

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Sorocaba / São João da Boa Vista

JOÃO ADOLFO SAVIETO

**Galeria Bot : Desenvolvimento de robô para inspeção de
tubulações de águas pluviais**

São João da Boa Vista

2025

João Adolfo Saviato

**Galeria Bot : Desenvolvimento de robô para inspeção de
tubulações de águas pluviais**

Dissertação apresentada ao Conselho do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, interinidades entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e a Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Linha de Pesquisa: Sistemas Mecatrônicos

Orientador: Prof. Dr. Wilian Miranda dos Santos

São João da Boa Vista

2025

S267g

Saviato, João Adolfo

Galeria Bot : Desenvolvimento de robô para inspeção de tubulações de águas pluviais / João Adolfo Saviato. -- São João da Boa Vista, 2025

53 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Wilian Miranda dos Santos

1. Robôs. 2. Análise. 3. Inspeção. 4. Precipitação (Meteorologia). 5. Tubulações. I. Título.

REGISTRO DE IMPACTO ESPERADO NA SOCIEDADE

O desenvolvimento do robô de inspeção para tubulações de águas pluviais apresentado nesta pesquisa traz impactos significativos para a sociedade, especialmente no que se refere à manutenção preventiva da infraestrutura urbana. A automação do processo de inspeção reduz a necessidade de exposição de trabalhadores a ambientes insalubres e de difícil acesso, promovendo maior segurança ocupacional. Além disso, a capacidade do robô de identificar fissuras e medir a inclinação da tubulação permite uma detecção precoce de falhas estruturais, prevenindo colapsos que poderiam resultar em danos ambientais e econômicos. O uso de tecnologias de baixo custo e fácil implementação favorece a adoção em municípios com recursos limitados, democratizando o acesso a soluções avançadas para o saneamento. Assim, esta pesquisa contribui diretamente para a sustentabilidade da infraestrutura urbana, garantindo maior eficiência na gestão de redes pluviais e aprimorando a qualidade de vida da população.

REGISTRATION OF EXPECTED IMPACT ON SOCIETY

The development of the inspection robot for stormwater pipes presented in this research has significant impacts on society, particularly regarding the preventive maintenance of urban infrastructure. The automation of the inspection process reduces the need for workers to be exposed to hazardous and hard-to-reach environments, promoting greater occupational safety. Additionally, the robot's ability to identify cracks and measure the pipe's incline enables early detection of structural failures, preventing collapses that could lead to environmental and economic damage. The use of low-cost and easy-to-implement technologies supports adoption in municipalities with limited resources, democratizing access to advanced sanitation solutions. Thus, this research directly contributes to the sustainability of urban infrastructure by ensuring greater efficiency in stormwater network management and improving the quality of life for the population.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Galeria Bot – Veículo autônomo para vistoria de galerias e tubulações de água

AUTOR: JOÃO ADOLFO SAVIETO

ORIENTADOR: WILIAN MIRANDA DOS SANTOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. WILIAN MIRANDA DOS SANTOS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Aeronautica / Faculdade de Engenharia de Sao Joao da Boa Vista UNESP

Prof. Dr. RAFAEL VIDAL AROCA (Participação Virtual)
Departamento de Computação / Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. ROBERTO SANTOS INOUE (Participação Virtual)
Departamento de Computação / Universidade Federal de São Carlos

São João da Boa Vista, 30 de janeiro de 2025


Verônica Liberali Messias
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Graduação e Pós-Graduação

Assinado de forma
digital por Verônica
Liberali
Messias:36823715839
Dados: 2025.01.30
12:02:08 -03'00'

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por todas as oportunidades concedidas; aos meus pais, pelo incondicional apoio ao longo desta jornada; às minhas irmãs, pela constante amizade; e à minha família, pelos exemplos que me moldaram para ser quem sou hoje.

Reconheço meu orientador, Wilian Miranda dos Santos, por todo o conhecimento compartilhado e à instituição de ensino UNESP por proporcionar um ambiente de crescimento e aprendizado.

Com estas palavras, expresso minha profunda gratidão às pessoas mencionadas e a todas as demais que conheci e que, de alguma forma, fizeram parte da minha trajetória.

RESUMO

Com o crescimento populacional anual, as cidades expandem sua infraestrutura, incluindo extensas redes de tubulações de águas pluviais, essenciais para o escoamento eficiente. No entanto, falhas de projeto, construção inadequada ou falta de manutenção podem gerar problemas estruturais significativos. A inspeção dessas tubulações é desafiadora devido ao difícil acesso e às condições de espaço confinado, exigindo equipamentos especializados ou expondo trabalhadores a riscos. Os métodos convencionais, geralmente baseados apenas em câmeras operadas remotamente, nem sempre fornecem informações suficientes para a tomada de decisões sobre reparos. Diante dessa limitação, este estudo propõe o desenvolvimento de um robô capaz de detectar e transmitir a posição de fissuras, medir o ângulo de declive e o comprimento da tubulação, além de empregar sistemas de segurança para evitar danos ao equipamento. A seleção criteriosa de componentes, como motores, rodas, sensores e microcontrolador, é essencial para o desempenho do robô, enquanto a navegação autônoma representa um desafio, dada a limitação do sinal GPS dentro das tubulações. Assim, foi implementado um sistema de navegação embarcado para fornecer a localização precisa das falhas. Testes práticos em um ambiente controlado demonstraram a eficácia do robô na identificação de fissuras e medições de inclinação por meio de sensores ultrassônicos e inerciais, com a aplicação de filtros complementares para fusão de dados. Os resultados indicaram conformidade com as normas de declive mínimo para escoamento (ABNT NBR 10844), além de precisão na detecção de fissuras, com variações mínimas em relação a instrumentos de referência. Como contribuição, este trabalho apresenta uma solução de baixo custo e fácil implementação, além de destacar melhorias futuras, como navegação autônoma, integração de sensores industriais e aumento da robustez para aplicações em campo.

PALAVRAS-CHAVE: robôs; análise; inspeção; precipitação (meteorologia); tubulações.

ABSTRACT

With the annual population growth, cities expand in various sectors, particularly in infrastructure. A fundamental aspect to be analyzed is the stormwater drainage systems, which are responsible for the efficient runoff of water. Cities have kilometers of such pipelines, constructed over different periods to meet the demands of urban expansion. However, as frequently reported in the news, serious problems may arise when these pipelines are not designed or constructed properly, or when

With annual population growth, cities expand their infrastructure, including extensive networks of stormwater pipelines essential for efficient drainage. However, design flaws, inadequate construction, or lack of maintenance can lead to significant structural problems. Inspecting these pipelines is challenging due to difficult access and confined space conditions, requiring specialized equipment or exposing workers to risks. Conventional methods, usually based solely on remotely operated cameras, do not always provide sufficient information for decision-making regarding repairs. Given this limitation, this study proposes the development of a robot capable of detecting and transmitting the position of cracks, measuring the pipeline's slope angle and length, and employing safety systems to prevent equipment damage. The careful selection of components, such as motors, wheels, sensors, and microcontrollers, is essential for the robot's performance, while autonomous navigation poses a challenge due to GPS signal limitations inside pipelines. Thus, an onboard navigation system was implemented to provide precise fault location. Practical tests in a controlled environment demonstrated the robot's effectiveness in detecting cracks and measuring inclinations using ultrasonic and inertial sensors, with the application of complementary filters for data fusion. The results indicated compliance with the minimum slope standards for drainage (ABNT NBR 10844), as well as accuracy in crack detection, with minimal variations compared to reference instruments. As a contribution, this work presents a low-cost, easily implementable solution while highlighting future improvements, such as autonomous navigation, integration of industrial sensors, and increased robustness for field applications.

KEYWORDS: robots; analysis; inspection; precipitation (meteorology); pipelines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de drenagem da cidade de São Paulo.	12
Figura 2 – Montagem de tubulação para sistemas de drenagem.	13
Figura 3 – Modelagem 3D do robô de vistoria.	13
Figura 4 – Estrutura de um conduto de concreto armado com conexão do tipo ponta e bolsa.	18
Figura 5 – Ambiente interno da tubulação de águas pluviais.	18
Figura 6 – Robô de inspeção empresa Rausch.	19
Figura 7 – Robô de inspeção Redikit.	19
Figura 8 – Robô de inspeção Panoram.	20
Figura 9 – Robô de inspeção ROVVER-X.	20
Figura 10 – Exemplo de campo vetorial.	23
Figura 11 – Exemplo de diagrama de máquina de estados.	24
Figura 12 – Chassi do robô de vistoria.	28
Figura 13 – Sensor Ultrassônico.	29
Figura 14 – Sensor inercial MPU-6050.	29
Figura 15 – Ponte H modelo L293d.	30
Figura 16 – Montagem final do protótipo do robô de inspeção.	30
Figura 17 – Diagrama de blocos do robô.	31
Figura 18 – Filtro Kalman complementar.	32
Figura 19 – Tubulação experimental.	36
Figura 20 – Posicionamento do sensor inercial.	36
Figura 21 – Sensor ultrassônico instalado no robô.	37
Figura 22 – Dimensões das rodas.	38
Figura 23 – Inclinação da tubulação obtida com base no giroscópio.	39
Figura 24 – Teste na rampa de acesso.	40
Figura 25 – Obtenção do ângulo utilizando o goniômetro.	40
Figura 26 – Inclinação da tubulação obtida a partir de diferentes métodos de estimativa.	41
Figura 27 – União dos tubos de concreto armado.	41
Figura 28 – Dados do sensor ultrassônico instalado em operação.	42
Figura 29 – Registro visual da trinca identificada na tubulação.	43
Figura 30 – Teste de comparação de medidas.	43

Figura 31 – Robô com os sensores ultrassônicos posicionados para cobertura completa da tubulação.	44
Figura 32 – Configuração experimental para teste de distância percorrida por rotação da roda.	44
Figura 33 – Dimensões do motor DC 6-12V JGY370 com caixa de redução.	50
Figura 34 – Roda <i>off-road</i> com dimensões de 85 x 38 mm.	51
Figura 35 – Encoder magnético modelo Baumer HOG 8.	51
Figura 36 – Equipamento 39DL Plus da Evident Scientific.	52
Figura 37 – Sensor Inercial BNO055 da Bosch Sensortec.	52
Figura 38 – Orange Pi 5 Pro (16GB RAM, 256GB eMMC).	53
Figura 39 – Câmera Basler MED ace 8.9 MP 42.	53

LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{F}(x, y)$	Campo vetorial em duas dimensões
$\vec{F}(x, y, z)$	Campo vetorial em três dimensões
$P(x, y), Q(x, y)$	Componentes do campo vetorial em 2D
$P(x, y, z), Q(x, y, z), R(x, y, z)$	Componentes do campo vetorial em 3D
$\Delta\theta(t)$	Erro de estimativa angular
$\Delta b(t)$	Erro de polarização do giroscópio
$\eta_g(t)$	Ruído do giroscópio
$\eta_a(t)$	Ruído do acelerômetro
$\eta_b(t)$	Ruído da polarização do giroscópio
x_k	Vetor de estados no instante k
F, G, H	Matrizes do modelo no espaço de estados
Q, R	Matrizes de ruído do processo e da medição
$\delta F, \delta G$	Distúrbios modelados no filtro de Kalman robusto
Δ_k	Parâmetro que modela as incertezas do sistema
N_F, N_G	Componentes da matriz de distúrbios
w_k, v_k	Ruídos associados ao modelo e à medição

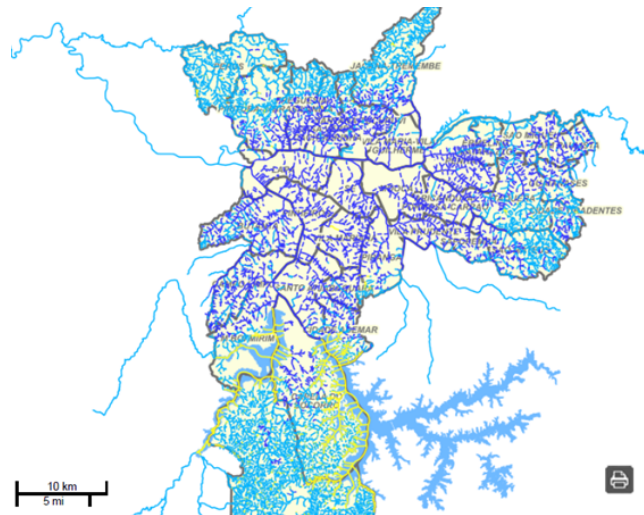
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	– Objetivos	14
1.2	– Contribuições	15
1.3	– Estrutura da Dissertação	16
2	AMBIENTE E TECNOLOGIAS PARA INSPEÇÃO ROBÓTICA EM TUBULAÇÕES	17
2.1	– Características e Normas das Tubulações de Águas Pluviais	17
2.2	– Robôs de Inspeção Disponíveis no Mercado	19
2.3	– Robôs de Inspeção em Pesquisas Acadêmicas	21
2.4	– Sistemas de Navegação para Robôs de Inspeção	22
2.5	– Sensores na Robótica Móvel	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	– Componentes Utilizados no Protótipo	28
3.2	– Fusão de Sensores Baseada no Filtro de Kalman	31
3.2.1	– <i>Modelagem no Espaço de Estados</i>	32
3.2.2	– <i>Discretização e Implementação do Filtro de Kalman</i>	33
3.2.3	– <i>Filtro de Kalman Robusto</i>	33
3.2.3.1	– <i>Algoritmo do Filtro de Kalman Robusto</i>	34
3.2.3.2	– <i>Considerações Finais</i>	35
3.3	– Método de testes	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5	CONCLUSÃO DA DISSERTAÇÃO	45
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICE A – CRIAÇÃO DE UM ROBÔ PARA TESTE DE CAMPO	50

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento urbano, cidades ao redor do mundo contam com extensos sistemas de tubulações subterrâneas que abrangem água potável, esgoto, águas pluviais e, em algumas localidades, tubulações de gás. Tomando São Paulo como exemplo, o sistema de águas pluviais da cidade possui milhares de quilômetros de tubulações. De acordo com o Plano Diretor, mais de 13 km de tubulações para águas pluviais serão construídos (São Paulo (Município), 2024). Nesse contexto, um sistema de inspeção e monitoramento dessas tubulações será fundamental para garantir a funcionalidade e a manutenção adequada da infraestrutura. Na Figura 1, pode-se visualizar o mapa de São Paulo com o sistema de drenagem.

Figura 1 – Mapa de drenagem da cidade de São Paulo.



Fonte: (GeoSampa - Prefeitura de São Paulo, 2024).

Além disso, a aplicação de um robô de inspeção em tubulações de águas pluviais é particularmente relevante em áreas urbanas, onde o acesso humano é difícil e perigoso. As galerias de águas pluviais frequentemente atravessam propriedades privadas e estão localizadas próximas a edificações, tornando a inspeção manual impraticável ou arriscada. Vazamentos nessas tubulações podem causar danos significativos às estruturas adjacentes, o que torna a inspeção preventiva ainda mais necessária. A Figura 2 mostra a construção de uma tubulação de concreto com uma caixa de inspeção instalada.

Diante desse cenário, o desenvolvimento deste trabalho surge da necessidade de aprimorar os processos de inspeção em tubulações de águas pluviais. Os métodos convencionais de inspeção são limitados, baseando-se no controle manual e na análise visual, o que frequentemente resulta em avaliações imprecisas e ineficazes. Este projeto busca desenvolver um robô de inspeção capaz não

Figura 2 – Montagem de tubulação para sistemas de drenagem.

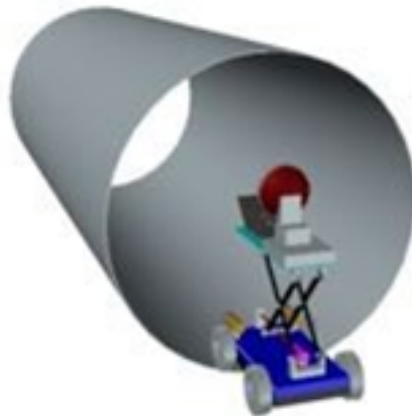


Fonte: (Realfa Engenharia, 2025).

apenas de detectar trincas, mas também de mensurá-las, identificar sua localização na tubulação e verificar se o ângulo de declive está em conformidade com o projeto executivo.

O desenvolvimento de robôs para inspeção envolve desafios significativos, como a seleção adequada de sensores, motores e atuadores, além da implementação de um sistema de navegação eficiente. A precisão na medição de distância e profundidade em relação a um ponto de referência é essencial, especialmente para a identificação de fissuras nas tubulações. Além disso, é fundamental que o sistema seja resistente à água, pois, embora a inspeção ocorra com a tubulação vazia, o robô pode encontrar resíduos ao longo do percurso. A Figura 3 apresenta o modelo 3D desenvolvido no AutoCAD, que ilustra a atuação do robô.

Figura 3 – Modelagem 3D do robô de vistoria.



Fonte: Autor.

Além disso, a escolha do sistema de navegação é uma decisão crítica, pois, dentro dessas tubulações, não há sinal de GPRS ou GPS. Portanto, é necessário utilizar sistemas embarcados e conexões de dados

e energia por meio de cabos. Outra alternativa é desenvolver um sistema operado por um profissional treinado, com a segurança garantida por meio de uma máquina de estados ou de um campo vetorial.

Pode-se definir os diagramas de máquina de estados como uma estrutura de ações em que o robô, por exemplo, pode transitar entre diferentes estados quando estímulos específicos causam transições entre eles (SOUSA et al., 2011). Um exemplo prático pode ser observado em robôs de futebol, que precisam executar diversas tarefas, como driblar, chutar e cobrar pênaltis, cada uma ocorrendo de maneira distinta (BIANCHI; REALI-COSTA, 2000). Esse tipo de sistema é comumente empregado quando se lida com múltiplas situações ou cenários distintos (NETO et al., 2005).

Diagramas de máquina de estados podem ser definidos como uma estrutura de ações na qual o robô transita entre diferentes estados, com transições que ocorrem mediante estímulos específicos (SOUSA et al., 2011). Esse conceito é aplicado, por exemplo, em robôs de futebol, que necessitam executar tarefas variadas, como driblar, chutar e cobrar pênaltis, cada uma realizada de forma distinta (BIANCHI; REALI-COSTA, 2000). Esse tipo de sistema é amplamente utilizado em contextos que envolvem múltiplas situações ou cenários distintos (NETO et al., 2005).

O campo vetorial, por sua vez, é desenvolvido para orientar o robô a convergir e acompanhar um trajeto previamente estabelecido, que pode variar ao longo do tempo. Esse método é especialmente relevante em trajetos estáticos fechados, nos quais um robô com dinâmica de integrador único converge para o ciclo limite do sistema dinâmico (REZENDE, 2022). Tal abordagem é aplicável tanto para robôs com sistemas de rodas quanto para drones.

Adicionalmente, destaca-se a possibilidade de conciliar ambos os métodos. No campo vetorial, os vetores fornecem direções e magnitudes para guiar o robô. Contudo, ao encontrar uma bifurcação, o robô pode recorrer à máquina de estados para decidir o caminho a seguir (FILHO, 2023).

Este estudo apresentou os componentes para a construção do robô de inspeção, abordando o sistema de navegação escolhido e as alternativas para a detecção de trincas. Também foram definidos a distância e a profundidade em relação ao ponto inicial da operação. Além disso, foram analisadas as tubulações, detalhando a estrutura do robô, os testes realizados e os resultados obtidos, seguidos pelas conclusões do trabalho.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um robô para inspeção de galerias, capaz de realizar vistorias de maneira eficiente. O robô será projetado para superar as limitações dos modelos existentes, que dependem de controle manual e análise visual para identificar fissuras nas tubulações, mantendo um custo competitivo. Para isso, este estudo definirá os componentes estruturais do robô, incluindo

motores, rodas, sensores e microcontroladores, além de abordar o desafio da navegação em ambientes sem sinal de GPS.

Serão explorados e comparados dois sistemas de navegação: a navegação por campo vetorial e a utilização de máquinas de estados, considerando a aplicação desses métodos como sistemas de segurança. Além disso, o trabalho discutirá as possibilidades para a detecção de falhas em tubulações de águas pluviais, incluindo a medição da distância e da profundidade das fissuras em relação ao ponto inicial.

Ao final, espera-se apresentar um protótipo funcional do robô, demonstrando sua capacidade de realizar inspeções e fornecendo dados precisos sobre a condição estrutural das tubulações, com o intuito de contribuir para a melhoria no sistema de fiscalização e manutenção das redes de tubulações.

1.2 Contribuições

Esta dissertação apresenta contribuições no desenvolvimento de robôs autônomos de inspeção, com foco específico nas tubulações de águas pluviais. As principais contribuições podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- **Desenvolvimento de um Robô Autônomo de Inspeção:** Projeto e construção de um protótipo funcional de robô autônomo capaz de realizar inspeções detalhadas em tubulações de águas pluviais. Seleção e integração de componentes, como motores, rodas, sensores e microcontroladores, assegurando a robustez e eficiência do sistema.
- **Implementação de Sistemas de Navegação Avançados:** Exploração e comparação de dois sistemas de navegação: a navegação por campo vetorial e a utilização de máquinas de estado. Possibilidade de desenvolvimento de uma solução híbrida que combina ambos os métodos, maximizando a eficiência e adaptabilidade do robô em ambientes complexos e sem sinal de GPS.
- **Metodologia para Detecção de Falhas Estruturais:** Definição das premissas e metodologias para a detecção de trincas e falhas nas tubulações de águas pluviais. Implementação de sensores ultrassônicos para a identificação de fissuras, bem como a mensuração da distância e profundidade dessas falhas em relação ao ponto inicial.
- **Resolução de Desafios Específicos de Inspeção em Tubulações:** Solução dos problemas associados à navegação e detecção de falhas em ambientes subterrâneos e de difícil acesso. Proposta de métodos para garantir a precisão na determinação da inclinação da galeria e a identificação de defeitos estruturais, eliminando a dependência de análises visuais superficiais.

- **Análise e Validação de Resultados:** Realização de testes práticos com o protótipo desenvolvido, validando a eficácia do robô na detecção de falhas e na navegação dentro das tubulações. Apresentação de resultados que comprovam a viabilidade do uso de robôs autônomos em inspeções de galerias de águas pluviais, destacando melhorias em comparação aos métodos tradicionais.
- **Flexibilidade e Potencial de Adaptação:** Demonstração da flexibilidade do robô autônomo para diversas aplicações, através da capacidade de integrar novos sensores e executar múltiplas operações simultaneamente. Contribuição para o avanço tecnológico na área de inspeção e manutenção de infraestruturas, com potencial de adaptação para outros contextos além das tubulações de águas pluviais.

Ao abordar esses pontos, esta dissertação não apenas avança o estado da arte em robótica de inspeção, mas também oferece soluções práticas para problemas reais enfrentados na manutenção de infraestruturas urbanas e industriais.

1.3 Estrutura da Dissertação

No **Capítulo 1**, é apresentada uma introdução ao trabalho, abordando as motivações, os objetivos e as contribuições do estudo.

O **Capítulo 2** oferece um estudo do ambiente, analisa os robôs disponíveis no mercado e os desenvolvidos em teses de mestrado e doutorado. Também discute os sensores e sistemas de movimentação utilizados nesse contexto. Além disso, são definidos os objetivos da dissertação e as contribuições deste trabalho.

No **Capítulo 3**, são discutidos os materiais empregados na criação do protótipo, o sistema de movimentação selecionado e sua aplicação prática. Adicionalmente, é abordada a integração e fusão dos sensores para garantir um desempenho eficiente.

O **Capítulo 4** detalha os testes realizados e os resultados obtidos com o protótipo, utilizando uma tubulação modelo.

Por fim, no **Capítulo 5**, são apresentadas as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

2 AMBIENTE E TECNOLOGIAS PARA INSPEÇÃO ROBÓTICA EM TUBULAÇÕES

Neste capítulo, realizou-se uma análise do ambiente das tubulações de águas pluviais, considerando suas características e as normas vigentes. Em seguida, foi conduzido um estudo de mercado para identificar os equipamentos disponíveis para vistorias, além de revisar trabalhos desenvolvidos em cursos de pós-graduação que abordam análises desse tipo de tubulação. Também foram pesquisados sensores de fácil disponibilidade e com preços acessíveis para o desenvolvimento do projeto. Por fim, foram estudados os métodos de máquina de estados e campo vetorial para fornecer alertas ao operador.

2.1 Características e Normas das Tubulações de Águas Pluviais

Concentrou-se o estudo nas tubulações de águas pluviais, que constituem sistemas destinados a captar águas de chuva por coletores pluviais e conexões privadas, direcionando-as para desaguadouros. Adicionalmente, esses sistemas são dotados de poços de visita, instalados em pontos de mudança de direção, variações de declive e alterações de diâmetro ao longo da rede de drenagem (FILHO; COSTA, 2012). Um desafio premente nas áreas urbanas é a gestão e o monitoramento eficazes das tubulações de águas pluviais, cujo acesso muitas vezes é difícil para os seres humanos, especialmente quando essas galerias atravessam propriedades privadas e estão próximas a edificações. Em caso de vazamentos, as consequências podem ser severas, incluindo danos à estrutura das edificações afetadas.

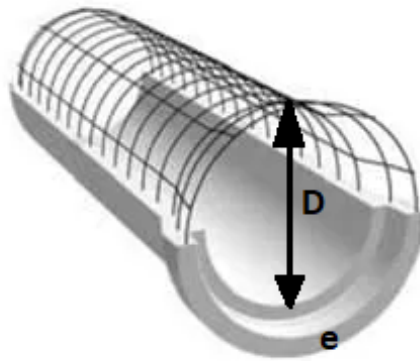
O projeto desenvolveu-se com base na norma ABNT NBR 8890:2020, que define todas as características estruturais para tubos de concreto de seção circular utilizados em redes de águas pluviais e esgoto sanitário. Foram analisados os dados e observou-se que os diâmetros disponíveis para essa aplicação específica variam de 200 a 2.000 mm. A norma também permite avaliar a variação de espessura desses tubos de acordo com o diâmetro:

- **Tubos com diâmetro de 300 mm a 600 mm:** espessura variando entre 30 mm e 50 mm;
- **Tubos com diâmetro de 700 mm a 1.000 mm:** espessura variando entre 60 mm e 75 mm;
- **Tubos com diâmetro acima de 1.200 mm:** espessura geralmente entre 90 mm e 120 mm.

A Figura 4 ilustra a estrutura de um conduto de concreto armado com conexão do tipo ponta e bolsa.

Além disso, é importante destacar que a distância máxima entre as bocas de lobo é de 60 metros, e o declive da tubulação deve ter, no mínimo, uma queda de 0,5% em relação ao seu comprimento,

Figura 4 – Estrutura de um conduto de concreto armado com conexão do tipo ponta e bolsa.

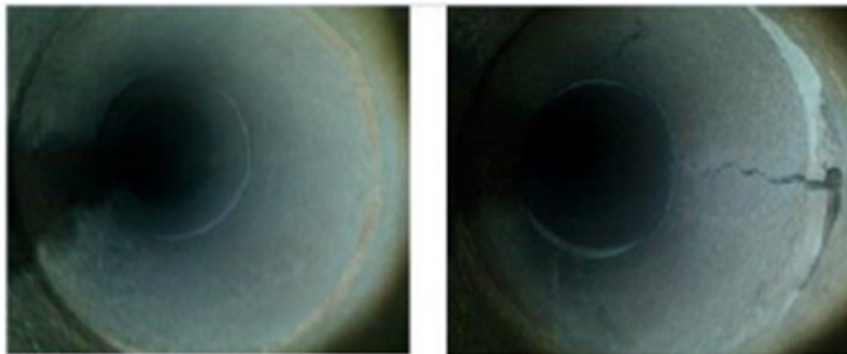


Fonte: (AECweb, 2025).

conforme a norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989). Esses parâmetros são pré-requisitos na elaboração do sistema de drenagem, garantindo uma captação eficiente das águas pluviais. O sistema oferece uma variedade de diâmetros para atender às vazões demandadas em cada região.

Durante a análise do ambiente, conforme ilustrado na Figura 5, observam-se diversas dificuldades. Mesmo após o esvaziamento do sistema, ainda há pontos com poças de água, falta de iluminação e a presença de gases, o que resulta em uma avaliação superficial da estrutura por meio das imagens capturadas pela câmera.

Figura 5 – Ambiente interno da tubulação de águas pluviais.



Fonte: Autor.

Em conclusão, a caracterização das tubulações de águas pluviais ressalta a importância de um sistema de drenagem bem projetado, capaz de atender às exigências de diferentes vazões e garantir a segurança das estruturas urbanas.

2.2 Robôs de Inspeção Disponíveis no Mercado

Nesta seção, conduziu-se um estudo de mercado para avaliar os robôs disponíveis para compra e sua aplicabilidade na inspeção de tubulações de concreto destinadas ao sistema de águas pluviais.

O robô de inspeção da Rausch é projetado para transitar em tubulações de 6 a 48 polegadas, com um alcance máximo de 167 metros, limitado pelo comprimento do cabo. Ele possui um contador de distância, um sistema de elevação e movimentação da câmera, além de uma câmera equipada com LEDs, permitindo ao operador visualizar a condição interna das tubulações. Na Figura 6, pode-se observar o robô de inspeção da empresa Rausch.

Figura 6 – Robô de inspeção empresa Rausch.



Fonte: (CCTV..., 2024).

Na sequência, tem-se o robô de inspeção RediKit, da empresa Cues, conforme ilustrado na Figura 7. Este equipamento compacto e portátil é fabricado com materiais robustos, capazes de resistir até mesmo em tubulações de esgoto. Ele possui um sistema de câmera que pode girar e inclinar, proporcionando uma visão detalhada do interior da tubulação, além de LEDs para iluminação e um contador de distância. A análise da estrutura da tubulação é realizada por meio das imagens fornecidas pela câmera.

Figura 7 – Robô de inspeção Redikit.



Fonte: (REDIKIT..., 2024).

O robô de inspeção PANORAMO SI 4K, da IBAK, opera de maneira semelhante aos anteriores, utilizando imagens da câmera para a vistoria. Seu diferencial é a câmera 4K, capaz de girar 360 graus, e um módulo que permite vistorias em tubulações com inclinação de 90 graus. Este sistema oferece uma visão panorâmica detalhada do interior dos poços de visita. Na Figura 8, pode-se visualizar o robô PANORAMO.

Figura 8 – Robô de inspeção Panoramato.



Fonte: (PANORAMO..., 2024).

Por fim, tem-se o robô ROVVER X, da Envirosight, um dispositivo versátil e robusto, projetado para enfrentar desafios em tubulações de esgoto. Equipado com um sistema de câmera que gira 360 graus e inclina até 145 graus, ele oferece uma visão detalhada do interior da tubulação. O robô possui rodas intercambiáveis de diversos tamanhos, um drivetrain de 6 rodas e acessórios como lâmpadas auxiliares e medidores a laser. O controle é feito via touchscreen, com funções de medição e conectividade Wi-Fi para upload de dados. Na Figura 9, pode-se visualizar o ROVVER X, que é capaz de operar em tubulações de 6 a 96 polegadas.

Figura 9 – Robô de inspeção ROVVER-X.



Fonte: (ROVVER..., 2024).

Observou-se que esses modelos operam de maneira semelhante, utilizando sistemas de câmeras que permitem ao operador realizar análises em tempo real da estrutura por meio das imagens capturadas, na

tabela 1 faz-se a comparação dos modelos especificados. É importante ressaltar que esses equipamentos são, em sua maioria, importados, o que pode representar uma barreira para sua aquisição devido aos custos elevados, desafios logísticos relacionados ao transporte e prazos de entrega prolongados. Além disso, é necessário pontuar que, para todos os equipamentos, a análise das fissuras baseia-se em imagens capturadas por câmeras, o que, mesmo com o auxílio de IA (inteligência artificial), compromete a efetividade no dimensionamento das fissuras.

Tabela 1 – Comparação entre Robôs de Inspeção

Robô	Robô da Rausch	RediKit da Cues	PANORAMO SI 4K da IBAK	ROVVER X da Envirosight
Tamanho da Tubulação	6 a 48 polegadas	Variado	Tubulações na horizontal e vertical	6 a 96 polegadas
Comprimento Máximo	167 metros	Não especificado	Não especificado	Não especificado
Sistema de Câmera	Câmera com LEDs	Gira e inclina	Câmera 4K panorâmica	Gira 360°, inclina 145°
Iluminação	LEDs	LEDs	LEDs	Lâmpadas auxiliares
Contador de Distância	Sim	Sim	Sim	Sim
Movimentação da Câmera	Sim	Sim	Sim	Sim
Resistência	Uso em galerias	Uso robusto	Ambientes industriais	Condições adversas
Diferenciais	Sistema de elevação	Portátil	Imagens panorâmicas 4K	Drivetrain de 6 rodas
Origem	Importado	Importado	Importado	Importado

Fonte: Autor.

2.3 Robôs de Inspeção em Pesquisas Acadêmicas

Nesta seção, realizou-se uma pesquisa na plataforma IEEE xplora utilizando as palavras-chave "*robot*", "*Pipeline inspection*", "*Cracks*", "*Galleries*", aplicando um filtro de 10 anos. O levantamento resultou em diversos artigos que estudam a utilização de robôs para a vistoria de galerias. Esses artigos abordam diferentes tecnologias e estratégias para atender às necessidades de setores como saneamento, petróleo e gás, com foco na identificação de falhas estruturais, como trincas, ferrugem e vazamentos.

A adaptação dos robôs às variações de diâmetro das tubulações é um dos desafios mais recorrentes. Por exemplo, Li et al. (2016) desenvolveram um robô com ajuste ativo de diâmetro baseado no microcontrolador ATmega64, permitindo flexibilidade em ambientes com tubulações de tamanhos variados.

Complementando essa abordagem, Kim et al. (2020) propuseram um mecanismo de navegação para tubos de aço, com foco em eficiência energética e estabilidade em condições adversas. Essas soluções são especialmente importantes em tubulações heterogêneas, comuns em infraestruturas antigas.

No campo da percepção e detecção de falhas estruturais, avanços significativos foram apresentados. Gunatilake, Kodagoda e Thiyagarajan (2019) propuseram o uso de sensores UHF-RFID para navegação baseada em SLAM, eliminando a necessidade de baterias nas tags e possibilitando a detecção de irregularidades na superfície interna das tubulações. Além disso, Bandala et al. (2018) desenvolveram um robô adaptativo equipado com sensores especializados na detecção de ferrugem.

A utilização de sensores ópticos também é uma estratégia eficaz para a detecção de trincas. Neste exemplo, Masuta et al. (2020) empregaram sensores de visão baseados em redes de Bragg, com alta sensibilidade, para identificar ramificações de tubulações. Esses sensores apresentam boa precisão e poderiam ser aplicados para detectar deformações e trincas em tubulações.

Outro aspecto importante é a autonomia dos robôs para operações em locais de difícil acesso. O projeto KANTARO, apresentado por Nassiraei et al. (2017), desenvolveu um robô totalmente autônomo, projetado para inspeções em redes de esgoto.

A acessibilidade e o custo também foram tratados em alguns estudos. Por exemplo, Mthimkhulu, Adebajo e Adeliyi (2021) propuseram um robô de baixo custo para inspeção e detecção de vazamentos no setor de petróleo e gás. Além disso, outros estudos exploraram o uso de comunicação sem fio, como o trabalho de Wu et al. (2019), que desenvolveu um sistema de transmissão de dados em tempo real, reduzindo a dependência de cabos.

Por fim, a integração de técnicas de visão computacional e aprendizado profundo tem sido objeto de estudo. Um exemplo é o trabalho de He et al. (2016), que se destaca pelo uso de aprendizado profundo para o reconhecimento de imagens, uma técnica aplicável à identificação de trincas e falhas estruturais a partir de imagens capturadas por robôs. Para uma melhor visualização, a Tabela 2 apresenta a comparação e as principais características de cada robô.

Essa pesquisa demonstra a diversidade de abordagens no campo da inspeção de tubulações. Desde soluções mecânicas adaptativas até o uso de sensores e inteligência artificial, os robôs têm se consolidado como ferramentas essenciais para a manutenção preventiva e a melhoria da infraestrutura urbana e industrial. A capacidade de identificar trincas, ferrugem e outras falhas estruturais em tempo real reforça a relevância dessas inovações para o monitoramento e a manutenção eficiente das tubulações.

2.4 Sistemas de Navegação para Robôs de Inspeção

Para que um robô seja verdadeiramente autônomo, ele deve ser capaz de se movimentar sem intervenção humana, utilizando componentes e sistemas que atendam a essa necessidade. No entanto, a autonomia pode ser complementada por sistemas que forneçam suporte ao operador em momentos em que o controle manual seja necessário. Nesse contexto, abordaram-se dois sistemas: o campo vetorial e a máquina de estados, aplicados tanto para navegação autônoma quanto como ferramentas auxiliares no controle assistido por operadores.

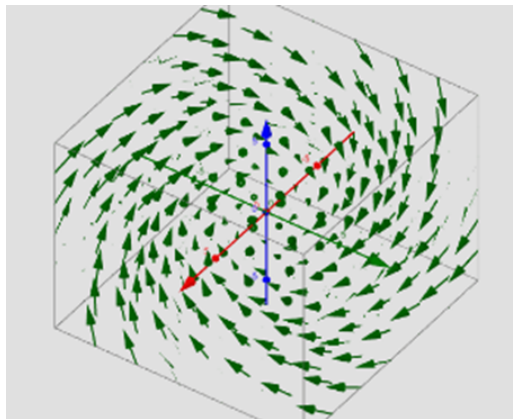
O campo vetorial é uma ferramenta matemática utilizada para descrever a força e a direção do movimento em cada ponto de um determinado espaço. Em termos práticos, trata-se de uma função que atribui um vetor a cada ponto do espaço, indicando uma direção e uma magnitude

específicas. Essa abordagem é amplamente aplicada em sistemas mecânicos, dinâmica de fluidos, campos eletromagnéticos e, especialmente, no planejamento e controle de movimento de robôs. Estudos como o de Nakajima (2013) abordam o uso dessas ferramentas matemáticas em diferentes contextos.

Na robótica, o campo vetorial não apenas orienta o robô em sua trajetória, mas também pode ser configurado para gerar vetores que desviem de obstáculos, promovendo segurança em ambientes complexos. Além disso, quando um operador assume o controle do robô, os campos vetoriais podem atuar como guias visuais ou automáticos, auxiliando na manutenção de trajetórias seguras e corrigindo desvios indesejados. Por exemplo, em um ambiente com obstáculos, o sistema pode sugerir ao operador as melhores rotas ou até aplicar ajustes automáticos para evitar colisões. A aplicação dessa abordagem pode ser verificada em robôs futebolísticos, como descrito por Rezende, Silva e Lima (2021).

Softwares de simulação, como MATLAB e ANSYS, são amplamente utilizados para visualizar campos vetoriais por meio de diagramas de vetores ou linhas de fluxo. Essa prática facilita o entendimento de como os campos vetoriais influenciam o movimento, sendo uma ferramenta essencial no desenvolvimento de robôs com suporte tanto autônomo quanto assistido. Na Figura 10, é possível observar um exemplo de campo vetorial.

Figura 10 – Exemplo de campo vetorial.



Fonte: (BIANCHINI, 2024).

As equações que definem os campos vetoriais podem ser expressas para duas ou três dimensões (x, y ou x, y, z), como ilustrado nas Eq. 2.1 e 2.2:

$$\vec{F}(x, y) = P(x, y)\hat{i} + Q(x, y)\hat{j} \quad (2.1)$$

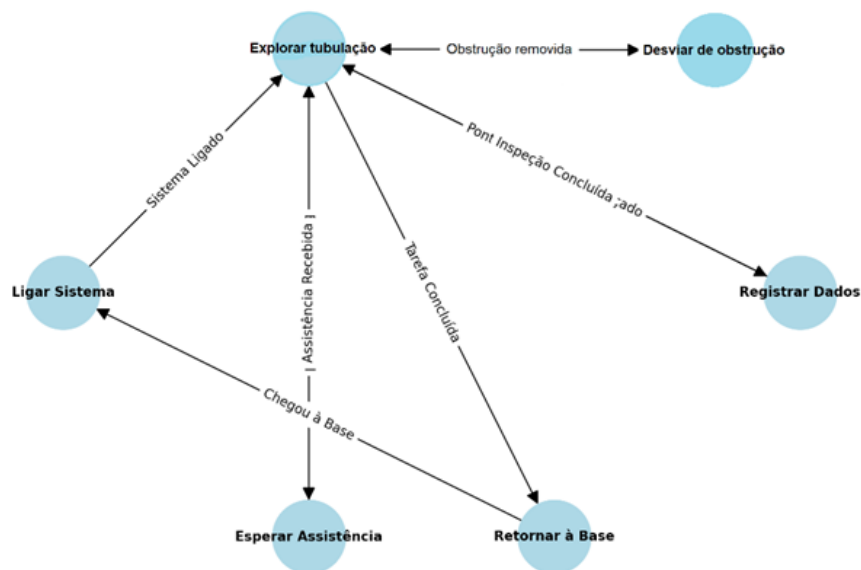
$$\vec{F}(x, y, z) = P(x, y, z)\hat{i} + Q(x, y, z)\hat{j} + R(x, y, z)\hat{k} \quad (2.2)$$

onde P , Q e R são funções que determinam a magnitude dos componentes do vetor em cada direção.

Já a máquina de estados é um modelo matemático que descreve o comportamento de sistemas com um número finito de estados distintos. Esse modelo é amplamente utilizado na robótica para gerenciar transições entre diferentes modos operacionais ou comportamentos do robô. Diversos estudos exploram a aplicação desse conceito, como o trabalho de Baumgartl et al. (2013), que discute o uso de linguagens específicas de domínio (DSLs) e geradores de código no desenvolvimento de sistemas robóticos. Além disso, a máquina de estados é útil para apoiar o controle manual do robô, ajustando dinamicamente os estados operacionais de acordo com as entradas do operador e as condições do ambiente.

No contexto de controle assistido, a máquina de estados pode alternar automaticamente entre modos, como "Explorar Área", "Evitar Obstáculo" e "Manter Velocidade", suplementando o controle do operador. Isso é particularmente útil, pois, como humano, o operador está sujeito a falhas ou desatenção. Dessa maneira, a máquina de estados contribui para melhorar a eficiência das operações. Na Figura 11, é possível observar um exemplo de diagrama de máquina de estados aplicado a um robô de inspeção.

Figura 11 – Exemplo de diagrama de máquina de estados.



Fonte: Autor.

Pelo exposto, tanto a máquina de estados quanto o campo vetorial têm suas vantagens e limitações. A máquina de estados é mais simples e intuitiva para sistemas com estados discretos e transições bem definidas, sendo útil para gerenciar modos de operação assistida. Por outro lado, campos vetoriais oferecem maior flexibilidade em sistemas dinâmicos e contínuos, apresentando maior complexidade de implementação, mas proporcionando suporte automatizado ao operador, como orientação de rotas e

prevenção de colisões. A escolha entre os dois métodos dependerá das necessidades de cada projeto e do equilíbrio entre navegação autônoma e suporte ao operador.

2.5 Sensores na Robótica Móvel

O mercado de robótica móvel está em ascensão, com estimativas de que o valor atual do mercado é de USD 6,99 bilhões, podendo atingir USD 23,56 bilhões até 2029 (INTELLIGENCE, 2023). De acordo com os últimos relatórios e análises de mercado, diversos tipos de sensores são amplamente utilizados nessa área. Destacam-se alguns sensores essenciais para navegação, detecção de obstáculos e interação com o ambiente:

- **LIDAR (Light Detection and Ranging):** Sensores LIDAR são amplamente utilizados por sua capacidade de mapeamento e navegação. Eles fornecem medições de distância emitindo feixes de laser e medindo o tempo que leva para as reflexões retornarem. Esses sensores são empregados em veículos autônomos e drones, apresentando boa precisão na criação de mapas 3D.
- **Câmeras:** As câmeras podem ser utilizadas para reconhecimento de objetos, navegação e desvio de obstáculos. Câmeras de alta resolução, combinadas com algoritmos avançados de processamento de imagem, ajudam os robôs a interpretar seus arredores.
- **IMU (Unidade de Medição Inercial):** Sensores IMU medem a movimentação e a orientação de um objeto em três eixos (x, y, z), combinando acelerômetros e giroscópios. Esses sensores captam dados como aceleração linear, velocidade angular e, em alguns modelos, o campo magnético, permitindo calcular a posição e a orientação do objeto no espaço.
- **Ultrassônicos:** Sensores ultrassônicos usam ondas sonoras para detectar objetos e medir distâncias. Econômicos e robustos, eles também podem ser utilizados para detectar defeitos em estruturas.
- **Sensores de Proximidade:** Sensores de proximidade detectam a presença de objetos próximos sem a necessidade de contato físico. Entre os diferentes tipos, destacam-se:
 - **Indutivos:** Utilizam campos eletromagnéticos para detectar objetos metálicos.
 - **Capacitivos:** Detectam mudanças na capacitância causadas pela aproximação de qualquer material, seja metálico ou não.
 - **Ópticos:** Utilizam luz infravermelha, visível ou laser. A presença de um objeto é detectada pela interrupção do feixe de luz ou pela reflexão da luz de volta ao sensor.

Esses sensores são amplamente utilizados devido à sua precisão e confiabilidade em diferentes condições ambientais.

- **GPS (Global Positioning System):** O GPS é um sistema de navegação por satélite que fornece informações de localização em qualquer lugar da Terra. Funciona por meio de satélites em órbita que emitem sinais de rádio captados por receptores na superfície terrestre, permitindo calcular e determinar a posição geográfica do usuário.
- **Encoder:** O encoder é um sensor utilizado para medir a posição, velocidade ou direção de movimento de um eixo ou motor em sistemas mecânicos. Ele funciona convertendo o movimento rotacional ou linear em sinais elétricos que podem ser interpretados por um controlador ou sistema eletrônico.
- **Sensores de Temperatura:** Esses sensores monitoram a temperatura para evitar superaquecimento de componentes eletrônicos e motores.

Com base neste estudo de sensores, foram selecionados os dispositivos mais adequados para o modelo proposto, considerando suas aplicações específicas. Após a implementação, testes foram realizados para avaliar a eficácia e a viabilidade dos sensores escolhidos.

Tabela 2 – Comparativo dos robôs desenvolvidos em projetos acadêmicos

Artigo	Sensores	Sistema de Navegação	Transmissão de Dados	Alimentação Elétrica	Outras Características
Saviato et al. (2024)	Ultrassom, IMU, Encoder, Câmera	Teleoperado	Cabo USB	12V ou 24V via cabo	Detecção de trincas, inclinação e inspeção visual
Li et al. (2016)	Sensores inerciais, Encoder	Adaptação ativa ao diâmetro do tubo	Não especificado	Bateria	Limpeza e inspeção com adaptação a diâmetros diferentes
Kim et al. (2020)	Sensores de proximidade	Navegação otimizada para tubos de aço	Comunicação sem fio	Bateria	Otimização para tubos de aço, design compacto
Gunatilake et al. (2019)	RFID UHF, SLAM	SLAM	Comunicação sem fio	Bateria	Uso de RFID para percepção no interior de tubos
Bandala et al. (2018)	Sensores para detecção de ferrugem	Não especificado	Não especificado	Bateria	Inspeção com foco na detecção de ferrugem
Masuta et al. (2020)	Sensor de visão por fibra óptica	Reconhecimento de ramificações	Não especificado	Não especificado	Identificação de tubos secundários
Nassiraei et al. (2017)	Câmeras, sensores de distância	Autônomo	Comunicação sem fio	Bateria	Robô totalmente autônomo para inspeção de esgoto
Mthimkhulu et al. (2021)	Sensores para vazamentos	Não especificado	Comunicação sem fio	Bateria	Detecção de vazamentos no setor de petróleo e gás
He et al. (2016)	Visão computacional	Aprendizado profundo	Não especificado	Não especificado	Verificação de imagens para detecção de falhas

Fonte: Autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, abordam-se os componentes e os diagramas técnicos para o desenvolvimento do robô de vistoria.

3.1 Componentes Utilizados no Protótipo

Nesta seção, foram analisados os componentes disponíveis no mercado, considerando o custo e a disponibilidade como critérios principais. Assim, os componentes selecionados atenderam a esses requisitos, consistindo em peças e sensores compatíveis com a plataforma Arduino.

Iniciou-se o desenvolvimento do protótipo com a aquisição de um kit de chassi 4WD compatível com a plataforma Arduino, conforme ilustrado na Figura 12. O kit é composto por placas de acrílico que formam a estrutura do chassi, quatro rodas com diâmetro de 65 mm, equipadas com pneus de borracha para proporcionar maior aderência. Cada roda é acoplada a um motor dedicado, permitindo movimentação independente.

Figura 12 – Chassi do robô de vistoria.

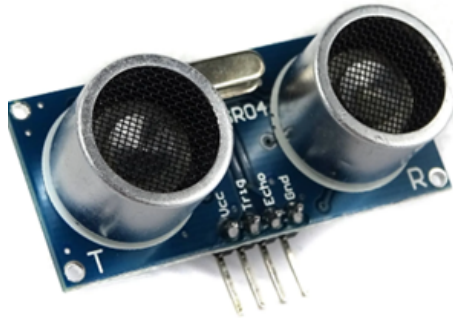


Fonte: Autor.

A segunda etapa consistiu na seleção de sensores, com dois dispositivos escolhidos para compor o protótipo. O primeiro sensor selecionado foi o de ultrassom, conforme ilustrado na Figura 13, utilizado para detectar trincas ao longo do trajeto. Este sensor opera por meio da emissão de pulsos sonoros e da captação do eco refletido, permitindo o cálculo do tempo de propagação da onda. Variações nesse tempo de resposta indicam possíveis falhas na tubulação. A escolha desse sensor foi motivada por sua similaridade operacional com sensores ultrassônicos empregados em equipamentos para a detecção de falhas em soldas de tubulações. Neste caso ultrassom opera emitindo ondas sonoras de alta frequência

que se propagam pelo material e refletem em descontinuidades, permitindo identificar defeitos internos através da análise dos ecos recebidos.

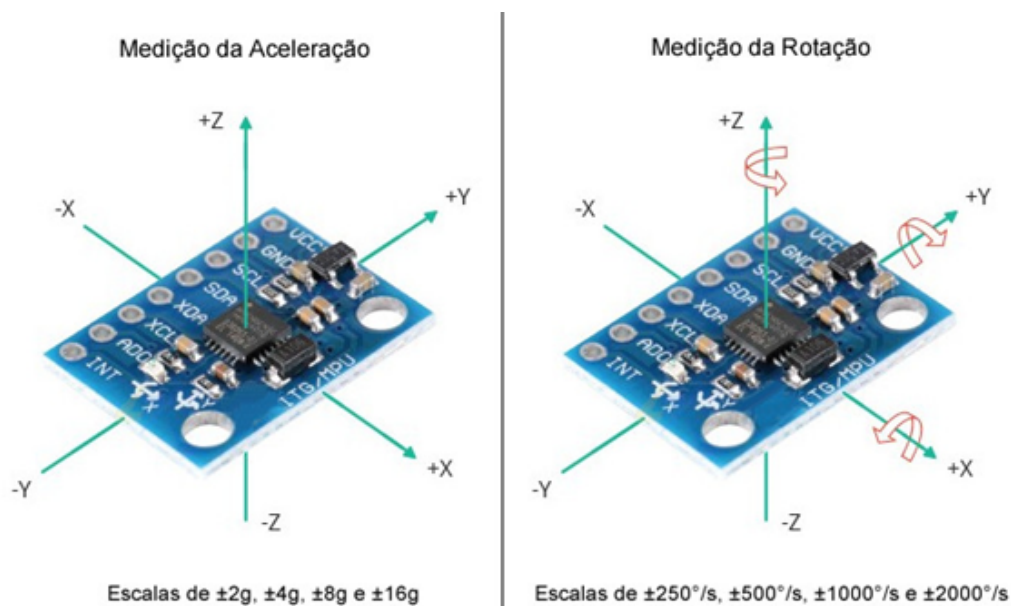
Figura 13 – Sensor Ultrassônico.



Fonte: (Ardurobótica, 2025)

Na continuidade do processo de seleção, foi escolhido um sensor inercial composto por acelerômetro e giroscópio. Sensores inerciais possuem diversas aplicações no mercado, como em drones (CHO; HONG; SEO, 2020), onde são empregados para navegação devido à sua capacidade de orientação nos três eixos. Neste projeto, adquiriu-se o sensor modelo MPU-6050, conforme ilustrado na Figura 14, que, durante o movimento do robô ao longo da tubulação, fornece dados de aceleração linear e velocidade angular nos três eixos. A partir dessas informações, é possível calcular a orientação do robô, o que permite verificar se a tubulação atende ao ângulo mínimo de declive projetado. Essa verificação é importante, especialmente em galerias de águas pluviais, onde o escoamento do fluido depende da gravidade.

Figura 14 – Sensor inercial MPU-6050.



Fonte: (UsinaInfo, 2025a)

Além disso, será incorporada uma câmera ao protótipo, permitindo que o operador acompanhe a operação em tempo real. Para o controle do robô, será utilizado um joystick, proporcionando uma interface intuitiva para a navegação. Para os testes, foram adquiridos uma ponte H, modelo L293d, conforme ilustrado na Figura 15, responsável pela ligação e controle dos motores, e um módulo Bluetooth modelo HC-06, que facilita a comunicação e operação durante os ensaios na tubulação de teste.

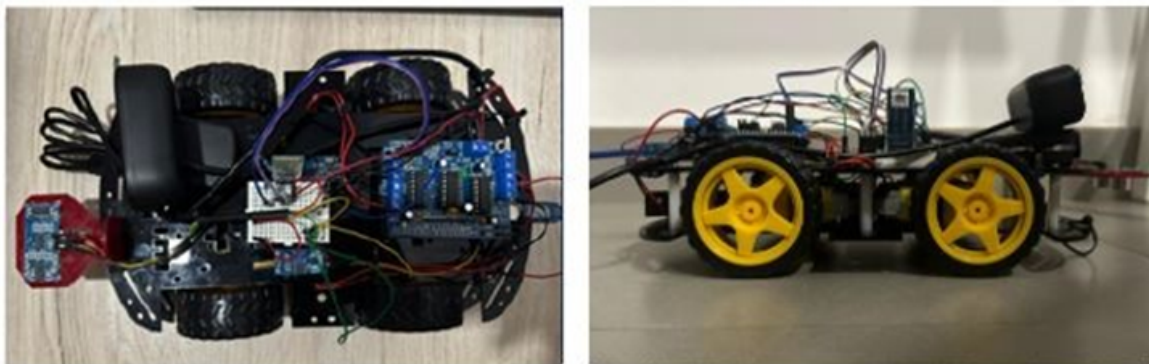
Figura 15 – Ponte H modelo L293d.



Fonte: (Mercado Livre, 2025).

O último componente selecionado foi o Arduino Uno, que será responsável pela integração e gerenciamento de todos os componentes do sistema. A Figura 16 demonstra o protótipo montado.

Figura 16 – Montagem final do protótipo do robô de inspeção.

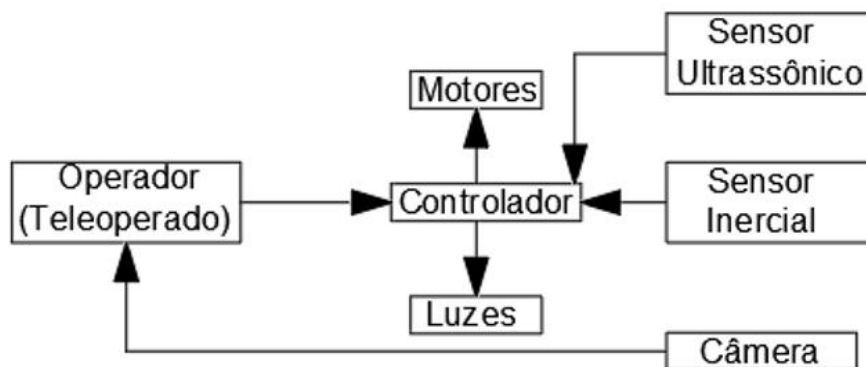


Fonte: Autor.

Com todos os componentes definidos, elaborou-se o diagrama de blocos apresentado na Figura 18, ilustrando as interações entre os elementos envolvidos. O diagrama permite visualizar como esses

componentes se conectam e trabalham em conjunto para atingir os objetivos propostos.

Figura 17 – Diagrama de blocos do robô.



Fonte: Autor.

Conforme observado nas imagens, os componentes eletrônicos do protótipo estão expostos, o que representa uma limitação quanto à resistência à água. Devido a essa restrição, os testes realizados foram conduzidos em uma tubulação modelo completamente isenta de água, garantindo assim, a segurança dos circuitos e a integridade do sistema. Para aplicações futuras, recomenda-se a inclusão de invólucros com grau de proteção IP67 ou superior, que garantem vedação contra poeira e imersão temporária em água, possibilitando a operação em ambientes com presença de líquidos.

3.2 Fusão de Sensores Baseada no Filtro de Kalman

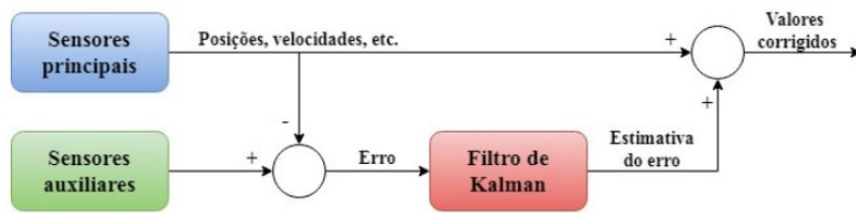
O uso de filtros complementares fundamentados no Filtro de Kalman promove uma grande flexibilidade, permitindo a integração e fusão de dados oriundos de diferentes tipos de sensores. Essa metodologia oferece uma resposta dinâmica para as variáveis de estado, elevando a precisão na estimativa dos parâmetros monitorados. O filtro complementar age na combinação dos erros dos sinais modelados com os erros dos sinais auxiliares, sem comprometer a dinâmica dos sinais. Isso garante que os dados modelados sejam processados sem distorções ou atrasos substanciais.

Considere um sensor inercial que incorpora um giroscópio e um acelerômetro dispostos perpendicularmente. Neste modelo, o eixo do giroscópio é alinhado ao eixo-Y, enquanto o acelerômetro se alinha ao eixo-X. Essa configuração permite o desenvolvimento de um filtro que estima o ângulo de rotação no plano X-Z, utilizando o vetor gravitacional como referência. A medição do deslocamento angular pelo giroscópio, combinada com os ângulos obtidos pelo acelerômetro, pode resultar em uma estimativa confiável do ângulo de inclinação. Contudo, para garantir a precisão dos dados, é importante que o acelerômetro permaneça em repouso ou em movimento uniforme, evitando influências de acelerações não gravitacionais.

Neste estudo, o Filtro de Kalman foi aplicado para fundir as medições do giroscópio e do acelerômetro com o intuito de estimar os ângulos de orientação Roll, Pitch e Yaw. O giroscópio, devido a sua resposta dinâmica rápida e baixo ruído, atua como sensor primário, embora sua medição possa sofrer de drift ao longo do tempo. Por outro lado, o acelerômetro, embora apresente ruído na curto prazo, fornece medições mais estáveis a longo prazo, servindo como sensor auxiliar.

A fusão desses sensores por meio do Filtro de Kalman, conforme figura 18, permite a combinação de suas vantagens, resultando em uma estimativa mais precisa e confiável dos ângulos de orientação, enquanto minimiza suas limitações individuais.

Figura 18 – Filto Kalman complementar.



Fonte: Autor.

3.2.1 Modelagem no Espaço de Estados

As Equações (3.1) e (3.2) apresentam o modelo no espaço de estados utilizado neste projeto, que descreve as medições do giroscópio e do acelerômetro. Maiores detalhes sobre essa modelagem podem ser encontrados em (LAMBRECHT et al., 2016).

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \Delta\dot{\theta}(t) \\ \Delta\dot{b}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta(t) \\ \Delta b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_g(t) \\ \eta_{b_g}(t) \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta(t) \\ \Delta b(t) \end{bmatrix} + \eta_a(t), \quad (3.2)$$

onde $\Delta\theta(t)$ e $\Delta b(t)$ são as variáveis de estado, representando, respectivamente, o erro de estimativa angular e o erro de polarização do giroscópio. Os parâmetros $\eta_g(t)$, $\eta_a(t)$ e $\eta_b(t)$ são os ruídos brancos Gaussianos do giroscópio, do acelerômetro e da polarização do giroscópio, podendo ser identificados conforme metodologias propostas em (XING; GEBRE-EGZIABHER, 2008).

Este modelo matemático é a base para implementar o filtro de Kalman e realizar a fusão dos dados de sensores, permitindo a estimativa precisa de ângulos.

3.2.2 Discretização e Implementação do Filtro de Kalman

Com base no modelo contínuo no espaço de estados, as Equações (3.1) e (3.2) foram discretizadas, resultando nas seguintes expressões:

$$x_{k+1} = Fx_k + Gw_k, \quad (3.3)$$

com a variável de medição z_k definida como:

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (3.4)$$

e o vetor de estados x_k dado por:

$$x_k = \begin{bmatrix} \Delta\theta_k & \Delta b_k \end{bmatrix}^T. \quad (3.5)$$

As matrizes do sistema são definidas como $F \cong I + AT$, $G = A^{-1}(F - I)$ e $H = C$.

A estimativa utilizando o filtro de Kalman segue as etapas de predição e correção, descritas no Algoritmo 1.

Algorithm 1 Filtro de Kalman

Predição:

$$\hat{x}_{k+1} = F\hat{x}_{k|k}$$

$$P_{k+1} = FP_{k|k}F^T + GQG^T$$

Correção:

$$K_{k+1} = P_{k+1}H^T(HP_{k+1}H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1} + K_{k+1}(z_{k+1} - H\hat{x}_{k+1})$$

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1}H)P_{k+1}$$

A discretização do modelo no espaço de estados e a implementação do filtro de Kalman permitem integrar de forma eficiente as medições do giroscópio e do acelerômetro, fornecendo uma estimativa precisa e robusta dos ângulos de orientação do sistema.

3.2.3 Filtro de Kalman Robusto

A implementação do filtro de Kalman robusto utilizada neste trabalho foi baseada nos estudos realizados em (NOGUEIRA et al., 2013) e (NOGUEIRA, 2015).

O filtro de Kalman robusto foi utilizado para lidar com incertezas nos parâmetros do sistema, como variações nos modelos do giroscópio e do acelerômetro, sendo essencial para melhorar a confiabilidade na fusão de sensores em sistemas sujeitos a ruídos e distúrbios.

$$x_{k+1} = (F + \delta F) x_k + (G + \delta G) w_k, \quad (3.6)$$

com a variável de medição dada por:

$$z_k = Hx_k + v_k. \quad (3.7)$$

Os distúrbios δF e δG são modelados como:

$$\begin{bmatrix} \delta F & \delta G \end{bmatrix} = M\Delta_k \begin{bmatrix} N_F & N_G \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

onde $\|\Delta_k\| < 1$, e os ruídos w_k e v_k são modelados como distribuições normais, dados por $w_k = N(0, Q)$ e $v_k = N(0, R)$, sendo $N(\mu, \sigma)$ uma distribuição normal com média μ e variância σ .

O modelo definido pela Equação (3.8) permite ao projetista restringir as fontes de distorção selecionando apropriadamente as entradas $\{N_F, N_G\}$ (SAYED, 2001). O filtro robusto visa minimizar o erro de estimativa considerando o pior caso possível causado pelas incertezas δF e δG .

3.2.3.1 Algoritmo do Filtro de Kalman Robusto

As estimativas $\{\hat{x}_{k+1}, \hat{x}_{k+1|k+1}\}$ podem ser obtidas através de iterações recursivas entre os passos 2 e 3. Quando $\hat{\lambda}_k = 0$, os passos 2 e 3 são reduzidos ao filtro de Kalman nominal.

Algorithm 2 Filtro de Kalman Robusto

```

1: Passo 1: Inicialização
2: if  $HM = 0$  then
3:    $\hat{\lambda}_k \leftarrow 0$  ▷ Filtro não robusto
4: else
5:    $\alpha_f \leftarrow 0,5$  ▷ Selecione  $\alpha_f$  (tipicamente  $0 \leq \alpha_f \leq 1$ )
6:    $\hat{\lambda}_k \leftarrow (1 + \alpha_f) \cdot \|M^T H^T R^{-1} HM\|$ 
7: end if

8: Passo 2: Atualização dos parâmetros
9: Substitua  $\{Q, R, P_{k|k}, G, F\}$  por:
10:  $\hat{Q}^{-1} \leftarrow Q^{-1} + \hat{\lambda}_k N_G^T \left[ I + \hat{\lambda}_k N_F P_{k|k} N_F^T \right]^{-1} N_G$ 
11:  $\hat{R} \leftarrow R - \hat{\lambda}_k^{-1} H M M^T H^T$ 
12:  $\hat{P}_{k|k} \leftarrow \left( P_{k|k}^{-1} + \hat{\lambda}_k N_F^T N_F \right)^{-1}$ 
13:  $\hat{P}_{k|k} \leftarrow P_{k|k} - P_{k|k} N_F^T \left( \hat{\lambda}_k^{-1} I + N_F P_{k|k} N_F^T \right)^{-1} N_F P_{k|k}$ 
14:  $\hat{G} \leftarrow G - \hat{\lambda}_k F \hat{P}_{k|k} N_F^T N_G$ 
15:  $\hat{F} \leftarrow \left( F - \hat{\lambda}_k \hat{G} \hat{Q} N_G^T N_F \right) \left( I - \hat{\lambda}_k \hat{P}_{k|k} N_F^T N_F \right)$ 

16: Passo 3: Correção
17: Atualize  $\{\hat{x}_{k|k}, P_{k|k}\}$  através do filtro de Kalman nominal descrito no Algoritmo 1.

```

3.2.3.2 Considerações Finais

Este filtro robusto busca lidar com as incertezas modeladas no sistema, minimizando o erro de estimativa mesmo em condições adversas. Quando $\hat{\lambda}_k = 0$, o filtro robusto se reduz ao filtro de Kalman nominal, o que mostra sua flexibilidade em lidar com diferentes níveis de incertezas no sistema. A abordagem permite um ajuste refinado dos parâmetros de ruído e incerteza, garantindo maior confiabilidade nas estimativas.

3.3 Método de testes

Para a etapa de testes, utilizou-se uma tubulação de concreto com diâmetro interno de 580 mm, conforme apresentado na Figura 19. Esta tubulação era composta por seis anilhas, totalizando um comprimento de seis metros.

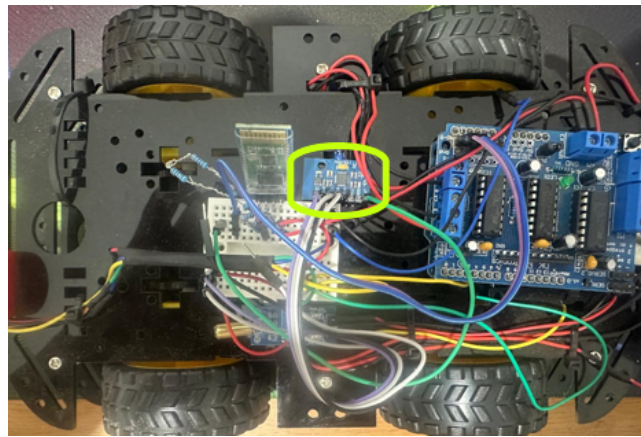
O primeiro teste foi realizado utilizando o sensor inercial MPU-6050, acoplado à parte central do protótipo. O sensor foi posicionado com o eixo Y orientado para a parte frontal do robô, o eixo X direcionado para a lateral e o eixo Z voltado para cima, conforme apresentado na Figura 20. Para as medições, empregou-se o sistema tridimensional composto por Pitch, Roll e Yaw, correspondentes aos eixos X , Y e Z , respectivamente.

Figura 19 – Tubulação experimental.



Fonte: Autor.

Figura 20 – Posicionamento do sensor inercial.



Fonte: Autor.

Neste caso o acelerômetro mede a aceleração em três eixos (a_x, a_y, a_z) incluindo a componente da gravidade. Pode-se calcular os ângulos de inclinação (Roll e Pitch) em relação ao eixo gravitacional.

$$\theta_{pitch} = \arctan \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right) \quad (3.9)$$

Pitch (rotação em torno do eixo y).

$$\theta_{roll} = \arctan \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (4.0)$$

Roll (rotação em torno do eixo x).

O giroscópio mede a velocidade angular nos três eixos ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$). A estimativa dos ângulos é obtida por meio da integração desses dados ao longo do tempo.

$$\theta_{roll} = \theta_{roll,0} + \omega_x \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

Roll (rotação em torno do eixo x).

$$\theta_{\text{pitch}} = \theta_{\text{pitch},0} + \omega_y \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

Pitch (rotação em torno do eixo y).

$$\theta_{\text{yaw}} = \theta_{\text{yaw},0} + \omega_z \cdot \Delta t \quad (4.3)$$

Yaw (rotação em torno do eixo z).

O teste teve início com a definição de um ponto de referência inicial, zerando todos os eixos a partir deste ponto e considerou-se o eixo x (Roll), responsável por representar a rotação em torno do eixo transversal do sensor. A partir dessa referência, todos os dados subsequentes foram registrados com base nesse ponto. Também foi aplicado o Filtro de Kalman somente para o sensor inercial para tratar os resultados. Além disso, realizou-se um teste em uma rampa de acesso, utilizando um goniômetro e o sensor inercial, com o objetivo de comparar os resultados obtidos.

O segundo teste utilizou o sensor ultrassônico instalado na parte frontal do robô e conectado ao Arduino, conforme ilustrado na Figura 21. Este sensor possui um ângulo de leitura de 16 graus e foi configurado para realizar a varredura de uma seção da parede de um tubo com espessura de 60 mm. Para assegurar que toda a espessura da parede fosse coberta durante a varredura, foi definido um pulso de 15 microssegundos. Para este sensor, foi realizada uma comparação em bancada, utilizando blocos estruturais e um paquímetro.

Figura 21 – Sensor ultrassônico instalado no robô.



Fonte: Autor.

Para os testes anteriores, foram empregados quatro motores DC conectados a uma ponte H, permitindo o controle independente de cada roda. Dessa forma, o robô foi operado de maneira similar

ao funcionamento de veículos com esteiras, como tanques e tratores, nos quais as quatro rodas giram simultaneamente. Quando há necessidade de realizar manobras, as rodas de um lado giram em um sentido, enquanto as do lado oposto giram no sentido contrário.

No entanto, um ponto importante deste projeto é a definição da distância entre o ponto inicial e a posição do robô na tubulação. Para determinar essa distância, realizaram-se testes de bancada utilizando um motor de passo acoplado a uma roda de 65 mm de diâmetro, 25 mm de largura e perímetro de 204 mm, conforme ilustrado na Figura 22. Dessa forma, a cada revolução completa da roda, o robô avança 204 mm.

Figura 22 – Dimensões das rodas.

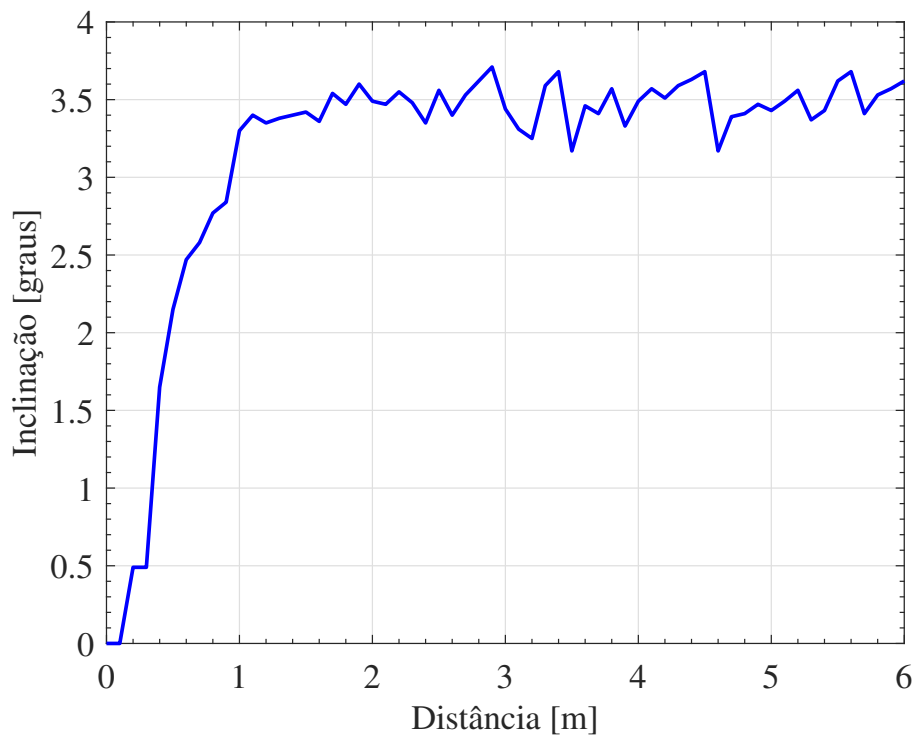


Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, foram realizados testes utilizando o sensor inercial na tubulação, definindo o início da mesma como ponto de referência. Assim, todos os dados subsequentes foram ancorados a esse ponto inicial. O ângulo de inclinação foi estimado a partir do acelerômetro integrado ao sensor inercial, considerando a rotação em torno do eixo x , responsável por detectar a inclinação da tubulação conforme o robô se movimenta. Os valores registrados estão apresentados na Figura 23, que também ilustra a relação entre o ângulo e a distância percorrida pelo robô na tubulação de teste, com 6 metros de comprimento. O ângulo medido foi de 3,5 graus, o que está em conformidade com a norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989), que estabelece que os condutores horizontais de águas pluviais devem ter uma inclinação mínima de 0,5% para garantir o escoamento adequado.

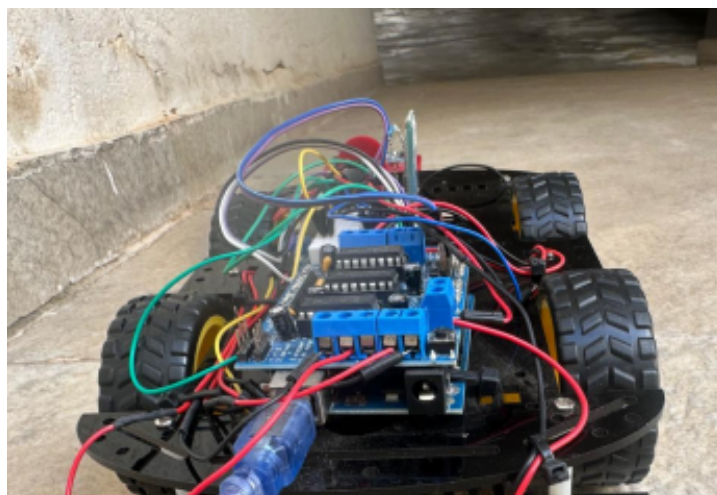
Figura 23 – Inclinação da tubulação obtida com base no giroscópio.



Fonte: Autor.

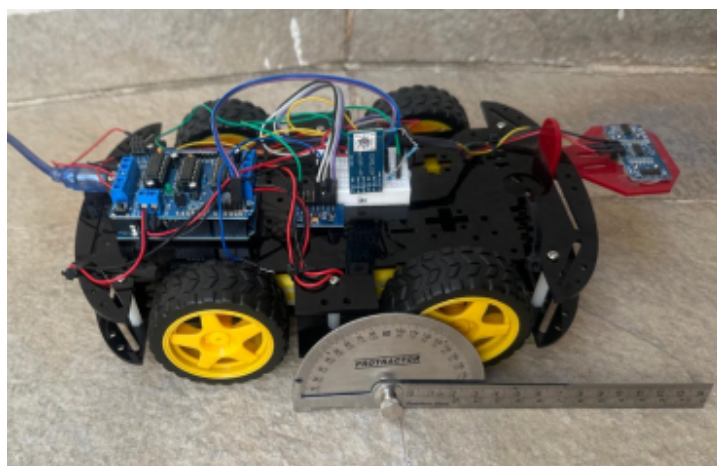
No segundo teste do sensor inercial, utilizou-se uma rampa de acesso com 3 metros de comprimento para o estudo, conforme ilustrado na Figura 24. Neste procedimento, obteve-se o primeiro valor utilizando um goniômetro, conforme ilustrado na Figura 25, que mediu uma inclinação de 8 graus para a rampa de acesso. Esse valor foi utilizado como referência para avaliar os dados obtidos por meio do sensor inercial.

Figura 24 – Teste na rampa de acesso.



Fonte: Autor.

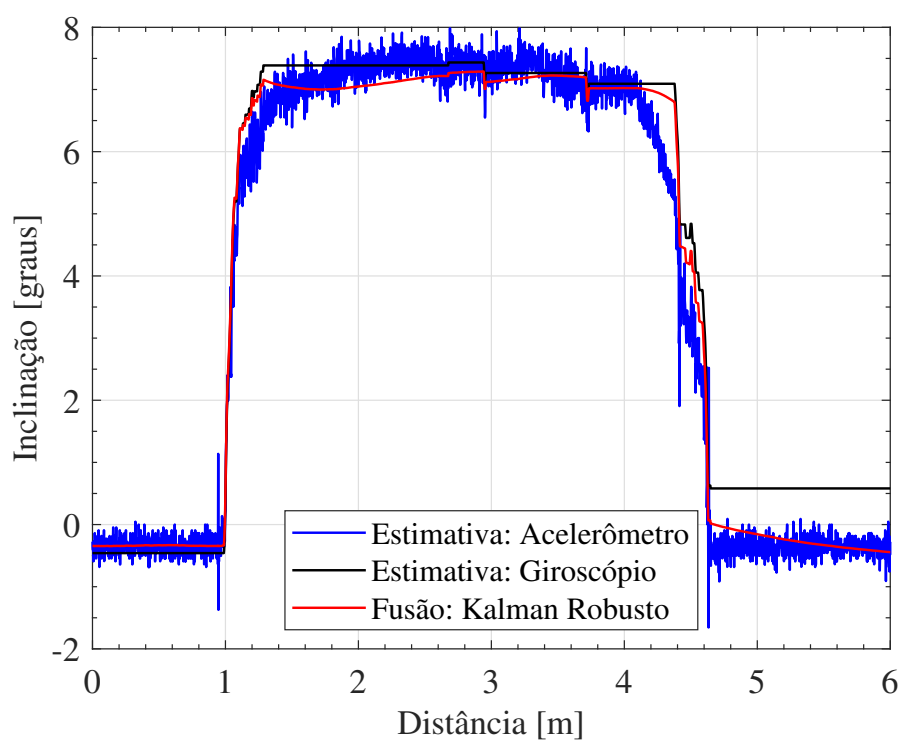
Figura 25 – Obtenção do ângulo utilizando o goniômetro.



Fonte: Autor.

Na Figura 26, é apresentada a inclinação da rampa de acesso obtida pelos métodos de estimativa baseados no acelerômetro, no giroscópio e na fusão de ambos utilizando um filtro de Kalman robusto. A estimativa do acelerômetro apresenta alto nível de ruído em toda a extensão da medição, o que é esperado devido à sensibilidade do sensor a vibrações e acelerações externas, limitando sua aplicação isolada para medições precisas em sistemas dinâmicos. Por outro lado, a estimativa do giroscópio, embora menos suscetível a ruídos momentâneos, sofre com o efeito de *drift*, resultando em um desvio acumulado ao longo do tempo, perceptível nas extremidades do gráfico, onde a inclinação deveria retornar a zero. A fusão dos dados pelo filtro de Kalman robusto combina as vantagens de ambos os sensores, reduzindo o ruído do acelerômetro e corrigindo o drift do giroscópio. A curva resultante é mais próxima do comportamento esperado, com transições suaves e valores estáveis, demonstrando maior precisão e confiabilidade.

Figura 26 – Inclinação da tubulação obtida a partir de diferentes métodos de estimativa.



Posteriormente, foram realizados dois testes utilizando o sensor ultrassônico modelo SR04. A escolha desse sensor foi baseada no estudo de (BABU et al., 2022), que demonstrou sua aplicação na detecção de falhas em corpos de prova de concreto. No contexto deste projeto, os testes tiveram como objetivo avaliar a aplicabilidade do sensor. O primeiro teste foi conduzido na tubulação de concreto descrita na Seção 3.3, considerando como falha o espaço entre a bolsa do tubo frontal e o tubo subsequente, conforme ilustrado na Figura 27.

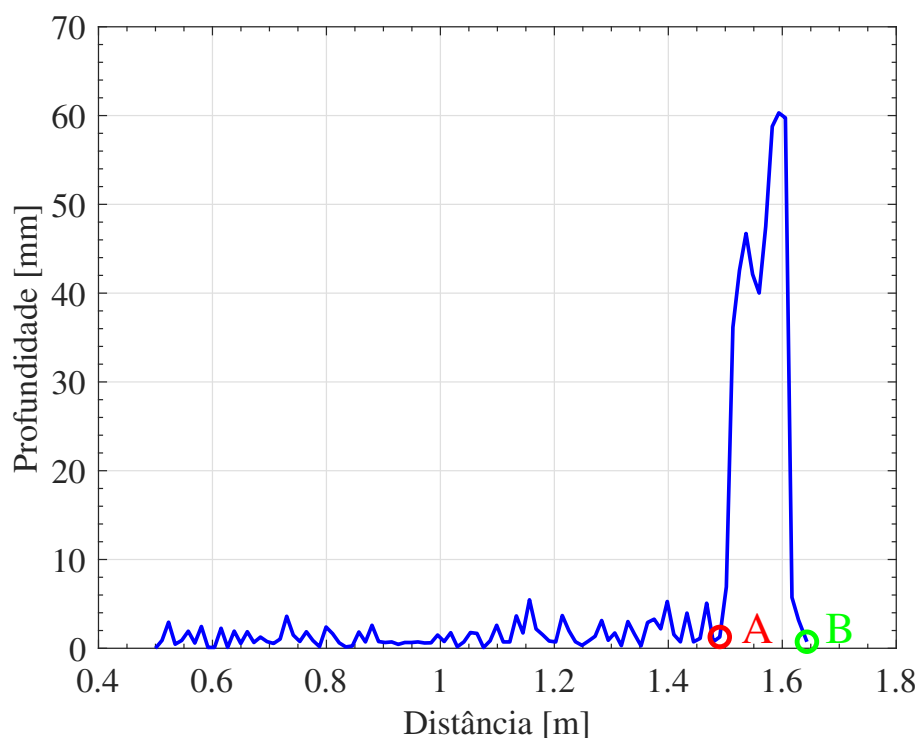
Figura 27 – União dos tubos de concreto armado.



Fonte: Autor.

Durante o percurso do robô na tubulação, com velocidade constante de 0,1 m/s, foram registradas oscilações no eixo y , como ilustrado na Figura 28. O eixo y representa a distância percorrida pelo pulso do sensor até a parede da tubulação, enquanto o eixo x indica a distância que o robô percorreu dentro da tubulação desde o início do trajeto.

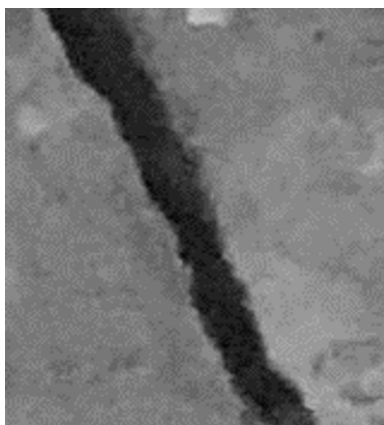
Figura 28 – Dados do sensor ultrassônico instalado em operação.



Com base nos dados apresentados na Figura 28, observa-se que a trinca teve início no ponto A, correspondente a 1,49 m após o início do percurso do robô na tubulação, e se estendeu até o ponto B, em 1,64 m, totalizando um comprimento de aproximadamente 0,15 m. Durante esse intervalo, a trinca atingiu uma profundidade de cerca de 60 mm, atravessando completamente a espessura da parede da tubulação. Além disso, é possível notar a presença de ruído nos dados do sensor ultrassônico, especialmente nas regiões anteriores ao início da trinca (antes do ponto A). Esse ruído pode ser atribuído a variações na reflexão do sinal ultrassônico causadas por irregularidades na superfície interna da tubulação ou pequenas interferências ambientais. Ainda assim, os dados capturados permitem identificar com clareza o início, o fim e a profundidade da trinca, sem a necessidade de filtros para tratamento adicional, que também foi registrada visualmente, como mostrado na Figura 29, confirmando as medições realizadas pelo sensor ultrassônico. Além disso, a câmera foi utilizada tanto para monitorar toda a vistoria da galeria quanto para auxiliar o operador na condução do robô.

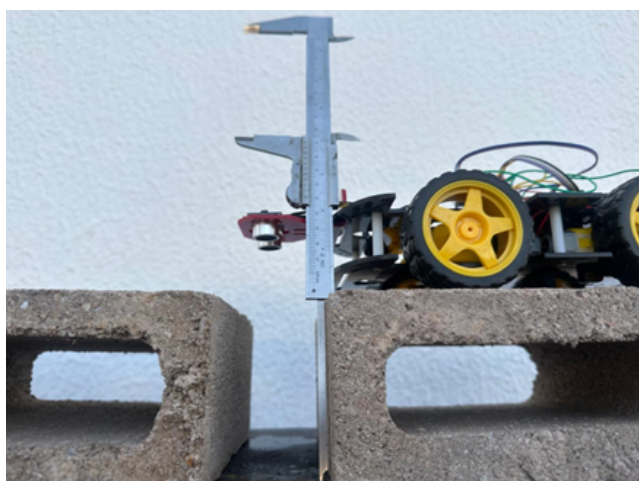
No segundo teste, foi realizada uma comparação de valores entre o sensor ultrassônico e um

Figura 29 – Registro visual da trinca identificada na tubulação.



Fonte: Autor.

Figura 30 – Teste de comparação de medidas.

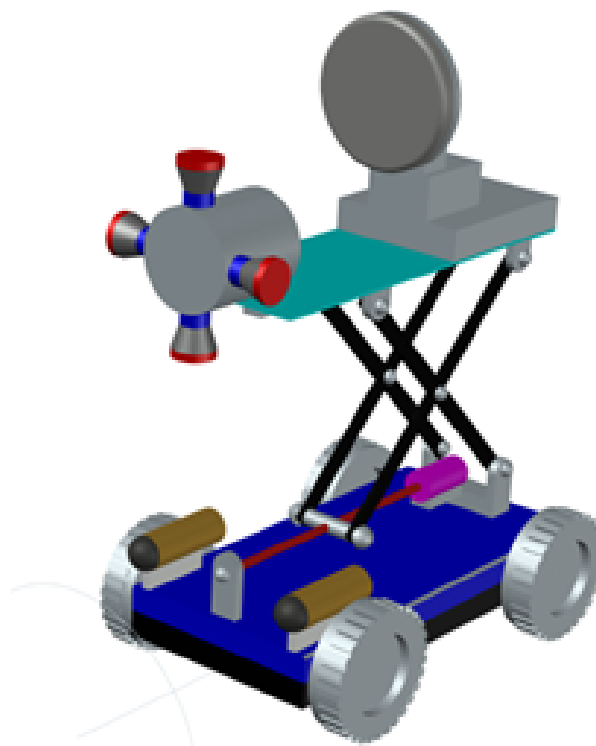


Fonte: Autor.

paquímetro, conduzida em bancada utilizando blocos estruturais, conforme ilustrado na Figura 30. Durante o teste, o paquímetro indicou um valor de 90 mm, enquanto o sensor ultrassônico registrou 91,34 mm, indicando que o uso de sensores ultrassônicos é viável para a detecção de trincas. No entanto, para a próxima etapa de testes em campo, será necessário utilizar um número maior de sensores, distribuídos estrategicamente para cobrir 360 graus ao redor da tubulação, ou empregar um dispositivo de giro sincronizado com a velocidade do robô, permitindo a cobertura completa da circunferência da tubulação, como demonstrado na Figura 31.

Por fim, foi realizado um teste em bancada com o objetivo de verificar a distância percorrida pelo robô a cada rotação da roda. Para isso, foi definido um ponto de referência na roda e utilizou-se uma régua, juntamente com o Motor de Passo 28BYJ-48 e o Driver ULN2003, conforme ilustrado na Figura 32. O motor utilizado possui 64 passos por rotação completa, e a distância percorrida por cada passo foi calculada dividindo o perímetro da roda pelo número de passos por rotação. No entanto,

Figura 31 – Robô com os sensores ultrassônicos posicionados para cobertura completa da tubulação.



Fonte: Autor.

devido a ruídos e erros, os valores da distância percorrida por passo variaram entre 3,16 mm e 3,22 mm, considerando duas casas decimais.

Figura 32 – Configuração experimental para teste de distância percorrida por rotação da roda.



Fonte: Autor.

Para as próximas etapas dos testes em campo, recomenda-se realizar uma comparação utilizando o motor DC com encoder, que pode fornecer medições mais precisas da distância percorrida pelo robô.

5 CONCLUSÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo de robô para inspeção de galerias de águas pluviais, abordando um problema prático comum em infraestruturas urbanas: a dificuldade de monitoramento e manutenção em ambientes confinados. A construção do protótipo envolveu a definição criteriosa dos componentes, a integração de sensores e atuadores, bem como a realização de testes em ambientes controlados para avaliar o desempenho e a viabilidade do sistema.

Durante o desenvolvimento, foram selecionados sensores de ultrassom e inerciais para detectar trincas, medir inclinações e fornecer dados estruturais em tempo real. A utilização do filtro de Kalman no tratamento dos dados proporcionou maior precisão nos resultados, mesmo em condições adversas. O protótipo, baseado em controle manual, demonstrou ser funcional para inspeções iniciais, utilizando cabos para transmissão simultânea de dados e energia, garantindo estabilidade em ambientes onde a comunicação sem fio é inviável.

Os testes realizados em bancada e em tubulações modelo confirmaram a capacidade do robô de identificar fissuras e medir a inclinação das galerias. Através dessa dissertação, foi possível verificar se a tubulação atende à inclinação mínima para escoamento, conforme estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989). Os resultados evidenciaram que o uso de sensores acessíveis e tecnologias simples, como o Arduino, permite o desenvolvimento de soluções de baixo custo, contribuindo para estudos de monitoramento e manutenção de sistemas de drenagem.

No entanto, o protótipo apresentou limitações em termos de robustez e capacidade de operação em condições reais de campo. Além disso, o controle manual exige alta interação do operador, o que pode ser um desafio em operações prolongadas ou em ambientes mais complexos. Nesse caso, a utilização de métodos de movimentação como máquina de estados e campo vetorial, abordados neste trabalho, pode ser uma solução viável.

As principais contribuições deste trabalho estão na concepção e validação de um sistema funcional para inspeção de galerias, utilizando componentes de baixo custo e fácil acesso no mercado. Além disso, a integração de sensores com filtragem de dados permitiu resultados confiáveis, mesmo em condições com ruídos e incertezas. O estudo também destacou a possibilidade de evoluções futuras, com adaptações que podem aumentar a autonomia e a eficiência do sistema.

Como próximos passos, sugere-se o desenvolvimento de um modelo robusto para testes em campo, com as seguintes melhorias:

1. **Chassi:** Fabricação em materiais mais resistentes, para suportar condições adversas e proteger

os componentes internos.

2. **Sensores:** Integração de sensores industriais, como encoders magnéticos e sistemas de visão 360 graus, para maior precisão na detecção de falhas.
3. **Navegação Autônoma:** Implementação de métodos de navegação baseados em campo vetorial ou máquinas de estados, reduzindo a dependência de controle manual.
4. **Energia e Dados:** Exploração de alternativas de cabos de longo alcance para transmissão simultânea de energia e dados.
5. **Estudo de Viabilidade:** Realização de análise econômica para avaliar a competitividade do robô em relação a soluções importadas.

As melhorias detalhadas para o estudo de campo estão descritas no Apêndice A. Espera-se que, com essas melhorias, o sistema possa ser implementado em condições reais, atendendo às demandas de inspeção de tubulações urbanas de maneira segura e com custos acessíveis. Este projeto representa um avanço na aplicação de tecnologias para a resolução de desafios relacionados à infraestrutura urbana, contribuindo para a sustentabilidade e promovendo o desenvolvimento tecnológico na área de robótica aplicada.

REFERÊNCIAS

- AECweb. **Tubos de Concreto para Águas Pluviais e Esgotos**. 2025. Acessado em: 03 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/guia/produtos/tubos-de-concreto-para-aguas-pluviais-e-esgotos/21/44/874/UF/0/1>>.
- Ardurobótica. **Sensor Ultrassônico**. 2025. <<https://www.ardurobotica.com.br/ultrassonico>>. Acesso em: 07 jan. 2025.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10844: Instalações prediais de águas pluviais**. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.
- BABU, J. C. et al. Iot-based intelligent system for internal crack detection in building blocks. **Journal of Nanomaterials**, v. 2022, p. 1–8, jun. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2022/6363202>>.
- BANDALA, A. A. et al. Development of an adaptive pipe inspection robot with rust detection. In: **2018 IEEE Region Ten Symposium (TENSYP)**. Sydney, Australia: IEEE, 2018. p. 245–250.
- Basler. **Basler MED ace 8.9 MP 42 Color**. 2025. Acessado em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.baslerweb.com/en/shop/med-ace-8-9-mp-42-color/>>.
- Baumer. **Encoder magnético modelo HOG 8**. 2025. Acessado em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.baumer.com/ve/en/p/29136>>.
- BAUMGARTL, J. et al. Towards easy robot programming: Using dsls, code generators and software product lines. In: **Proceedings of the International Conference on Software Paradigm Trends (ICSOF)**. [S.l.]: SciTePress, 2013. p. 548–554.
- BIANCHI, R. A. C.; REALI-COSTA, A. H. O sistema de visão computacional do time futeboli de futebol de robôs. In: **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2000**. Florianópolis, SC, Brazil: [s.n.], 2000.
- BIANCHINI, W. **Campo Vetorial no Espaço**. 2024. <<https://www.geogebra.org/m/fppjnfcp>>. Acesso em: 2024-06-20.
- Bosch Sensortec. **Sensor Inercial BNO055**. 2025. Acessado em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.bosch-sensortec.com/products/smart-sensor-systems/bno055/>>.
- CCTV Inspection - Available Applications: Lateral Launching. 2024. <<https://rauschusa.com/products/cctv-inspection/available-applications/lateral-launching>>. Acesso em: 2024-06-20.
- CHO, S.-M.; HONG, E.; SEO, S.-H. Random number generator using sensors for drone. **IEEE Access**, v. 8, p. 30343–30354, 2020.
- Evident Scientific. **Equipamento 39DL Plus**. 2025. Acessado em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://arotec.com.br/product/39dl-plus/>>.
- FILHO, F. C. M. de M.; COSTA, A. R. da. Sistemática de cálculo para o dimensionamento de galerias de Águas pluviais: uma abordagem alternativa. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, v. 4, n. 1, jul. 2012. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/reec/article/view/18162>>.

FILHO, T. **Inspeção robótica de tubulações: dispositivo de baixo custo e sistema de navegação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 2023.

GeoSampa - Prefeitura de São Paulo. **Mapa de SBC - GeoSampa**. 2024. Acessado em: 03 nov. 2024. Disponível em: <https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx?id=54774>.

GUNATILAKE, A.; KODAGODA, S.; THIYAGARAJAN, K. Battery-free uhf-rfid sensors-based slam for in-pipe robot perception. In: **2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**. [S.l.]: IEEE, 2019. p. 849–854.

HE, K. et al. Deep residual learning for image recognition. In: **2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)**. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 770–778.

INTELLIGENCE, M. **Mercado global de robôs móveis**. 2023. <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/global-mobile-robots-market>>. Acessado em: 16 jan. 2025.

KIM, Y.-G. et al. Design and implementation of an optimal in-pipe navigation mechanism for a steel pipe cleaning robot. In: **2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**. [S.l.]: IEEE, 2020. p. 785–790.

LAMBRECHT, S. et al. Inertial sensor error reduction through calibration and sensor fusion. **Sensors**, v. 16, n. 2, 2016. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/2/235>>.

LI, Z. et al. A new pipe cleaning and inspection robot with active pipe-diameter adaptability based on atmega64. In: **2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)**. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 1663–1668.

MASUTA, H. et al. Recognition of branch pipe for pipe inspection robot using fiber grating vision sensor. In: **2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)**. [S.l.]: IEEE, 2020. p. 1256–1261.

Mercado Livre. **Shield L293d Driver Ponte H para Motor Arduino Mega e Uno**. 2025. <https://www.mercadolivre.com.br/shield-l293d-driver-ponte-h-para-motor-arduino-mega-e-uno/p/MLB32987614#polycard_client=search-nordic&searchVariation=MLB32987614&wid=MLB5046672444&position=12&search_layout=grid&type=product&tracking_id=17591b47-01ee-4d30-a4cf-6863282c957e&sid=search>. Acesso em: 07 jan. 2025.

MTHIMKHULU, Z.; ADEBANJO, H.; ADELIYI, T. T. Designing a frugal inspection robot for detecting in-pipe leaks in the oil and gas sector. In: **2021 International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS)**. [S.l.]: IEEE, 2021. p. 105–110.

NAKAJIMA, E. J. **Campos de vetores em variedades singulares**. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2013.

NASSIRAEI, A. A. F. et al. Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot kantaro. In: **2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**. [S.l.]: IEEE, 2017. p. 2837–2842.

NETO, S. J. A. et al. Robôs móveis autônomos da unesp- sorocaba na tarefa da farmácia de manipulação robótica. In: **VII SBAI/ II IEEE LARS**. São Luís, Brazil: [s.n.], 2005.

NOGUEIRA, S. L. **Sistemas Markovianos para estimativa de ângulos absolutos em exoesqueletos de membros inferiores**. Tese (Tese de Doutorado em Dinâmica das Máquinas e Sistemas) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br>>.

NOGUEIRA, S. L. et al. Estimation of lower limbs angular positions using robust kalman filter and genetic algorithm. In: ABCM. **22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)**. Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013.

Orange Pi. **Orange Pi 5 Pro (16GB RAM, 256GB eMMC)**. 2025. Acessado em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://curtocircuito.com.br/orange-pi-5-pro-16gb-ram-256gb-emmc.html>>.

PANORAMO SI 4K Manhole Inspection System - Mobile or In-Vehicle. 2024. <<https://www.ibak.de/en/systems/find-system#/details/product/PANORAMO%20SI%204K%20manhole%20inspection%20system%20-%20mobile%20or%20in-vehicle>>. Acesso em: 2024-06-06.

Realfa Engenharia. **Caixas de Concreto Armado**. 2025. Acessado em: 03 nov. 2024. Disponível em: <<https://realfa.com.br/produto/caixas-de-concreto-armado/>>.

REDIKIT Brochure. 2024. <<https://cues-resources.s3.us-east-2.amazonaws.com/Brochures/CUES/Individuals/RediKit+LoRes.pdf>>. Acesso em: 2024-06-06.

REZENDE, A. M. d. **Estratégias de guiagem e controle de navegação de robôs baseadas em campos vetoriais**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais (Ufmg), Belo Horizonte, 2022. Accessed: 2024-02-22. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1592D.PDF>>.

REZENDE, R. S.; SILVA, A. L. S.; LIMA, P. A. Navegação de robôs utilizando curvas implícitas. **Revista Controle & Automação**, v. 32, n. 1, p. 1–10, 2021.

ROVVER X Sewer Inspection Crawler. 2024. <<https://envirosight.com/products/rovver-x/>>. Acesso em: 2024-07-01.

SAYED, A. H. A framework for state-space estimation with uncertain models. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 46, n. 7, p. 998–1013, 2001.

SOUSA, M. S. et al. A robótica educativa como instrumento de apoio ao ensino de ciências naturais e da física. In: **Mostra Nacional de Robótica MNR**. [S.l.: s.n.], 2011.

São Paulo (Município). **Plano Diretor de Drenagem – PDD**. [S.l.]: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), Secretaria de Infraestrutura Urbana e Obras (SIURB), Prefeitura de São Paulo, 2024.

UsinaInfo. **Acelerômetro e Giroscópio MPU-6050 Módulo GY521 3 Eixos 6 DOF**. 2025. <<https://www.usinainfo.com.br/acelerometro-arduino/acelerometro-e-giroscopio-mpu-6050-modulo-gy521-3-eixos-6-dof-3895.html>>. Acesso em: 07 jan. 2025.

UsinaInfo. **Motor DC 6-12V JGY370 com Caixa de Redução 10RPM Alto Torque**. 2025. Acessado em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/motor-dc/motor-dc-6-12v-jgy370-com-caixa-de-reducao-10rpm-alto-torque-6001-8827.html>>.

UsinaInfo. **Roda 85x38mm para Chassi Robótico ND030 Prata**. 2025. Acessado em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/rodas-roboticas/roda-85x38mm-para-chassi-robotico-nd030-prata-8707.html>>.

WU, D. et al. Drain pipe inspection robot using wireless communication system. In: **2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)**. [S.l.]: IEEE, 2019. p. 725–730.

XING, Z.; GEBRE-EGZIABHER, D. Modeling and bounding low cost inertial sensor errors. In: **2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1122–1132.

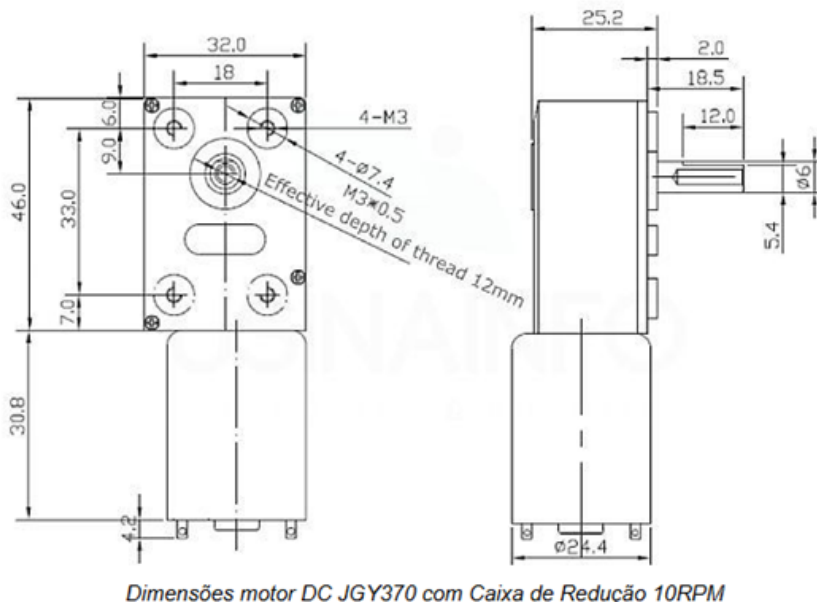
APÊNDICE A – CRIAÇÃO DE UM ROBÔ PARA TESTE DE CAMPO

Após a montagem do protótipo e a realização de todos os testes necessários, as etapas futuras consistirão no desenvolvimento de um robô voltado para testes de campo. Esse robô deverá ser equipado com componentes robustos e precisos, projetados para suportar um fluxo de trabalho contínuo. Além disso, será necessário realizar um estudo de viabilidade econômica como parte das etapas futuras.

O primeiro item desta etapa é o chassi, que deverá ser fabricado em alumínio, com dimensões de 300 x 200 x 60 mm. A parte inferior do chassi deve ser fixada com parafusos M3 e borrachas de vedação, garantindo, assim, a proteção e a integridade dos componentes eletrônicos instalados em seu interior.

O segundo componente escolhido para o projeto são os motores DC, tendo como referência o modelo Motor DC 6-12V JGY370 com caixa de redução. A escolha desse motor se deve à sua capacidade de operar em uma faixa de tensão de 6 a 12 V, garantindo funcionamento com velocidade constante. Além disso, sua estrutura metálica proporciona maior durabilidade, com um peso total de 156 g. As dimensões detalhadas do motor selecionado estão apresentadas na Figura 33.

Figura 33 – Dimensões do motor DC 6-12V JGY370 com caixa de redução.



Fonte: (UsinaInfo, 2025b).

As rodas selecionadas para esta aplicação possuem dimensões de 85 x 38 mm e são equipadas com pneus *off-road*, que oferecem melhor aderência e tração durante a movimentação do robô. O modelo escolhido está ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Roda *off-road* com dimensões de 85 x 38 mm.



Fonte: (UsinaInfo, 2025c).

Iniciando a seleção dos sensores, o encoder magnético modelo Baumer HOG 8 foi escolhido como referência, conforme mostrado na Figura 35. Esse modelo foi projetado para suportar ambientes industriais severos, onde a presença de poeira, óleo ou outras substâncias pode comprometer o desempenho de sensores ópticos. Isso ocorre porque os encoders magnéticos operam detectando variações no campo magnético por meio de um ímã fixado no eixo, tornando-os mais resistentes a condições adversas.

Figura 35 – Encoder magnético modelo Baumer HOG 8.



Fonte: (Baumer, 2025).

Na questão de detecção de falhas, foi selecionado o equipamento modelo 39DL Plus da Evident Scientific, conforme ilustrado na Figura 36. Esse modelo é capaz de detectar falhas em concreto e também medir a espessura de materiais. Ele utiliza transdutores que permitem avaliar a integridade do concreto, identificando trincas, vazios ou descontinuidades internas.

Para o sensor inercial, o modelo de referência escolhido é o BNO055 da Bosch Sensortec, um sensor de unidade de medição inercial (IMU) de 9 eixos. Ele combina acelerômetro (3 eixos), giroscópio (3 eixos) e magnetômetro (3 eixos) em um único chip, além de contar com um microcontrolador interno para processar os dados de fusão de sensores. Este sensor está ilustrado na Figura 37.

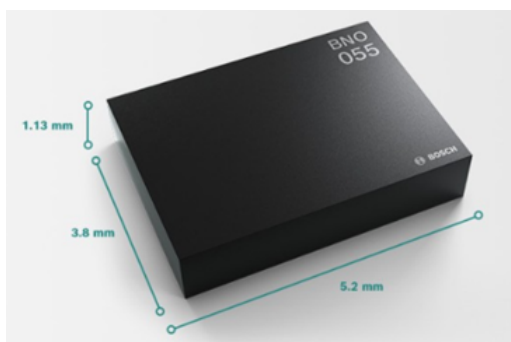
Como controlador, foi selecionada a Orange Pi 5 Pro (16GB RAM, 256GB eMMC), conforme

Figura 36 – Equipamento 39DL Plus da Evident Scientific.



Fonte: (Evident Scientific, 2025).

Figura 37 – Sensor Inercial BNO055 da Bosch Sensortec.



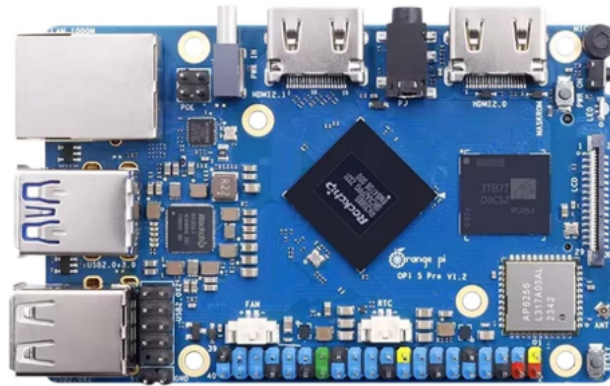
Fonte: (Bosch Sensortec, 2025).

ilustrado na Figura 38. Este controlador conta com um processador octa-core ARM Cortex-A76 e GPU Mali-G610, sendo ideal para aplicações de aprendizado de máquina, pois é capaz de processar grandes volumes de dados e executar múltiplas tarefas simultaneamente com eficiência. Além disso, oferece diversas opções de conectividade, como USB 3.0, Ethernet Gigabit e HDMI, além de expansibilidade via PCIe e GPIO, tornando-a adequada para a integração de sensores e atuadores. Sua compatibilidade com sistemas operacionais como Linux e Android facilita o uso de plataformas como o ROS. A placa oferece excelente custo-benefício, baixo consumo energético e tamanho compacto, características que a tornam ideal para robôs industriais.

Para a transferência simultânea de energia e dados, foi selecionado o cabo ÖLFLEX® SERVO 7RN (LAPP), que combina ambos em um único cabo, facilitando a instalação. Este cabo é capaz de operar com tensões de 12V ou 24V, sendo ideal para sistemas de controle e alimentação de motores e sensores. Além disso, pode ser configurado para suportar protocolos de comunicação, como Ethernet, RS-232 ou RS-485, assegurando uma transmissão de dados confiável e de longo alcance.

A câmera selecionada é a Basler MED ace 8.9 MP 42 Color, ilustrada na Figura 39. Trata-se de

Figura 38 – Orange Pi 5 Pro (16GB RAM, 256GB eMMC).



Fonte: (Orange Pi, 2025).

uma câmera industrial de alta resolução, com 8,9 megapixels, capaz de capturar imagens nítidas e detalhadas em alta velocidade. Equipada com um sensor CMOS de última geração, este modelo garante imagens de alta qualidade, mesmo em condições de iluminação variáveis. Sua interface GigE Vision permite fácil integração com sistemas de automação e controle remoto, além de garantir transferência rápida de dados. A MED ace 8.9 MP é ideal para inspeções em ambientes industriais.

Figura 39 – Câmera Basler MED ace 8.9 MP 42.



Fonte: (Basler, 2025).

Com os componentes selecionados neste tópico, é possível desenvolver um modelo inicial para a realização dos primeiros testes em campo. No entanto, futuras modificações ou a adição de novos componentes poderão ser necessárias à medida que o projeto avance. Por exemplo, será possível implementar métodos de navegação, como máquina de estados ou campos vetoriais, visando a validação do sistema e a preparação para a etapa de análise de viabilidade econômica.