giroscópios apresentam como saída a velocidade angular dos três eixos em relação ao sistema RPY. No entanto, quando o robô está realizando a operação de inspeção, deseja-se conhecer a posição e orientação em relação ao ponto de partida e não a ele próprio. Por isso, a aplicação de transformações de coordenadas faz-se necessária. Existe, basicamente, três métodos de transformações de coordenadas, Euler, quatérnios e matriz de cossenos diretores (*Direct Cosin Matrix -DCM*). Nesse trabalho, optou-se pela utilização do DCM para conversão de transformações.

Segundo (MURRAY et al., 1994), a notação de ângulos de Euler é um método para descrever as rotações de um corpo no espaço tridimensional em relação a um sistema fixo com três rotações consecutivas.

O método de conversão de referência utilizando quatérnios é amplamente utilizado em sistemas de navegação (GROSSEKATTHÖFER; YOON, 2012). O termo quatérnio refere-se a uma álgebra em quatro dimensões formulada pelo físico e matemático W.R Hamilton no século XIX (ALVES, 2004). A vantagem desse sistema é a não existência de singularidades, por exemplo, *gimbal lock*. No entanto, a desvantagem desse sistema de conversão de coordenadas é a utilização de 4 parâmetros que não são intuitivos fisicamente.

A matriz de cossenos diretores é uma técnica que utiliza a matriz de rotação para deslocar o referencial do corpo rígido para o referencial inercial desejado (EDWAN et al., 2011). Para tal, utiliza-se a matriz n_bC definida na forma:

$${}^n_bC = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_3 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Os elementos da matriz na Eq. 3.4 são funções trigonométricas dos ângulos de Euler (GARCIA; KUGA; ZANARDI,), definido na equação

$${}^n_bC = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta & c_\phi s_\theta s_\varphi - s_\phi c_\varphi & c_\phi s_\theta c_\varphi - s_\phi s_\varphi \\ s_\phi c_\theta & s_\phi s_\theta s_\varphi - c_\phi c_\varphi c_\phi & s_\phi s_\theta c_\varphi - c_\phi s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\theta c_\varphi \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

onde φ , θ , ϕ são ângulos de rolagem, arfagem e guinada respectivamente

A orientação em relação ao sistema (NED) é obtida através da técnica de DCM, onde a matriz de cossenos diretores está presente na Equação 3.6.

$${}^n_b\dot{C} = {}^n_bC [{}^b\omega \times], \quad (3.6)$$

onde, a definição de $[\omega \times]$ está na Eq. 3.7 (HYTYI; VISALA, 2015).

$$[{}^b\omega \times] = \begin{bmatrix} 0 & -b\omega z & b\omega y \\ b\omega z & 0 & -b\omega x \\ -b\omega y & b\omega x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

O método proposto para aquisição da pose do robô, pode ser visualizado na Fig. 29. Para a posição é proposta a utilização do filtro de Kalman, utilizando a fusão de dados entre o encoder e a UMI. No entanto, o modelo de orientação não é linear, por isso é proposto o filtro de Kalman estendido (EKF) para estimar o *bias* do giroscópios e os componentes da matriz de cossenos diretores.

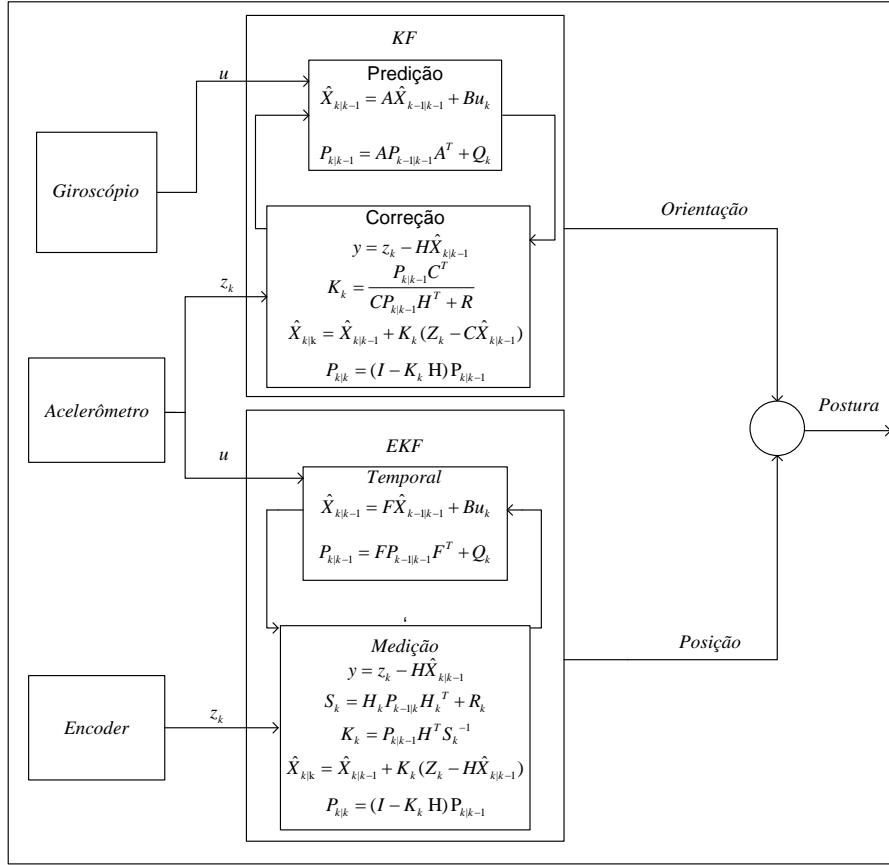


Figura 29: Modelo Proposto para Aquisição da Pose do Robô.

3.3.2 Filtro de Kalman

R.R. Kalman publicou em 1960 o seu famoso trabalho descrevendo uma solução recursiva para dados discretos lineares na filtragem de sinais. Desde a sua publicação, o filtro de Kalman tem sido aplicado em diversas áreas, como por exemplo, biomedicina, sensoriamento, processamento de sinais, controladores aeroespaciais e robótica com ênfase em SLAM para estimação e filtragem de estados (NEGENBORN, 2003; WELCH; BISHOP, 2006).

O filtro de Kalman é um estimador para o problema linear quadrático, que é o problema de estimação instantânea de um sistema linear dinâmico com perturbações de ruído branco (GREWAL, 2011). O filtro de Kalman é calculado em dois passos discretos independentes que são conhecidos como predição e correção.

As equações de predição do filtro de Kalman são

$$\hat{X}_{k|k-1} = A\hat{X}_{k-1|k-1} + Bu_k, \quad (3.8)$$

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q_k, \quad (3.9)$$

onde, $\hat{X}_{k|k-1}$, A_k , B_k , u_k , $P_{k|k-1}$ e Q_k representam respectivamente a média do estado predito, a matriz de transição de estados, matriz de controle, entrada do filtro, matriz de covariância do erro e matriz de covariância do ruído de processo. A matriz Q_k demonstra o quão aberto é a curva da distribuição gaussiana, ou seja, o quão preciso é o estado predito.

As equações da etapa de correção do filtro de Kalman são

$$y = z_k - C\hat{X}_{k|k-1}, \quad (3.10)$$

$$K_k = \frac{P_{k|k-1}C^T}{CP_{k|k-1}H^T + R}, \quad (3.11)$$

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k(z_k - C\hat{X}_{k|k-1}), \quad (3.12)$$

$$P_{k|k} = (I - K_kC)P_{k|k-1}, \quad (3.13)$$

onde, z_k é a saída do sensor, H é a matriz de observação, K_k é o ganho de Kalman, R é a matriz de covariância do ruído de medição e I é a matriz identidade da mesma dimensão tamanho do número de estados.

3.3.3 Filtro de Kalman Estendido

A aplicação de estimação de estados em sistemas não lineares é complicada devido à distribuição probabilística não ser caracterizada por média e covariância.

O filtro de Kalman Estendido (EKF) é o filtro de Kalman que lineariza a média e a covariância de um modelo não linear para ser tratado pelo filtro de Kalman.

O EKF requer o conhecimento do estado inicial para convergência da estimativa de estado. Além disso, é necessário conhecer o sistema e modela-lo adequadamente, caso contrário à linearização pode calcular a transição de estados erroneamente.

Apesar da ampla utilização do EKF, a aplicação dessa técnica de estimativa é de difícil ajuste e sua confiabilidade estabelece-se apenas em sistemas aproximadamente lineares (JULIER; UHLMANN, 1997).

A aplicação da linearização do EKF da-se pelo cálculo da matriz Jacobiano. Essa matriz contém todas as derivadas parciais de uma função, representando a melhor aproximação linear à função num ponto específico. O Jacobiano da matriz de transição e matriz de observação é dada por F e G respectivamente.

Seja X um vetor coluna com funções de f dado por

$$X = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

a matriz Jacobiana desse vetor é

$$J(f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

O filtro de Kalman estendido é dividido em etapa de atualização temporal e de atualização de medição.

As equações de atualização temporal são

$$\hat{X}_{k|k-1} = F_k \hat{X}_{k-1|k-1} + B_k u_k, \quad (3.16)$$

$$P_{k|k-1} = F P_{k-1|k-1} F^T + Q_k. \quad (3.17)$$

As equações de atualização de medição são

$$y = z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}, \quad (3.18)$$

$$S_k = H_k P_{k-1|k} H_k^t + R_k, \quad (3.19)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^t S_k^{-1}, \quad (3.20)$$

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k y, \quad (3.21)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}. \quad (3.22)$$

3.4 Representação da Aquisição da Pose por Espaço de Estados em Tempo Discreto

A representação por espaços de estados, torna-se necessária para a implementação do filtro de Kalman no tempo discreto. Isso decorre da necessidade de conhecer a matriz de transição, matriz de controle do sistema.

A representação por espaço de estados no tempo discreto é dado por

$$\begin{aligned} X(k+1) &= (AT + I)X(k) + BTu(k) \\ Y(k+1) &= CX(k+1), \end{aligned} \quad (3.23)$$

onde, a matriz I é a matriz identidade.

A representação por espaço de estados, nesse trabalho, é dividida entre a orientação e posição.

3.4.1 Orientação

O acelerômetro fornece informações da gravidade em relação aos eixos ortogonais. Considerando que não existam acelerações lineares, a projeção da gravidade sobre os eixos X, Y e Z é dado pela Equação

$$\mathbf{a} = \mathbf{f} - C^T \mathbf{g}, \quad (3.24)$$

ou seja,

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{c}_{11} & \hat{c}_{21} & \hat{c}_{31} \\ \hat{c}_{12} & \hat{c}_{22} & \hat{c}_{32} \\ \hat{c}_{13} & \hat{c}_{23} & \hat{c}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

Assume-se que a gravidade seja ortogonal ao plano xy e na direção de Z, isso implica na estimação de apenas a terceira coluna da matriz de cosseno diretores (HYTYI; VISALA, 2015). Logo, o sistema pode ser estimado por

$${}^n_b\dot{C}_n = \begin{bmatrix} {}^n_b\dot{C}_{31} \\ {}^n_b\dot{C}_{32} \\ {}^n_b\dot{C}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -{}^n_bC_{33} & {}^n_bC_{32} \\ {}^n_bC_{33} & 0 & -{}^n_bC_{31} \\ -{}^n_bC_{32} & {}^n_bC_{31} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

O modelo por espaço de estados proposto para orientação é dado pelos estados por

$$X_{or} = \left[{}^n_bC_{31} \quad {}^n_bC_{32} \quad {}^n_bC_{33} \quad {}^bb_x \quad {}^bb_y \quad {}^bb_z \right]^T. \quad (3.27)$$

O modelo de transição e a matriz de controle do modelo proposto são definidos nas equações

$$A_{or} = \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & {}^n_b\dot{C}_n \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (3.28)$$

$$B_{or} = \begin{bmatrix} 0 & -{}^n_bC_{33} & {}^n_bC_{32} \\ {}^n_bC_{33} & 0 & -{}^n_bC_{31} \\ -{}^n_bC_{32} & {}^n_bC_{31} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

onde, $O_{3 \times 3}$ é a representação de matriz nula.

Segundo (HYTYI; VISALA, 2015), a matriz jacobiana F e H são

$$F = \begin{bmatrix} [U_{\times}] & B_{or} \\ O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

onde $[U_{\times}]$ é definido como

$$[U_{\times}] = \begin{bmatrix} 1 & -T(\omega_z - b_z) & T(\omega_y - b_y) \\ -T(\omega_z - b_z) & 1 & -T(\omega_x - b_x) \\ -T(\omega_y - b_y) & \omega_x - b_x & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$H = \left[G_{3 \times 3} \quad O_{3 \times 3} \right] \quad (3.32)$$

Onde G é a matriz identidade multiplicada pela gravidade (g).

A matriz de covariância do erro é definido por

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_c^2 I_{3x3} & O_{3x3} \\ 0_{3x3} & \sigma_b^2 I_{3x3} \end{bmatrix}. \quad (3.33)$$

onde, σ_c é a variância do estado predito do DCM e σ_b a variância predita do bias do giroscópio.

3.4.2 Posição

A obtenção da posição do robô dentro do duto é realizado através da equação do movimento retilíneo uniforme no tempo discreto

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{k+1} &= \mathbf{p}_k + \mathbf{v}_k T \\ \mathbf{v}_{k+1} &= \mathbf{v}_k + {}^b \mathbf{a}_k T \end{aligned}, \quad (3.34)$$

onde, $\mathbf{v}(\mathbf{k})$ e ${}^b \mathbf{a}$ são os vetores velocidade e aceleração no sistema NED. A transformação da aceleração do sistema RPY para o sistema NED é

$${}^b \mathbf{a} = ({}^n C_k) + T_b^n \dot{C}_n \mathbf{a}, \quad (3.35)$$

sendo ${}^n C_k$ a matriz de cossenos diretores no instante k .

Os estados do sistema são

$$X_{pos} = \begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z & v_x & v_y & v_z \end{bmatrix}^T \quad (3.36)$$

A matriz de estados e de controle são

$$A_{pos} = \begin{bmatrix} I_{3x3} & (Ts)I_{3x3} \\ O_{3x3} & I_{3x3} \end{bmatrix}, \quad (3.37)$$

$$B_{pos} = \begin{bmatrix} O_{3x3} \\ (Ts)I_{3x3} \end{bmatrix}. \quad (3.38)$$

A matriz de observação é

$$C_{pos} = \begin{bmatrix} I_{6x6} \end{bmatrix}. \quad (3.39)$$

4 Resultados

As simulações foram realizadas utilizando o software MATLAB. Para isso, um conjunto de dados simulados foram criados com rotações nos eixos X e eixos Y e eixo Z durante 52s, onde a frequência de aquisição de dados é de 100Hz. Os movimentos simulados atingem os extremos de -90 à 90 graus, sendo um eixo de cada vez, conforme pode ser visualizado nas Figs. 30, 31 e 32.

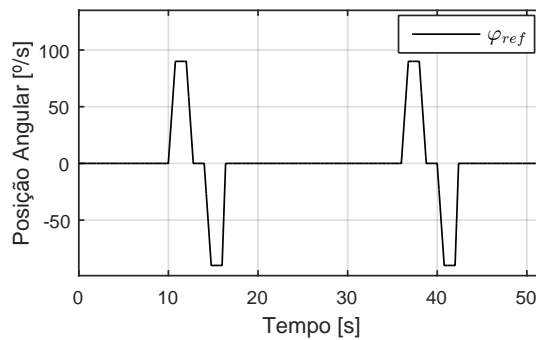


Figura 30: Posição angular de Referência no eixo X.

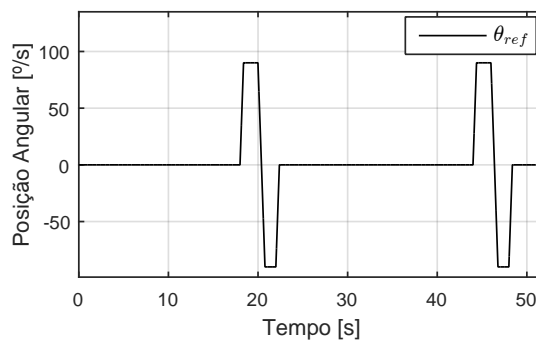


Figura 31: Posição angular de Referência no eixo Y.

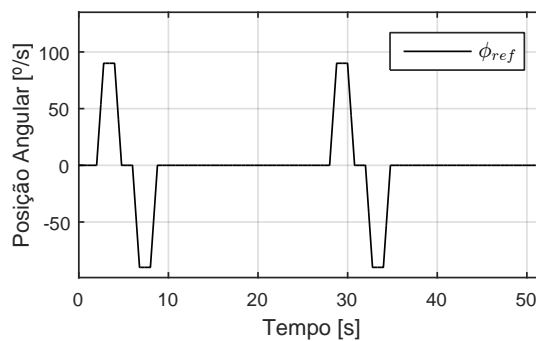


Figura 32: Posição angular de Referência no eixo Z.

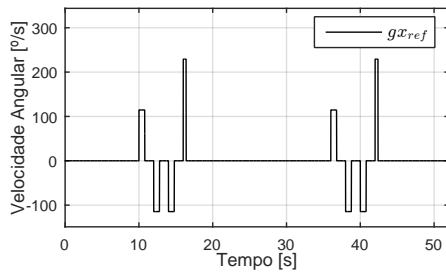
4.1 Relação entre Ângulos de Euler e Dados da UMI

A obtenção de posição angular de referência, permite obter os dados da aceleração e da velocidade angular da UMI simulada sem ruído. Logo, a velocidade angular de referência é dada por

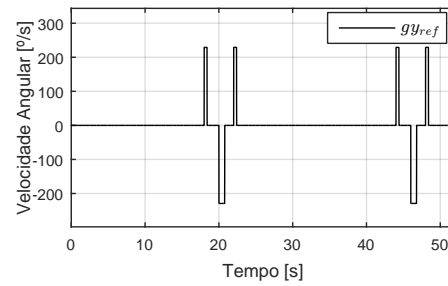
$$\boldsymbol{\omega}_{ref}(k) = \frac{\boldsymbol{\lambda}_{ref}(k+1) - \boldsymbol{\lambda}_{ref}(k)}{T_s} \quad (4.1)$$

onde, $\boldsymbol{\lambda}_{ref} = [\varphi \ \theta \ \phi]$ é a posição angular de referência nos três eixos no instante k e T_s é o tempo de discretização.

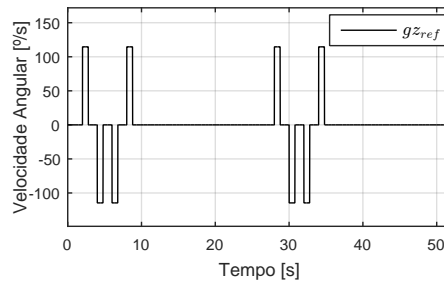
Nas Figs. 33(a), 33(b) e 33(c) é possível observar a saída do giroscópio simulado, onde gx_{ref} , gy_{ref} e gz_{ref} é a velocidade angular de referência nos eixos X, Y e eixo Z.



(a) Velocidade angular no eixo X.



(b) Velocidade angular no eixo Y.



(c) Velocidade angular no eixo Z.

Figura 33: Simulações das velocidades angulares de referência da UMI.

A relação entre o acelerômetro nos três eixos e ângulos de Euler (PEDLEY, 2013) é dada por

$$ax_{ref} = -\mathbf{g}s_{\theta} \quad (4.2)$$

$$ay_{ref} = \mathbf{g}c_{\theta}s_{\varphi} \quad (4.3)$$

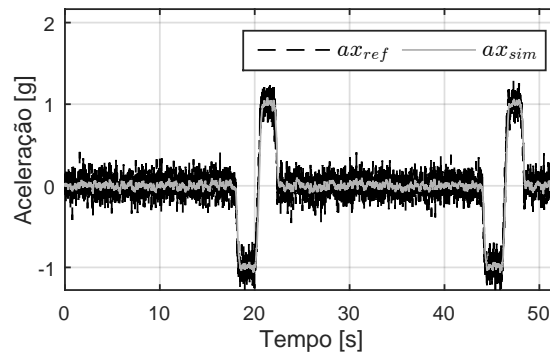
$$az_{ref} = \mathbf{g}c_{\theta}c_{\varphi} . \quad (4.4)$$

A saída do acelerômetro real é acrescida de diversos ruídos. O ruído pode ser representado por ruído gaussiano. Logo, a simulação da saída do acelerômetro é dada por

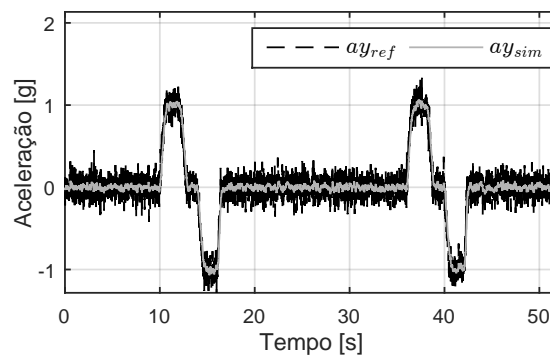
$$an_{gauss} = an_{ref} + (dp)randn \quad (4.5)$$

onde, n é a representação geral dos três eixos, dp é o desvio padrão associado ao ruído gaussiano e $randn$ é a função no Matlab para criação do ruído gaussiano.

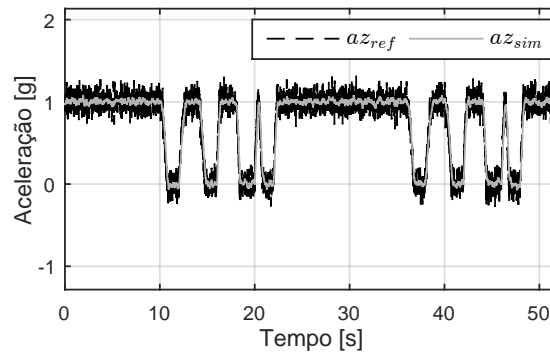
Nas Fig. 34(a), 34(b) e 34(c) pode-se visualizar as acelerações de saída do acelerômetro nos três eixos. Compara-se nessas figuras a aceleração sem ruído (a_{ref}) e acelerações com a inclusão de ruído gaussiano (a_{gauss}).



(a) Aceleração no eixo X.



(b) Aceleração no eixo Y.



(c) Aceleração no eixo Z.

Figura 34: Simulações da acelerações de saída da UMI sem ruído (a_{ref}) e com ruído nos três eixos (a_{gauss}).

Um dos fatores que alteram o bias do girômetro é a temperatura. Para simular esse comportamento, foram adicionados variações de temperatura no ambiente, conforme pode ser visualizado na Fig 35 e a saída do bias na Fig. 36. A relação entre a variação de temperatura e o bias está relacionado de forma linear.

A saída da integração dos dados do giroscópio e a posição angular de referência podem ser visualizadas nas Fig. 37(a), 37(b) e 37(c).

A saída do algoritmo DCM e a posição angular de referência no eixo X podem ser visualizadas nas Fig. 38(a), 38(b) e 38(c).

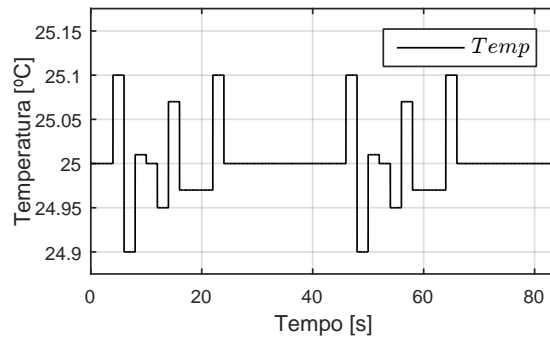


Figura 35: Variação da Temperatura.

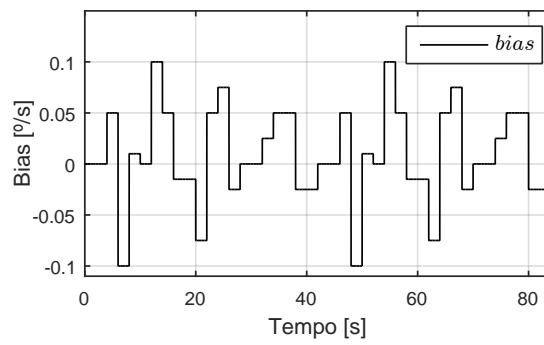
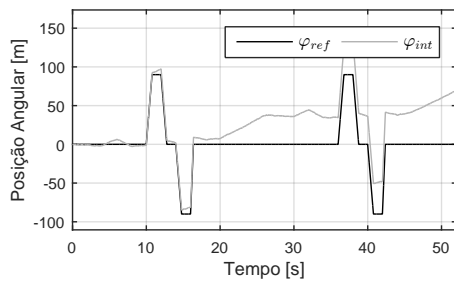
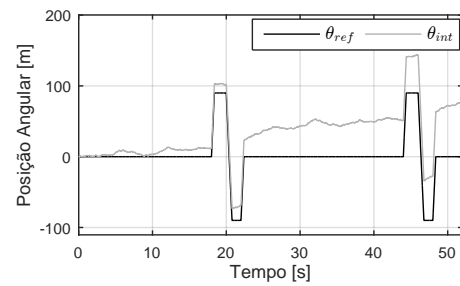


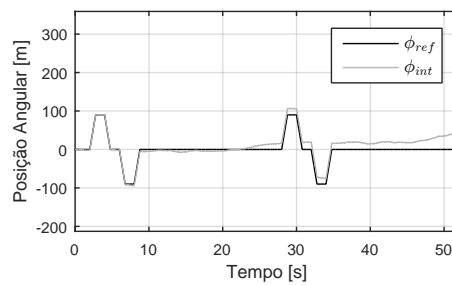
Figura 36: Variação do bias.



(a) Ângulo de Rolagem.



(b) Ângulo de arfamento.



(c) Ângulo de guinada.

Figura 37: Comparação entre a saída da integração do giroscópio e a referência de posição nos três eixos

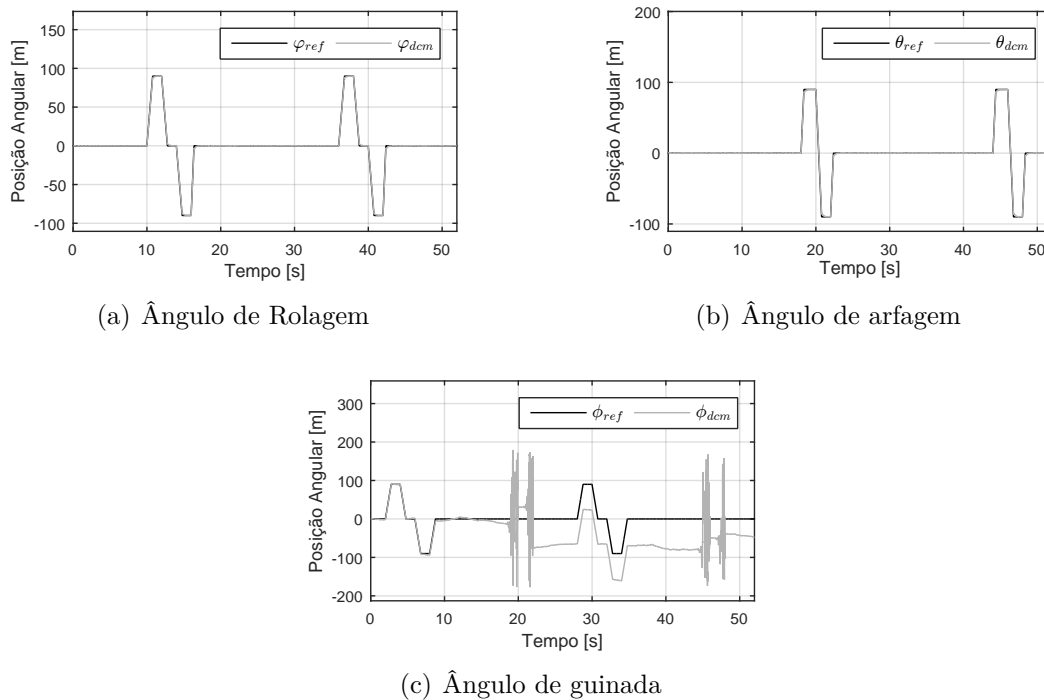


Figura 38: Comparação entre a saída da integração do giroscópio e a referência de posição

A diferença quadrática entre a saída da integração e a técnica de dcm apresentada nos eixos de rolamento, arfagem e guinada estão presentes nas Figs. 39(a), 39(b) e 39(c). Nessas Figuras é possível observar que o erro do algoritmo proposto é menor em relação ao método de integração do ângulo. A saída do giroscópio apresenta um erro de bias constante. Assim, o giroscópio não retorna para o valor inicial. A técnica de dcm proposta estima o valor de bias e reduz o erro de posição angular. No entanto, a técnica de dcm mostrou-se ineficaz no eixo de guinada, conforme pode ser visualizado o erro quadrático na Fig. 39(c). Para estimação do ângulo de guinada, utilizou-se os dados do giroscópio e acelerômetro no eixo Z. O uso do magnetômetro apresentaria melhores resultados. Em aplicações que contenham elementos magnéticos dificultam ou até mesmo impossibilitam o uso de magnetômetros, pois os mesmos sofrem interferências em suas leituras. Nas Figs 39(a), 39(b) e 39(c) concluí-se que em simulações a técnica de dcm apresentou resultados melhores na aquisição de atitude (rolagem e arfagem), conforme a Fig. 39.

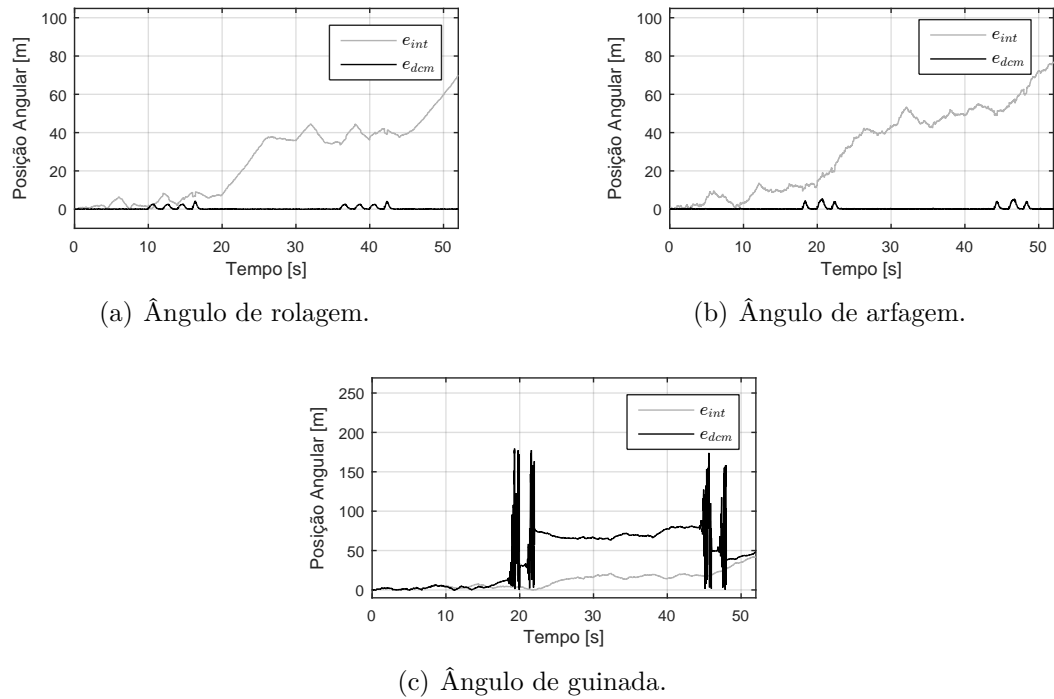


Figura 39: Erro entre a saída da integração do giroscópio e a técnica de DCM apresentada nos três eixos.

4.2 Simulando a Aquisição de Posição

Um circuito composto por rotações e deslocamentos nos três eixos foi simulado. Assim, é possível analisar o funcionamento do método de conversão de referência e extração da projeção da gravidade. O circuito de tubulações pode ser visualizado na Fig. 40.

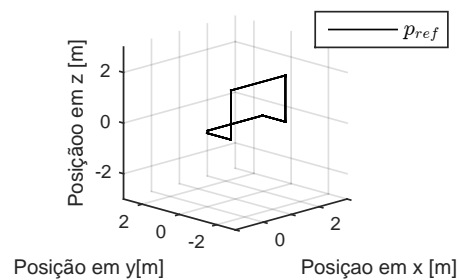
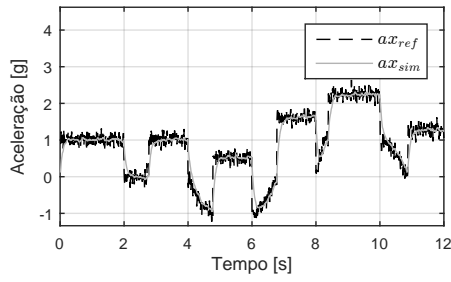


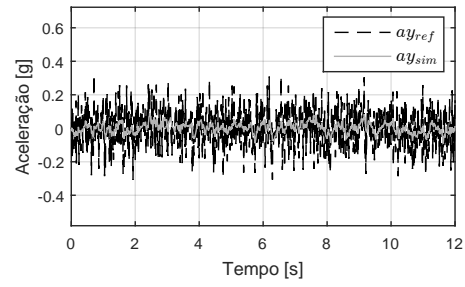
Figura 40: Circuito 3d de deslocamento da UMI

A saída do acelerômetro é dada pela soma da projeção da gravidade com a aceleração linear proveniente do deslocamento no eixo x, presente na Fig. 41(a), 41(b) e 41(c).

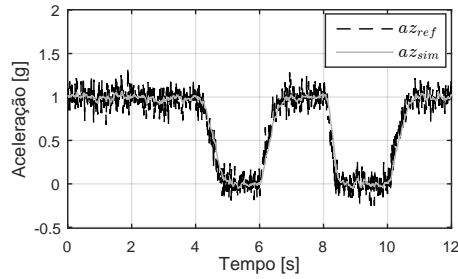
A estimação da orientação no eixo RPY possibilita a extração da projeção da gravidade. A relação entre a saída da aceleração da UMI simulada e da aceleração linear



(a) Aceleração no eixo x.



(b) Aceleração no eixo y.



(c) Aceleração no eixo z.

Figura 41: Aceleração simulada da UMI no sistema de coordenadas RPY.

nos três eixos é dada pelas equações

$$ax_{lin} = acx + g\sin(\theta_{dcm}) , \quad (4.6)$$

$$ay_{lin} = acy - g\sin(\varphi_{dcm})\cos(\theta_{dcm}) , \quad (4.7)$$

$$az_{lin} = acz - g\cos(\theta_{dcm})\cos(\varphi_{dcm}) . \quad (4.8)$$

Essas equações permitem obter as acelerações lineares transformadas para o sistema de coordenadas NED. Essas acelerações podem ser visualizadas na Fig. 42(a), 42(b) e 42(c) nos eixos x, y e z.

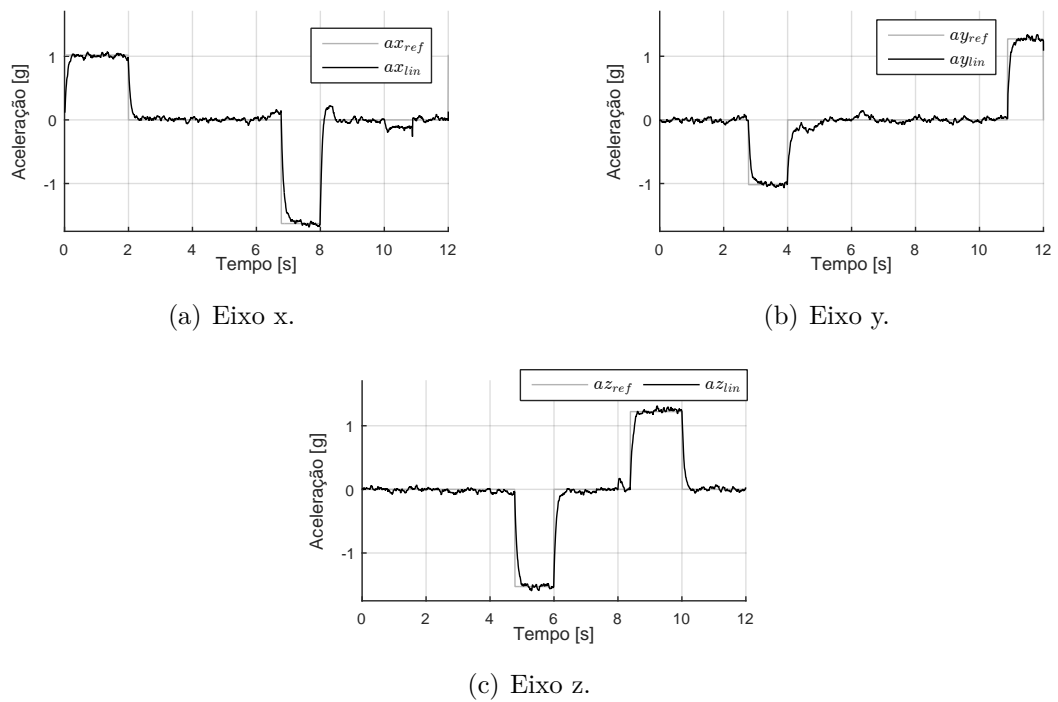


Figura 42: A saída de aceleração linear de referência (a_{ref}) e a saída de aceleração linear estimada (a_{lin}) no sistema NED.

Na Fig. 43 está presente a posição angular de referência e de saída do algoritmo proposto nos três eixos.

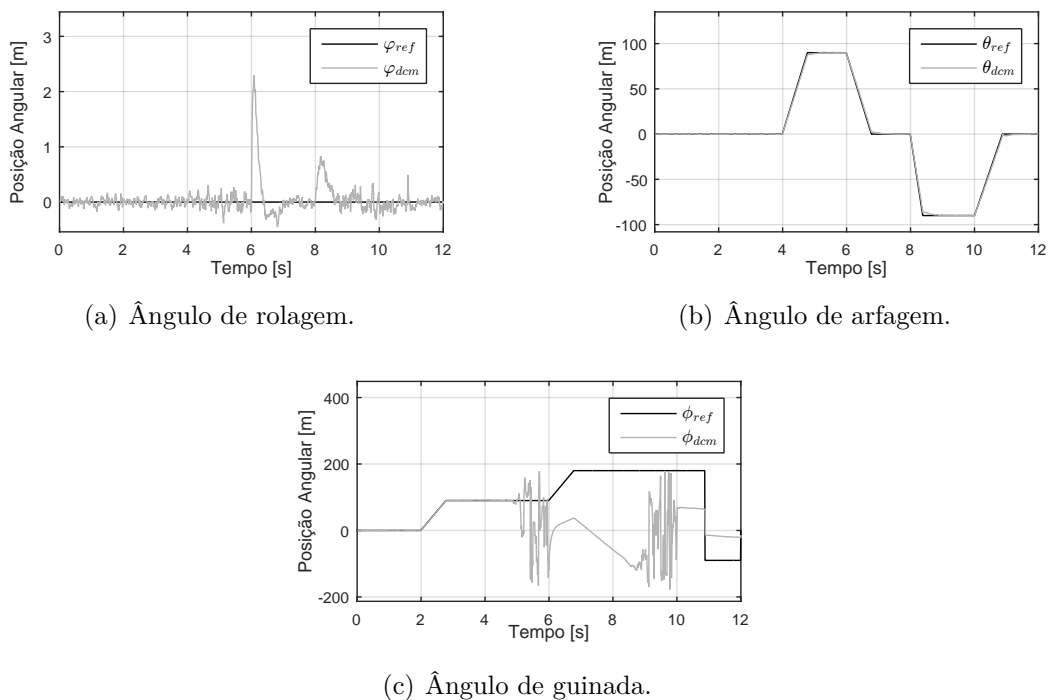
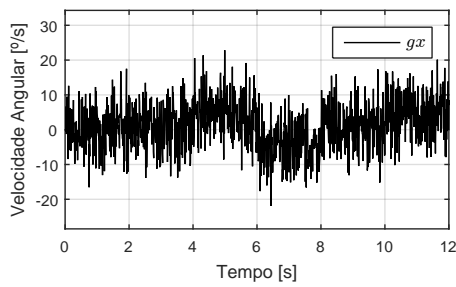


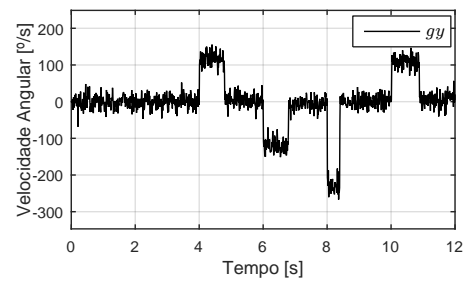
Figura 43: A relação entre a orientação de referência e estimada utilizando dcm.

A entrada do algoritmo de dcm é dada pela saída dos giroscópios, visualizados na

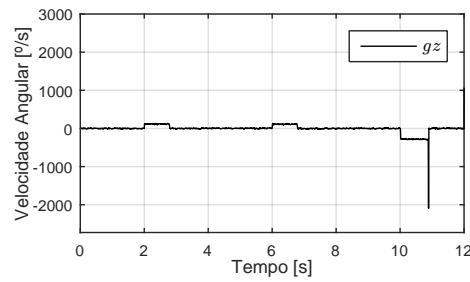
Fig. 44 além da projeção da gravidade nos três eixos, visualizado na Fig. 45.



(a) Velocidade Angular no eixo X.

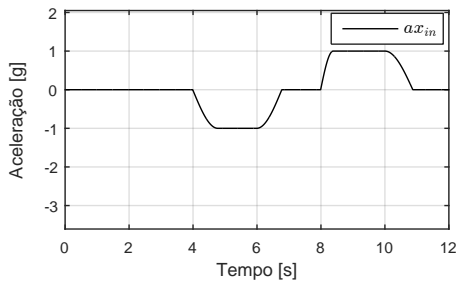


(b) Velocidade Angular no eixo Y.

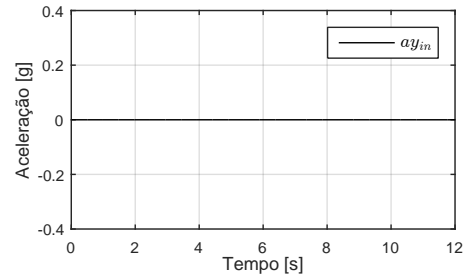


(c) Velocidade Angular no eixo Z.

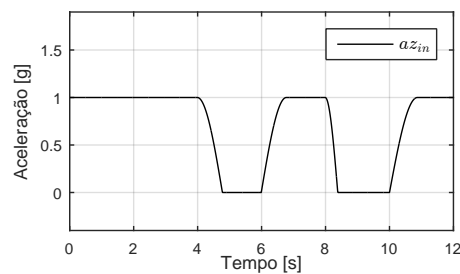
Figura 44: Velocidades angulares de entrada do algoritmo dcm.



(a) Aceleração no eixo X.



(b) Aceleração no eixo Y.



(c) Aceleração no eixo Z.

Figura 45: Aceleração nos três eixos de entrada do algoritmo dcm.

A saída do modelo de aquisição da posição, onde a aceleração linear é entrada pode ser visualizada na Fig. 46.

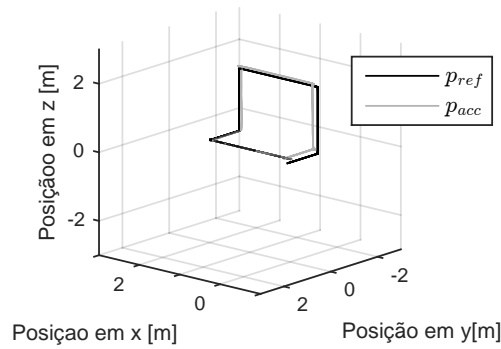


Figura 46: Posição 3D de apenas dados da aceleração linear

O módulo do erro entre a saída da posição do acelerômetro linear e a posição real pode ser visualizada na Fig. 47. Nota-se um erro máximo de 20 cm, por isso, o uso de técnicas de fusão sensorial para adicionar um sensor foi proposto. Essa técnica permite obter um menor erro quadrático, utilizando um filtro de kalman.

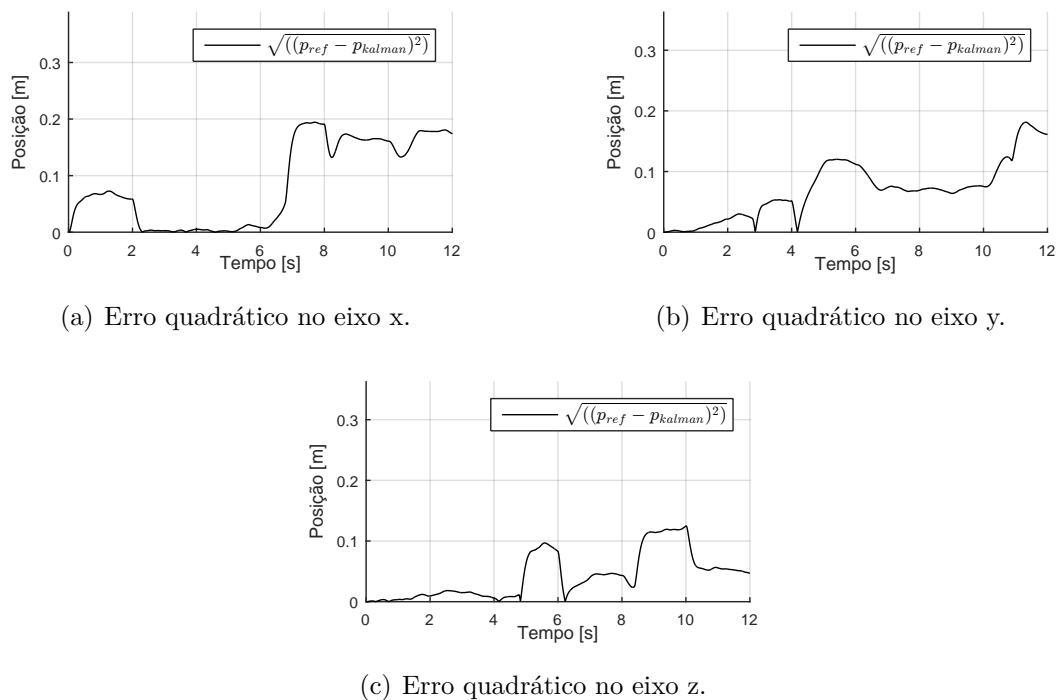


Figura 47: Erro quadrático entre a posição real e a posição estimada usando apenas os dados do acelerômetro nos três eixos.

Nesse trabalho a inclusão da informação do encoder é proposto. O encoder permite obter uma melhor estimativa de posição, no entanto, o encoder possui, entre outros, erros oriundos de derrapagens e falta de contato com a superfície da tubulação.

A simulação do encoder com ruídos pode ser visualizado na Fig. 48.

O uso do encoder fornece a posição de apenas o eixo do duto. Por isso, o uso de um sensor inercial é essencial para determinar a direção de deslocamento. A conversão de

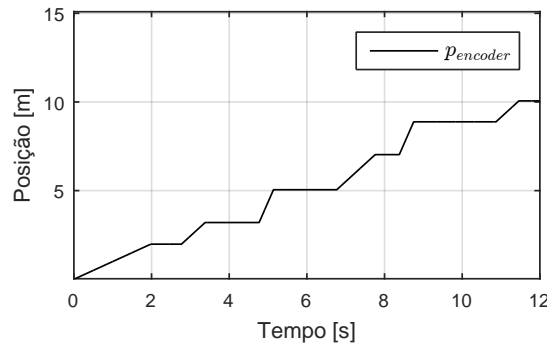


Figura 48: Posição no eixo X

uma posição em um eixo para o movimento tridimensional é dada pela equação

$${}^{NED}p_{encoder} = R_{dcm}^{RPY} p_{encoder} + {}^{NED}p_{encoder} \quad (4.9)$$

onde, ${}^{NED}p_{encoder}$ é a posição tridimensional do encoder simulado, R_{dcm} representa a matriz de cosseno diretores estimada pela técnica apresentada nesse trabalho e ${}^{RPY}p_{encoder}$ é a posição de saída simulada do encoder.

Nas Fig. 49 visualiza-se a criação do mapa utilizando o encoder e a técnica apresentada.

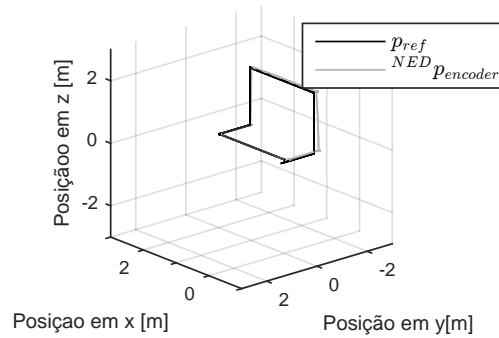


Figura 49: Comparação entre o mapeamento 3d utilizando os dados do encoder e UMI.

A saída do mapa 3d com a fusão de dados do encoder e do acelerômetro pode ser visualizada na Fig. 50.

Na Fig. 51 é possível observar que o módulo do erro entre a saída de referência e o método de fusão sensorial. O maior erro foi de 32 cm. Logo, a aplicação da técnica de fusão sensorial reduz o erro e facilita na criação de um mapa mais preciso.

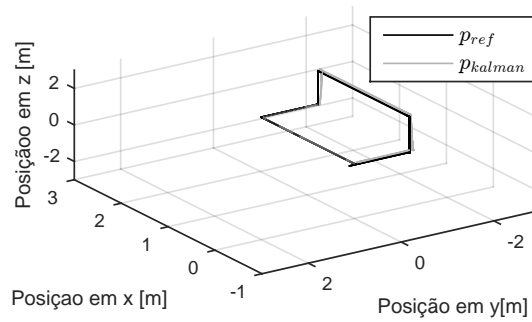


Figura 50: Comparação entre o mapeamento 3d utilizando os dados do encoder e UMI e o filtro de kalman.

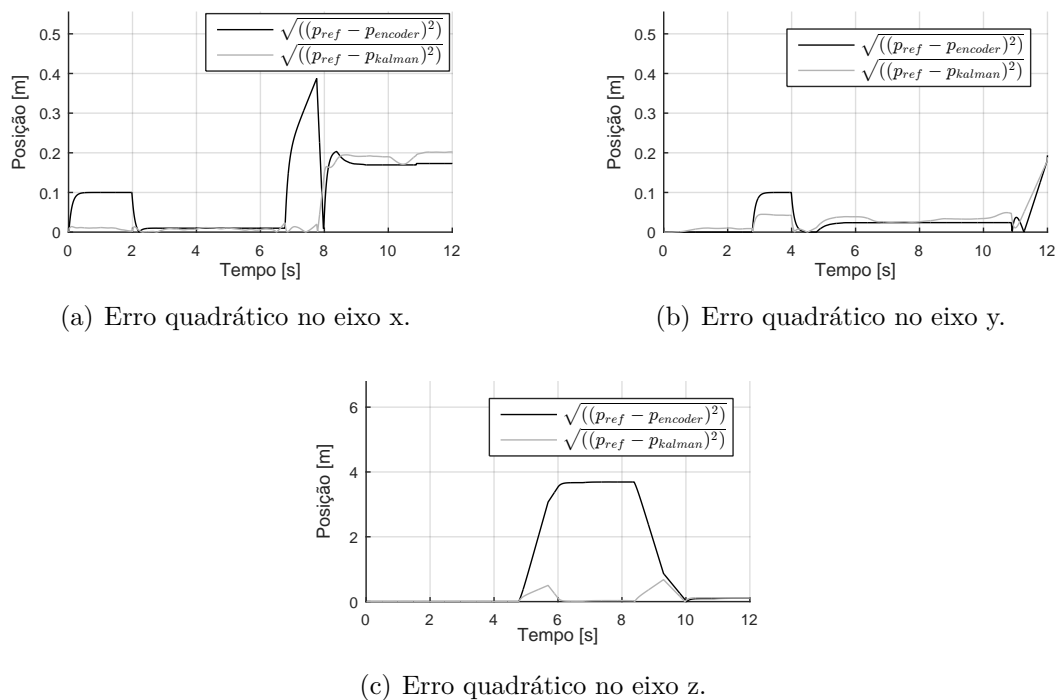


Figura 51: Comparação entre o erro quadrático entre a posição de referência e o modelo estimado e posição de referência e dados simulados do encoder.

A refinaria de petróleo RioGrandense concedeu um trecho de tubulação de 14 polegadas para testes práticos. O trecho é composto por duas curvas fechadas de 90 graus com raio de 0.7m. Além disso, essa tubulação possui um segmento reto de 3.5m. O desenho da tubulação simulado no matlab pode ser visualizado na Fig. 52.

O trecho de tubulação foi colocada nessa posição para evitar o ângulo de guinada, pois, o algoritmo proposto não consegue obter resultados nessa orientação angular. Dessa forma, o deslocamento de referência angular do DutoBot pode ser visualizado na Fig. 53. Nota-se nessa figura deslocamentos em apenas um eixo de rotação.

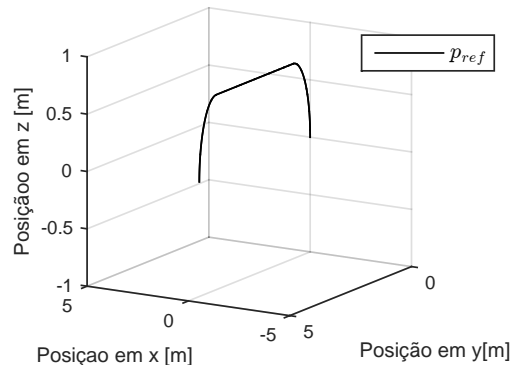
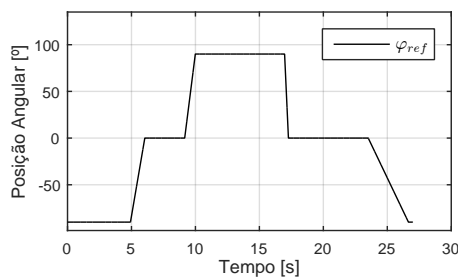
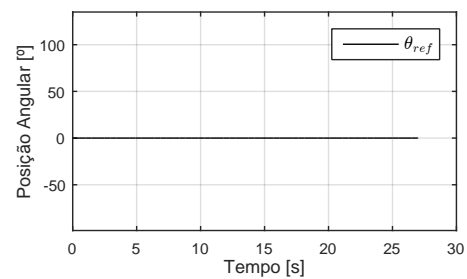


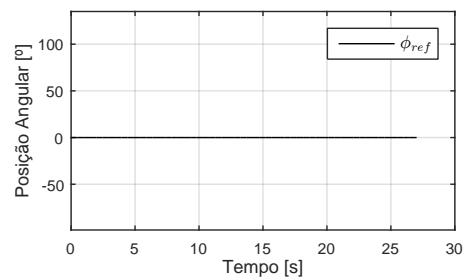
Figura 52: O formato da tubulação doado pela refinaria.



(a) Posição angular no eixo x.



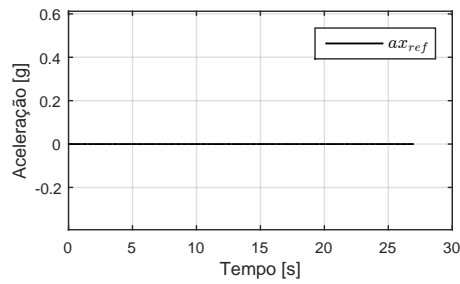
(b) Posição angular no eixo y.



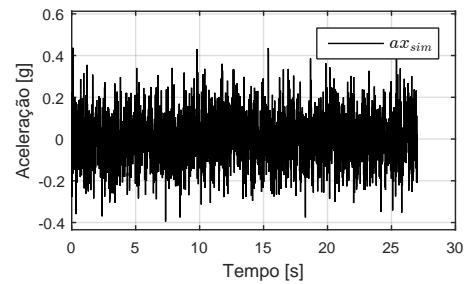
(c) Posição angular no eixo z.

Figura 53: Posição angular de referência nos três eixos.

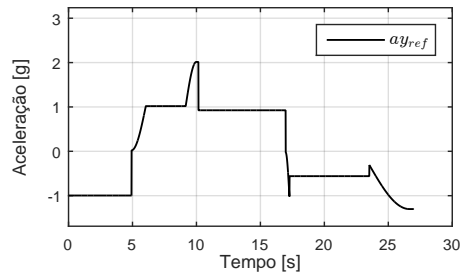
As acelerações de referência e as acelerações simuladas nos três eixos podem ser visualizadas na Fig. 54.



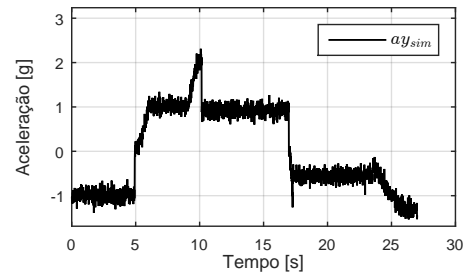
(a) Aceleração de referência.



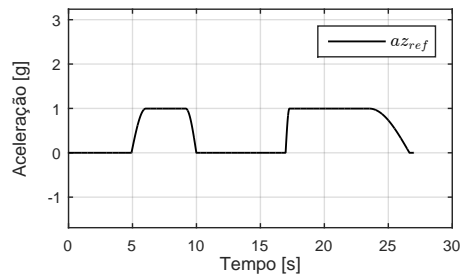
(b) Aceleração simulada com ruído gaussiano.



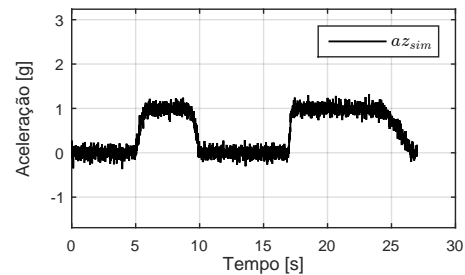
(c) Aceleração de referência.



(d) Aceleração simulada com ruído gaussiano.



(e) Aceleração de referência.



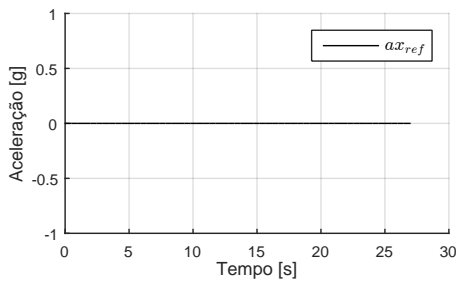
(f) Aceleração simulada com ruído gaussiano.

Figura 54: Comparação entre a aceleração de referência e simulada nos três eixos.

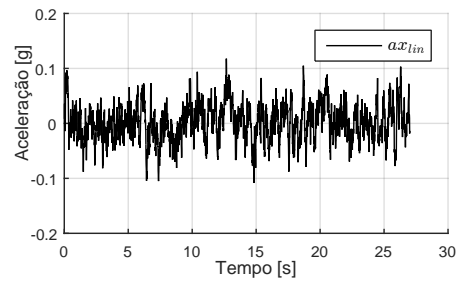
A extração da aceleração linear pode ser observado na Fig. 55. Nota-se nessa figura que não existe muita diferença entre a aceleração linear de referência e a aceleração linear obtida pela extração da aceleração angular. A aceleração linear (a_{lin}) é utilizada para criação do mapa de localização e navegação.

A utilização dos dados da aceleração linear fornece um mapa de localização, conforme pode ser visualizado na Fig. 56.

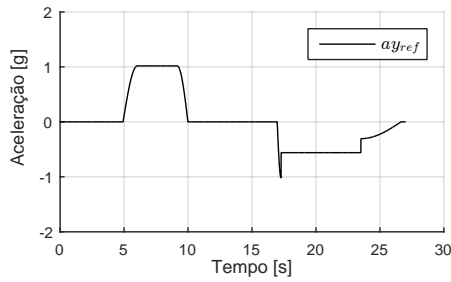
O erro quadrático entre a referência e a posição gerada pelos dados do aceleração linear nos três eixos pode ser visualizada na Fig. 57.



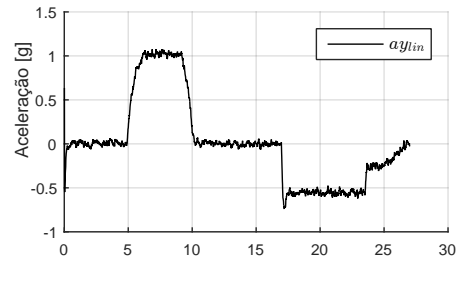
(a) Aceleração de referência.



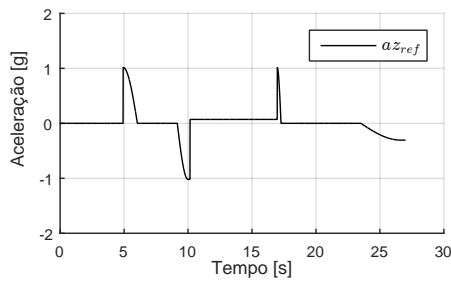
(b) Aceleração simulada com ruído gaussiano.



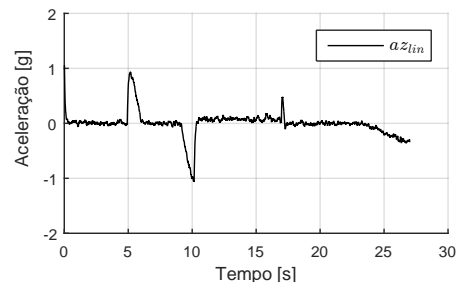
(c) Aceleração de referência.



(d) Aceleração simulada com ruído gaussiano.



(e) Aceleração de referência.



(f) Aceleração simulada com ruído gaussiano.

Figura 55: Comparação entre a aceleração linear de referência e a aceleração linear simulada nos três eixos em relação ao referencial inercial NED.

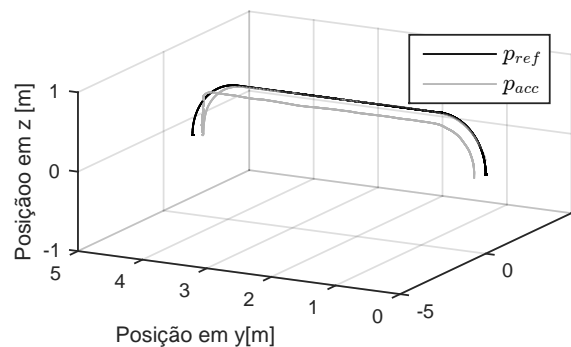
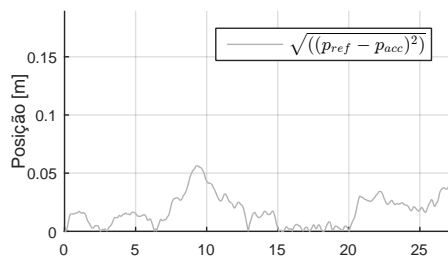
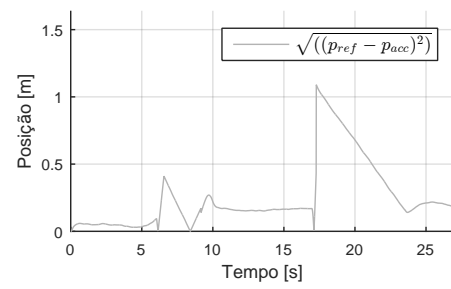


Figura 56: O formato da tubulação doado pela refinaria.

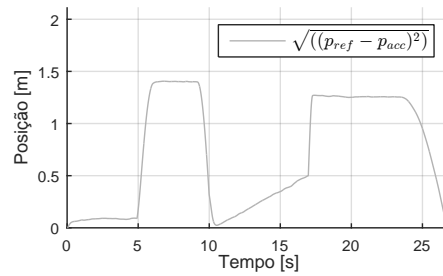
A simulação do funcionamento do encoder pode ser visualizado na Fig. 58. Alguns momentos do duto forma simulados derrapagens, existentes em situações reais de utilização do encoder anexada à roda.



(a) Erro quadrático no eixo x.



(b) Erro quadrático no eixo y.



(c) Erro quadrático no eixo z.

Figura 57: Erro quadrático em relação aos dados do acelerômetro e de referência nos três eixos.

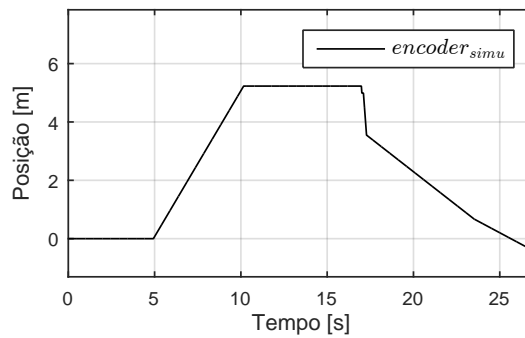


Figura 58: A saída do encoder simulada.

A criação do mapa utilizando os dados do encoder com os dados da técnica de aquisição de atitude proposta nesse trabalho pode ser visualizada na Fig. 59.

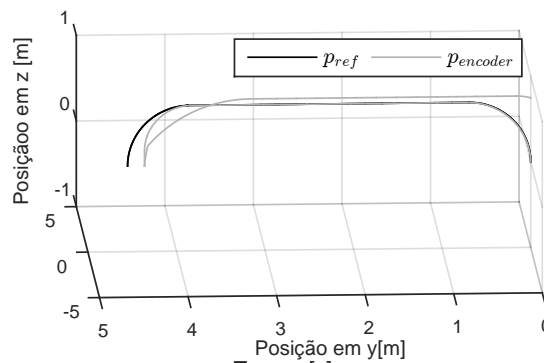
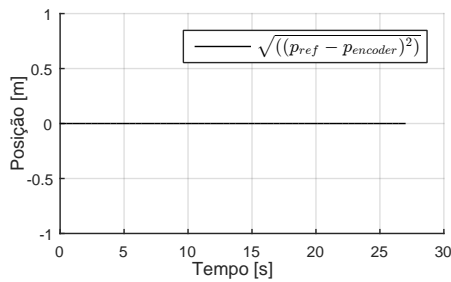
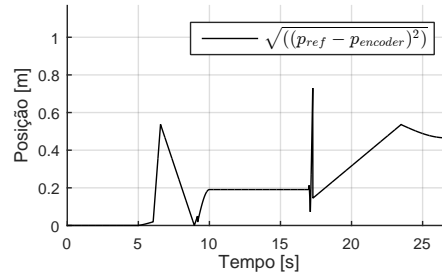


Figura 59: A criação do mapa tridimensional utilizando os dados do encoder e da UMI.

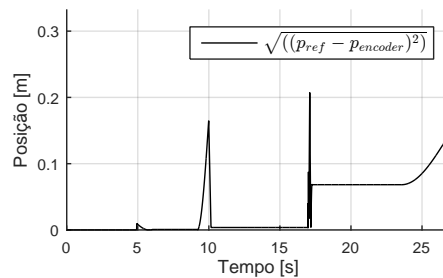
O erro quadrático entre a saída do encoder e a saída de referência pode ser visualizada na Fig. 60.



(a) Erro quadrático no eixo x.



(b) Erro quadrático no eixo y.



(c) Erro quadrático no eixo z.

Figura 60: Erro quadrático em relação aos dados do encoder e de referência nos três eixos.

Os erro quadrático do acelerômetro e o erro quadrático do encoder fornecem um erro máximo de 0.8 m. A saída da fusão sensorial consiste na adquirir os dados do acelerômetro e do encoder e realizar operações de peso dinâmicos para melhorar a saída. A construção do mapa tridimensional utilizando essa técnica pode ser visualizada na Fig. 61.

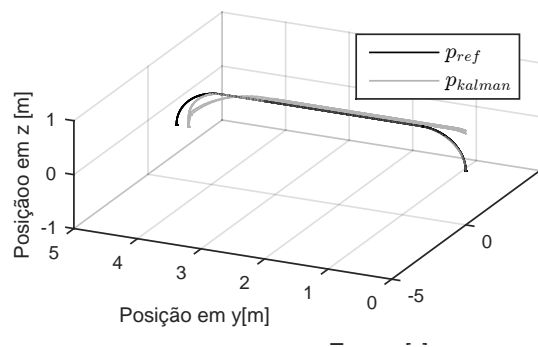
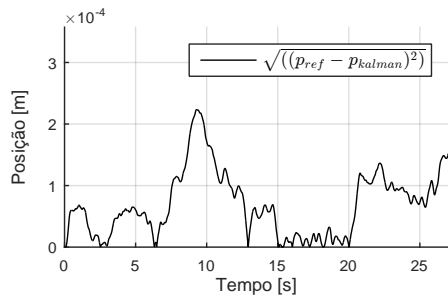
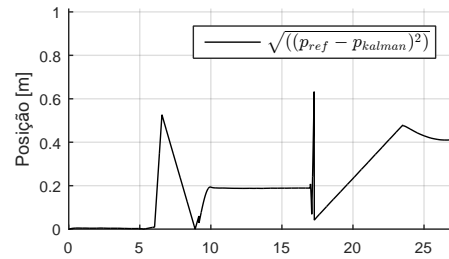


Figura 61: A criação do mapa tridimensional utilizando os dados do encoder e da UMI.

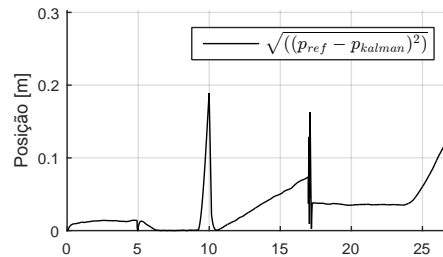
O erro quadrático entre o método de fusão sensorial pode ser visualizado na Fig. 62. O erro máximo desse método é 0.35m. Logo, o erro quadrático da técnica de dcm apresenta um erro quadrático menor em relação ao acelerômetro e o do encoder. Assim, a aplicação dessa técnica de fusão sensorial apresenta um mapa de localização mais preciso.



(a) Erro quadrático no eixo x.



(b) Erro quadrático no eixo y.

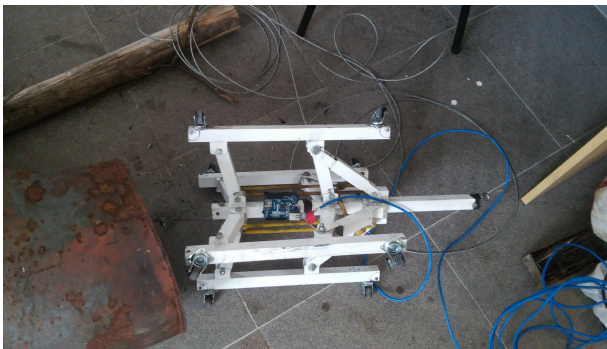


(c) Erro quadrático no eixo z.

Figura 62: Erro quadrático em relação aos dados da fusão sensorial e de referência nos três eixos.

4.3 Resultados Práticos

O Dutobot foi construído como ferramenta para auxiliar a inspeção dos dutos da refinaria de petróleo RioGrandense. A estrutura é composta por alumínio de 1 polegada. Essa estrutura possui 4 apoios espaçados 90 graus para pressionar a parte interna do duto, conforme a Fig. 63. A posição natural das hastes que forçam o duto possui diâmetro de 18 polegadas. Assim, quando a estrutura é posicionada em tubulações com diâmetro menor, as hastes são forçadas contra a parede interna. Isso permite que o centro do robô permaneça no centro da tubulação. Dessa forma, uma câmera pode ser colocada no centro da estrutura para inspecionar as paredes internas da tubulações.



(a) Estrutura metálica do Dutobot.



(b) Dutobot dentro do duto.

Figura 63: A estrutura para experimentações práticas.

Existem diversas câmeras no mercado, e quanto maior o ângulo de visão, menor é a resolução periférica. Uma das alternativas mais utilizadas é a inserção de uma câmera que possui um dispositivo de rotação na câmera. Assim, o técnico pode rotacionar e focar a câmera no intervalo de duto que desejar com melhor visualização. No entanto, esse método é suscetível a erro humano, visto que, podem haver pontos em que deveriam ser visualizados mas por imperícia humana, pode passar despercebido. Um outro empecilho seria a restrição do uso de motores elétricos em ambientes fechados sujeitos a explosão. A solução encontrada foi o acoplamento de 3 câmeras espaçadas 120° na parte da frente da estrutura. Dessa forma, o imageamento completo de todo o duto pode ser adquirido.

Um dos grande desafios da inclusão dessa ferramenta no duto é localizar e identificar a imagem com a posição real do protótipo. A utilização de técnicas de obtenção da postura do robô permite ao operador obter a informação da posição e orientação da falha no instante em que é identificada. Para isso, foi escolhido um sensor inercial GY-88 de 10 graus de liberdade, presente na Fig.64.

A UMI GY-88 é composta por 3 acelerômetros ortogonais, 3 giroscópios ortogonais, 3 magnetômetros ortogonais e um barômetro. A aquisição de dados da UMI é via protocolo de comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*). I2C é um protocolo de barramento que todos os dispositivos presentes são conectados em dois pinos SDA (*Serial Data*)



Figura 64: Modelo da UMI GY-88.

e SDL (*Serial Clock*). O fio SDA é o pino de transferência de dados e o SCL é o pino de temporização. A comunicação I2C recebe e envia dados pelo mesmo pino. A limitação de comunicação para poucos metros é devido a capacitância do barramento de 400pF. Dessa forma, um Arduino Uno visualizado na Fig 65 foi utilizado para aquisição dos dados da UMI e com a inclusão do *shield* Ethernet, Fig. 66, no Arduino possibilita o envio dos dados até 50 metros.



Figura 65: Arduino Uno.

A utilização apenas da UMI não fornece informações confiáveis em relação a movimentos lineares. Por isso, o uso do encoder é uma alternativa de baixo custo para localização dos dutos. Na Fig 67 está presente o modelo de *encoder* incremental escolhido. A resolução do *encoder* KY-040 é 20 pulsos por revolução.

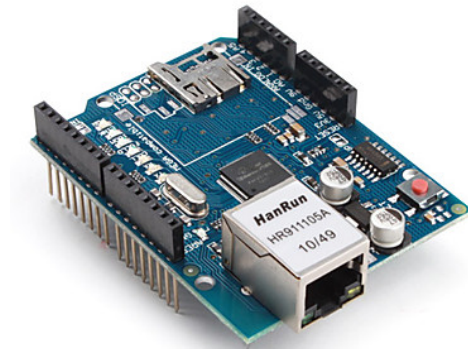


Figura 66: Shield Ethernet W5100.



Figura 67: Encoder de baixo custo.

O trecho de tubulação foi cedido pela refinaria de petróleo RIOGRANDENSE para realização de experimentos práticos. Essa tubulação possui dois joelhos de raio de curvatura de aproximadamente 70 cm e um trecho linear de 3.5 m, conforme pode ser visualizado na Fig. 68.

A saída real foi desenhada no Matlab para fins de comparação entre os métodos apresentados, conforme pode ser visualizado na Fig. 69. O trecho desenhado no Matlab apresenta as mesmas dimensões do trecho do duto. Devido a dificuldades de deslocamento do trecho de tubulação, o trecho foi disposto na forma em que houvessem apenas rotações no eixo Z. No entanto, a técnica de DCM não estima a posição angular no eixo Z.

A realização da trajetória ocorreu devido ao rebocamento do dutoBot de uma ponta a outra com cabos de aço. Após chegar no fim da tubulação, o dutoBot é puxado até retornar ao ponto inicial. Assim, gera-se as curvas da saída de posição do encoder e orientação e posição da UMI.

Na Fig. 70 pode-se visualizar a saída do encoder.



Figura 68: Estrutura Tubular para Ensaio Práticos.

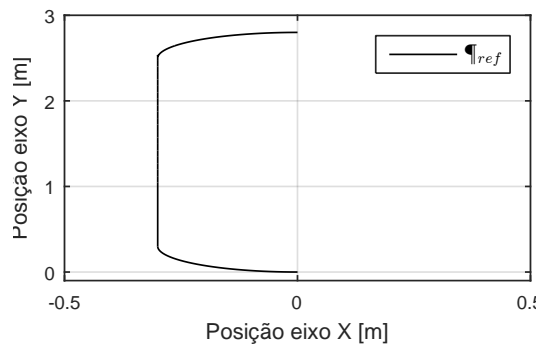


Figura 69: Projeção da Trajetória real no matla

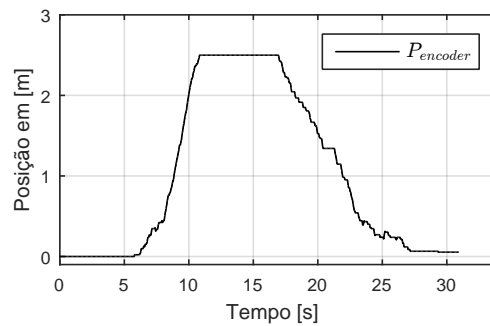


Figura 70: Saída do Encoder

Na Fig. 71 é possível observar a saída do modelo proposto. A saída apresenta erros na orientação no eixo de guinada. Isso ocorre por que a técnica de DCM não consegue prever de maneira satisfatória a orientação no eixo de guinada 72. Uma das soluções propostas é a utilização de magnetômetro, para obtenção da orientação de guinada. No entanto, o material ferromagnético provoca distúrbios nos eixos do magnetômetro.

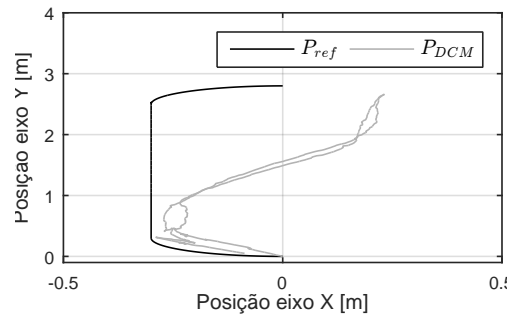


Figura 71: Saída do Método de Localização e Mapeamento usando Kalman e DCM.

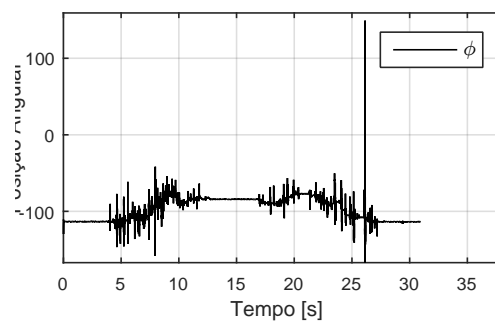


Figura 72: Ângulo de Guinada na Prática.

5 Conclusão

Nesse trabalho foi proposto um método de aquisição da orientação e posição de um protótipo construído para inspecionar a superfície interna da tubulação da refinaria de petróleo RioGrandese.. Para isso, a aplicação de um sensor inercial do tipo UMI e um encoder foram aplicados. Assim, o técnico adquire as informações de posição e orientação das possíveis falhas em tempo real.

A aplicação da aceleração da UMI trouxe diversos problemas, pois a aceleração possui diversos ruídos. Uma das propostas iniciais era aplicar um filtro de Kalman capaz de extrair as melhores informações entre dois sensores: A aceleração linear e o encoder. Mas o encoder demonstrou em testes práticos menos ruído que o esperado. Assim, é possível utilizar apenas o encoder com um resultado satisfatório. A dupla integração do sinal do acelerômetro fornece um erro muito maior que o uso do encoder. Logo, a utilização de apenas encoders com a previsão de desvio padrão já é o suficiente.

Nos resultados de simulação, a técnica de estimativa de attitude (dcm) apresentou melhores resultados em relação a orientação e posição nos dois eixos x e y.

A utilização da técnica de DCM apresentada é uma técnica excelente para estimativas de attitude, ou seja, aquisição do ângulo de rolagem e de arfagem. O ângulo de guinada poderia ser obtida utilizando o magnetômetro presente na UMI. No entanto, esse tipo de sensor sofre interferência de materiais ferromagnéticos. Logo, a aplicação desse sensor nos dutos não é possível. Para uma melhor estimativa do ângulo de guinada, a melhor solução seria a utilização de odometria visual.

A técnica de dcm apresenta o erro de *gimbal lock*. O uso de quatérnios torna-se uma alternativa eficaz para diminuir o problema, embora, aumente o custo computacional.

Nas experimentações práticas alguns componentes como shield ethernet e o arduino UNO apresentaram problemas de funcionamento. Por isso, a eficiência do algoritmo não pode ser provada.

Em trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de um novo protótipo capaz de deslocar-se dentro do duto de forma autônoma. Assim, utilizando esses métodos de localização apresentados, o robô pode planejar quais rotas deve seguir automaticamente.

Um outro campo de pesquisa interessante é na detecção automática de falhas, isto é, um algoritmo analisa os dados sensoriais e alerta o operador caso seja encontrada uma possível falha na superfície interna da tubulação.

Referências

- ALVES, J. P. P. Um sistema de navegação para veículos autônomos. 2004. Citado na página 45.
- ANP 2016. http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/Anuario_Estatistico_ANP_2016.pdf. Acessado 2017-20-03. Citado na página 23.
- ANTHIERENS, C.; CIFTCI, A.; BETEMPS, M. Design of an electro pneumatic micro robot for in-pipe inspection. In: IEEE. *Industrial Electronics, 1999. ISIE'99. Proceedings of the IEEE International Symposium on*. [S.l.], 1999. v. 2, p. 968–972. Citado 3 vezes nas páginas 13, 37 e 38.
- BAERVELDT, A.-J.; KLANG, R. A low-cost and low-weight attitude estimation system for an autonomous helicopter. In: IEEE. *Intelligent Engineering Systems, 1997. INES'97. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*. [S.l.], 1997. p. 391–395. Citado na página 43.
- BARROSO, F. d. A. *Design and Development of an Interchangeable Inspection System For Oil and Gas Pipelines*. [S.l.]: UFPB, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- BARSHAN, B.; DURRANT-WHYTE, H. F. Inertial navigation systems for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 328–342, 1995. Citado na página 43.
- BORENSTEIN, J.; BORRELL, A. The omnitread ot-4 serpentine robot. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 1766–1767. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- CHOI, C.-H.; JUNG, S.-H.; KIM, S.-H. Feeder pipe inspection robot using an inch-worm mechanism with pneumatic actuators. In: IEEE. *Robotics and Biomimetics, 2004. ROBIO 2004. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2004. p. 889–894. Citado na página 37.
- CHOI, H.; RYEW, S. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines. *Mechatronics*, Elsevier, v. 12, n. 5, p. 713–736, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 13, 32 e 33.
- CORKE, P. et al. Integration of vision and inertial sensors. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'05*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 43.
- DEBENEST, P.; GUARNIERI, M.; HIROSE, S. Pipetron series-robots for pipe inspection. In: IEEE. *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2014 3rd International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- EDWAN, E. et al. Reduced dcm based attitude estimation using low-cost imu and magnetometer triad. In: IEEE. *Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2011 8th Workshop on*. [S.l.], 2011. p. 1–6. Citado na página 45.

- FJERDINGEN, S. et al. A snake-like robot for internal inspection of complex pipe structures (piko). In: IEEE. *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.], 2009. p. 5665–5671. Citado 3 vezes nas páginas 13, 32 e 37.
- FOXLIN, E. M. Generalized architecture for simultaneous localization, auto-calibration, and map-building. In: IEEE. *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 527–533. Citado na página 43.
- GARCIA, R.; KUGA, H.; ZANARDI, M. Estimação de atitude em tempo real utilizando o filtro de kalman estendido e ângulos de euler. *TC*, v. 100, p. 0. Citado na página 45.
- GEREMIA, G. Sistema autônomo de inspeção de dutos. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- GREWAL, M. S. *Kalman filtering*. [S.l.]: Springer, 2011. Citado na página 47.
- GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. Citado na página 43.
- GROSSEKATTHÖFER, K.; YOON, Z. Introduction into quaternions for spacecraft attitude representation. *TU Berlin*, 2012. Citado na página 45.
- HYYTI, H.; VISALA, A. A dcm based attitude estimation algorithm for low-cost mems imus. *International Journal of Navigation and Observation*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2015, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 50.
- IDE, E. M.; ROSOSTOLATO, E. Corrosão em dutos e formas de monitoramento. *Bolsista de Valor*, v. 3, 2013. Citado na página 23.
- INSPECAO Magnetica. <http://infraredservice.com.br/ensaio-nao-destrutivo.html>. Acessado 2016-08-26. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.
- INSPECAOULTRASOMTESTE. <http://www.faend.com.br/galeria.asp?acao=ultrassom>. Acessado 2016-08-26. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 30.
- JILES, D. Review of magnetic methods for nondestructive evaluation (part 2). *NDT international*, Elsevier, v. 23, n. 2, p. 83–92, 1990. Citado na página 28.
- JULIER, S. J.; UHLMANN, J. K. New extension of the kalman filter to nonlinear systems. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *AeroSense'97*. [S.l.], 1997. p. 182–193. Citado na página 48.
- KENNEDY, J. L. *Oil and gas pipeline fundamentals*. [S.l.]: Pennwell books, 1993. Citado na página 23.
- KEPPLIN, V.; SCHOLL, K.-U.; BERNS, K. A mechatronic concept for a sewer inspection robot. In: IEEE. *Advanced Intelligent Mechatronics, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/ASME International Conference on*. [S.l.], 1999. p. 724–729. Citado na página 32.
- KIM, D.-W. et al. Force adjustment of an active pipe inspection robot. In: IEEE. *ICCAS-SICE, 2009*. [S.l.], 2009. p. 3792–3797. Citado 3 vezes nas páginas 13, 35 e 36.

- KIM, J.-H.; SHARMA, G.; IYENGAR, S. S. Famper: A fully autonomous mobile robot for pipeline exploration. In: IEEE. *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 517–523. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 35.
- KIM, J.-H.; SUKKARIEH, S. Airborne simultaneous localisation and map building. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2003. v. 1, p. 406–411. Citado na página 43.
- KOHAN, A. L. *Boiler operator's guide*. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 1997. Citado na página 29.
- KUNTZE, H.-B.; HAFFNER, H. Experiences with the development of a robot for smart multisensoric pipe inspection. In: IEEE. *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*. [S.l.], 1998. v. 2, p. 1773–1778. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 34.
- KWON, Y.-S.; YI, B.-J. Design and motion planning of a two-module collaborative indoor pipeline inspection robot. *Robotics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 28, n. 3, p. 681–696, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 35.
- LEFFERTS, E. J.; MARKLEY, F. L.; SHUSTER, M. D. Kalman filtering for spacecraft attitude estimation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, v. 5, n. 5, p. 417–429, 1982. Citado na página 43.
- LI, P. et al. Design of a mobile mechanism possessing driving ability and detecting function for in-pipe inspection. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 3992–3997. Citado na página 32.
- LIQUIDO Penetrante. <http://www.faend.com.br/galeria.asp?acao=liquido>. Acessado 2016-08-26. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 29.
- LOBO, J.; DIAS, J. Vision and inertial sensor cooperation using gravity as a vertical reference. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE, v. 25, n. 12, p. 1597–1608, 2003. Citado na página 43.
- LOPES, J. et al. Mapeamento da perda de espessura por corrosão em tubo de aço utilizando ensaio não destrutivo ultrassônico através da técnica de imersão bubbler. *V CONNEPI, Maceió/AL*, 2010. Citado na página 30.
- LU, C.-P. et al. Development of a pipe inspection robot. In: IEEE. *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*. [S.l.], 2007. p. 626–631. Citado na página 32.
- MADGWICK, S. O. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Report x-io and University of Bristol (UK)*, 2010. Citado na página 43.
- MAHONY, R.; HAMEL, T.; PFLIMLIN, J.-M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Transactions on automatic control*, IEEE, v. 53, n. 5, p. 1203–1218, 2008. Citado na página 43.
- MASUTA, H. et al. Recognition of branch pipe for pipe inspection robot using fiber grating vision sensor. In: IEEE. *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2013 10th International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 633–638. Citado 3 vezes nas páginas 13, 32 e 34.

MURRAY, R. M. et al. *A mathematical introduction to robotic manipulation*. [S.l.]: CRC press, 1994. Citado na página 45.

NEGENBORN, R. *Robot localization and Kalman filters*. Tese (Doutorado) — Utrecht University, 2003. Citado na página 47.

NESTLEROTH, J.; BUBENIK, T. Magnetic flux leakage (mfl) technology for natural gas pipeline inspection. *Battelle, Report Number GRI-00/0180 to the Gas Research Institute*, 1999. Citado na página 31.

NR-13. <http://www.sicepot-mg.com.br/imagensDin/arquivos/5594.pdf>. Acessado 2017-20-03. Citado na página 27.

OKAMOTO, J. et al. Autonomous system for oil pipelines inspection. *Mechatronics*, Elsevier, v. 9, n. 7, p. 731–743, 1999. Citado na página 31.

PEDLEY, M. Tilt sensing using a three-axis accelerometer. *Freescale Semiconductor Application Note*, p. 2012–2013, 2013. Citado na página 55.

REBER, K. et al. A new generation of ultrasonic in-line inspection tools for detecting, sizing and locating metal loss and cracks in transmission pipelines. In: IEEE. *Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings. 2002 IEEE*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 665–671. Citado 3 vezes nas páginas 13, 31 e 32.

REHBINDER, H.; GHOSH, B. K. Pose estimation using line-based dynamic vision and inertial sensors. *IEEE Transactions on Automatic Control*, IEEE, v. 48, n. 2, p. 186–199, 2003. Citado na página 43.

RIISGAARD, S.; BLAS, M. A tutorial approach to simultaneous localization and mapping. *Massachusetts Institute of Technology (MIT), Mobile Robotics course materials*, 2012. Citado na página 25.

ROH, S.-g.; CHOI, H. R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines. *Robotics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 1, p. 1–17, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 13, 32 e 33.

ROLLINSON, D.; CHOSET, H. Pipe network locomotion with a snake robot. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

RUGGIU, M. et al. In-pipe inch-worm pneumatic flexible robot. In: IEEE. *Advanced Intelligent Mechatronics, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/ASME International Conference on*. [S.l.], 2001. v. 2, p. 1226–1231. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

SABATINI, A. M. Quaternion-based extended kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, IEEE, v. 53, n. 7, p. 1346–1356, 2006. Citado na página 42.

SANTANA, D. D. S.; FURUKAWA, C. M. *Estimação de trajetórias terrestres utilizando unidade de medição inercial de baixo custo e fusão sensorial*. [S.l.]: EPUSP, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 43.

SANTANA, D. D. S.; MARUYAMA, N.; FURUKAWA, C. M. Estimation of trajectories of pipeline pigs using inertial measurements and non linear sensor fusion. In: IEEE. *Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado na página 32.

- SCHEMPF, H. et al. Explorer: Untethered real-time gas main assessment robot system. In: *Proc. of Int. Workshop on Advances in Service Robotics, ASER*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 3. Citado 3 vezes nas páginas 13, 32 e 37.
- SCHOENEICH, P. et al. Tubulo-a train-like miniature inspection climbing robot for ferromagnetic tubes. In: IEEE PRESS. *Proceedings of the 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*. [S.l.], 2010. p. 1–5. Citado na página 32.
- SCHOENEICH, P. et al. Tripillar: a miniature magnetic caterpillar climbing robot with plane transition ability. *Robotica*, Cambridge Univ Press, v. 29, n. 07, p. 1075–1081, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- SCHOLL, K.-U. et al. Controlling a multi-joint robot for autonomous sewer inspection. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2000. v. 2, p. 1701–1706. Citado na página 32.
- SISTEMAECI. https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/15124/15124_5.pdf. Acessado 2017-20-03. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 44.
- SOCO. 1984. <https://campograndesantos.wordpress.com/96-incendio-de-vila-soco-vila-sao-joseem-cubataosp-uma-data-para-nao-esquecer>. Acessado 2016-08-26. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 24.
- SUZUMORI, K.; WAKIMOTO, S.; TAKATA, M. A miniature inspection robot negotiating pipes of widely varying diameter. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2003. v. 2, p. 2735–2740. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- TÂCHE, F. et al. Magnebike: A magnetic wheeled robot with high mobility for inspecting complex-shaped structures. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, v. 26, n. 5, p. 453–476, 2009. Citado na página 32.
- TÂCHE, F. et al. Magnebike: Compact magnetic wheeled robot for power plant inspection. In: IEEE. *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2010 1st International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–2. Citado na página 32.
- TAIWAN. 2014. <http://g1.globo.com/mundo/noticia/2014/08/numero-de-mortos-por-explosao-de-gas-no-sul-de-taiwan-chega-25.html>. Acessado 2016-08-26. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 25.
- THIELEMANN, J. T.; BREIVIK, G. M.; BERGE, A. Pipeline landmark detection for autonomous robot navigation using time-of-flight imagery. In: IEEE. *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008. CVPRW'08. IEEE Computer Society Conference on*. [S.l.], 2008. p. 1–7. Citado na página 37.
- TIANLU, C. et al. Designing and signal processing of intelligent inspection pig applying ultrasonic a-scan. In: IEEE. *Ultrasonics Symposium, 2005 IEEE*. [S.l.], 2005. v. 3, p. 1484–1487. Citado na página 31.
- TITTERTON, D.; WESTON, J. L. *Strapdown inertial navigation technology*. [S.l.]: IET, 2004. Citado na página 39.

- TSURUTA, K. et al. Control circuit in an in-pipe wireless micro inspection robot. In: IEEE. *Micromechatronics and Human Science, 2000. MHS 2000. Proceedings of 2000 International Symposium on*. [S.l.], 2000. p. 59–64. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- TUR, J. M. M.; GARTHWAITE, W. Robotic devices for water main in-pipe inspection: A survey. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, v. 27, n. 4, p. 491–508, 2010. Citado na página 31.
- VIK, B.; FOSSEN, T. I. A nonlinear observer for gps and ins integration. In: IEEE. *Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on*. [S.l.], 2001. v. 3, p. 2956–2961. Citado na página 43.
- VISUAL Inspeção. <http://www.caneil.ca>. Acessado 2016-08-26. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 30.
- WALTER, C. et al. Design considerations of robotic system for cleaning and inspection of large-diameter sewers. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, v. 29, n. 1, p. 186–214, 2012. Citado na página 32.
- WANG, Z. et al. Development of new pipeline maintenance system for repairing early-built offshore oil pipelines. In: IEEE. *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 1–6. Citado na página 31.
- WANG, Z. et al. Development of an autonomous in-pipe robot for offshore pipeline maintenance. *Industrial Robot: An International Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 37, n. 2, p. 177–184, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 13, 31 e 32.
- WELCH, G.; BISHOP, G. *An introduction to the kalman filter*. Department of Computer Science, University of North Carolina. [S.l.]: Chapel Hill, NC, unpublished manuscript, 2006. Citado na página 47.
- YOON, K.-H.; PARK, Y.-W. Pipe inspection robot actuated by using compressed air. In: IEEE. *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2010 IEEE/ASME International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1345–1349. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- YU, H.; MA, P.; CAO, C. A novel in-pipe worming robot based on sma. In: *IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 2, p. 923–927 Vol. 2. ISSN 2152-7431. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 38.
- ZIMMERMANN, M.; SULZER, W. High bandwidth orientation measurement and control based on complementary filtering. In: *Proceedings of SYROCO*. [S.l.: s.n.], 1991. v. 91. Citado na página 43.