

Dispositivo robótico para inspeção de tubulações com diâmetro reduzido

Alexandre Magno de S Thiago Filho *
Nilton Costa Pereira de S Thiago Neto *
Mario César Delunardo Torres * Jacó Dias Domingues *
Luiz Guilherme Dias de Barros *** Héctor Azpúrua **
Gustavo Pessin * Gustavo Medeiros Freitas **

* Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale - Ouro Preto, MG, (e-mail: alexandre.filho@aluno.itv.org; [nilton.neto, mario.torres]@pq.itv.org; [jaco.domingues, gustavo.pessin]@itv.org).

** Universidade Federal de Minas Gerais, MG (e-mail: gustavomfreitas@ufmg.br, hector.azpurua@dcc.ufmg.br)

*** Universidade de São Paulo, SP (e-mail: lguilhermedb@usp.br)

Abstract: Small diameter pipe inspection is a frequent task in the industry. The flow of materials through the pipes can generate problems, like clogs, cracks, or discontinuities that prevent or reduce its carrying capacity. Therefore, these industrial systems must always be subject to regular inspection activities. In this sense, Instituto Tecnológico Vale (ITV) proposes a robotic platform to inspect pipes over 14 inches in diameter that can visualize anomaly situations using cameras and other sensors. The robot parts are mainly low-cost materials such as 3D-printed polymers. The platform has a track locomotion mechanism, which can be adjusted to overcome diverse piping conditions. The robot software uses ROS (Robot Operating System), which helps implement autonomous features and the possibility of anomaly identification. This work presents the robotic platform, the preliminary results of the mechanical and electronic design, and the software embedded in the robot, demonstrating the feasibility of producing low-cost alternatives for inspections of industrial pipes with reduced diameters.

Resumo: A inspeção de tubulações de pequeno diâmetro é uma tarefa recorrente na indústria. Devido à natureza dos materiais que passam pelo tubo, alguns problemas como entupimentos, rachaduras ou descontinuidades podem impedir ou reduzir a capacidade de transporte. Portanto, esses sistemas industriais devem estar sempre sujeitos a atividades regulares de inspeção. Nesse sentido, o Instituto Tecnológico Vale (ITV) propõe uma plataforma robótica para inspeção de tubulações com diâmetro de 14 polegadas ou mais, capaz de visualizar situações de anomalia usando câmeras e outros sensores. A composição do dispositivo proposto é principalmente de materiais de baixo custo, como peças de polímero impressas em 3D. A plataforma possui mecanismos de locomoção por meio de esteiras, que podem ser ajustados para superar condições específicas de cada tubulação. O software do robô utiliza o ROS (Robot Operating System), facilitando a implementação de funcionalidades autônomas e a possibilidade de identificação de anomalias. Este artigo apresenta a plataforma robótica, os resultados preliminares do projeto mecânico e eletrônico e o software embarcado no robô, demonstrando a viabilidade de produzir alternativas de baixo custo para inspeções de tubos industriais de diâmetros reduzidos.

Keywords: Robotic platform; Mobile robotics; Pipeline inspection; ROS; Industrial pipes

Palavras-chaves: Plataforma robótica; Robótica móvel; Inspeção de tubulações; ROS; Tubulações industriais.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de dutos são recorrentes em muitas atividades industriais da mineração. Por exemplo, as tubulações são comumente usadas para descarregar rejeitos de mineração ou para transporte de polpa de minério. Devido à natureza do fluido, entupimento, rachaduras ou descontinuidades são comuns e impedem ou reduzem as capacidades de transporte nos dutos. Acumulação de resíduos, impactos mecânicos, corrosão e vibração são as principais razões para defeitos na tubulação. Nesse sentido, esses sistemas precisam passar por processos de inspeções constantes para identificar o local correto das anomalias e evitar falhas ou acidentes. Um dos principais desafios da manutenção é a realização de inspeções internas confiáveis das tubulações (Sun et al., 2009).

Segundo Ogai and Bhattacharya (2018), alguns tipos de sensores ou dispositivos podem ser utilizados para realizar inspeções de tubulações, como ultrassom ou radiografia. Todavia, estes sensores são limitados, pois nem sempre os dutos se encontram facilmente acessíveis por humanos, podendo estar enterrados ou passando por terreno de difícil acesso. Neste contexto o desenvolvimento de robôs móveis para realizar esta tarefa se torna uma alternativa altamente viável e eficiente.

Algumas plataformas robóticas móveis vêm sendo criadas para solucionar estes problemas de inspeção. Desenvolvido pela Universidade de Ciência e Tecnologia AGH (Ciszewski et al., 2017), o robô mostrado na Figura 1a opera em ambientes que contenham líquidos, como água, esgoto ou óleo. Para tal, suas conexões são seladas e os cabos utilizam conectores à prova d'água. A locomoção do robô se dá por meio de esteiras capazes de se posicionar em ângulos específicos com a utilização de atuadores mecânicos.

O robô KANTARO, apresentado na Figura 1b, possui um design inovador voltado para inspeção de tubulações com pequenos diâmetros (Nassiraei et al., 2007). A mecânica deste robô facilita a superação de obstáculos, como juntas e curvas acentuadas. Sua operação visa ser totalmente autônoma, para realizar inspeções de baixo custo e alta eficiência. O dispositivo robótico possui comunicação sem fio para se locomover livremente por dentro das tubulações, sendo equipado com um laser e uma câmera para a navegação autônoma e detecção de danos no interior das tubulações.

O Smart-Spider, mostrado na Figura 1c possui uma estrutura extensíveis que permite o acoplamento do robô em tubulações com diferentes tamanhos (Qu et al., 2018). A plataforma possui um corpo principal e um mecanismo flexível de rodas. O robô conta com duas câmeras, uma na parte frontal e outra na parte traseira, dentro de um domo de plástico transparente. O dispositivo é capaz de se locomover e executar algumas tarefas automaticamente, não dependendo de comunicação para realizar as inspeções; todavia, quando necessário, se comunica por meio de rede sem fio.

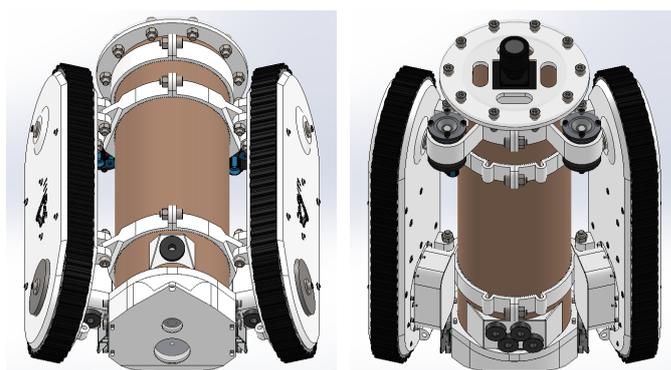
Este artigo corresponde a continuação do projeto (de Barros et al., 2021b), propondo um dispositivo robótico de baixo custo, com peças mecânicas de fácil fabricação, eletrônica robusta e software modular, capaz de inspecionar

visualmente dutos acima de 14 polegadas. A maioria dos componentes mecânicos é de polímero e pode ser impresso em 3D, o corpo do robô é fabricado utilizando um tubo de PVC. Os componentes eletrônicos são capazes de realizar o sensoriamento interno de tubulações de forma eficaz. Durante a montagem do protótipo a eletrônica foi conectada externamente ao robô para verificar o correto funcionamento de cada componente. O software foi implementado em módulos para facilitar o desenvolvimento e facilitar a depuração. Foi criado um robô virtual no simulador CoppeliaSim para testes de movimentação e do software implementado. Essas etapas permitiram o desenvolvimento deste trabalho e a obtenção de resultados preliminares.

A organização do artigo se inicia com a introdução do assunto no presente capítulo. A Seção 2 descreve a mecânica, eletrônica e o software do robô. A Seção 3 apresenta os processos de montagem e experimentos preliminares do dispositivo, e a Seção 4 demonstra os resultados obtidos com a criação do primeiro protótipo. Por fim, a Seção 5 conclui o artigo.

2. DESCRIÇÃO DO ROBÔ

O Instituto Tecnológico Vale (ITV) desenvolveu o EspeleoRobô, um dispositivo robótico capaz de inspecionar ambientes confinados (Azpúrua et al., 2021). No entanto, devido às suas dimensões, este não é capaz de inspecionar tubos e galerias menores que 22 polegadas de diâmetro. Portanto a plataforma robótica apresentada neste artigo (Figura 2) busca atender demandas de inspeções de dutos com diâmetro a partir 14 polegadas. O projeto do robô apresentado neste artigo possui um pedido de patente no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) (de Barros et al., 2021a). Além disso, a experiência adquirida no desenvolvimento do EspeleoRobô foi aproveitada neste projeto, como por exemplo a reutilização de alguns softwares.



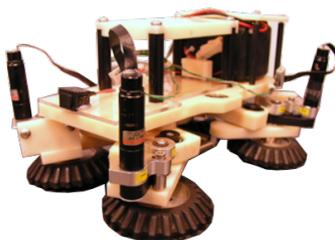
(a) Vista superior modelo 3D do robô. (b) Vista inferior modelo 3D do robô.

Figura 2. Modelo tridimensional desenvolvido no Solidworks do robô de inspeção de tubulações.

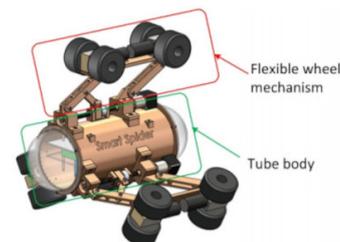
A seguir são apresentados os protótipos de robôs real e virtual desenvolvidos.



(a) Robô de inspeção desenvolvido pela AGH University. Fonte: Ciszewski et al. (2017)



(b) Robô Kantaro. Fonte: Nassiraei et al. (2007)



(c) Robô Spider-Smart. Fonte: Qu et al. (2018)

Figura 1. Plataformas encontradas na literatura desenvolvidas para inspeção de dutos com robótica móvel.

2.1 Robô real

A presente subseção especifica e detalha os componentes mecânicos e eletrônicos que constituem o dispositivo robótico proposto neste artigo.

Mecânica O desenvolvimento do projeto mecânico se deu integralmente no *software* de modelagem Solidworks, tendo sido criado os modelos 3D dos componentes. Estas peças foram agrupadas em diferentes módulos como mostrado na montagem da Figura 3.

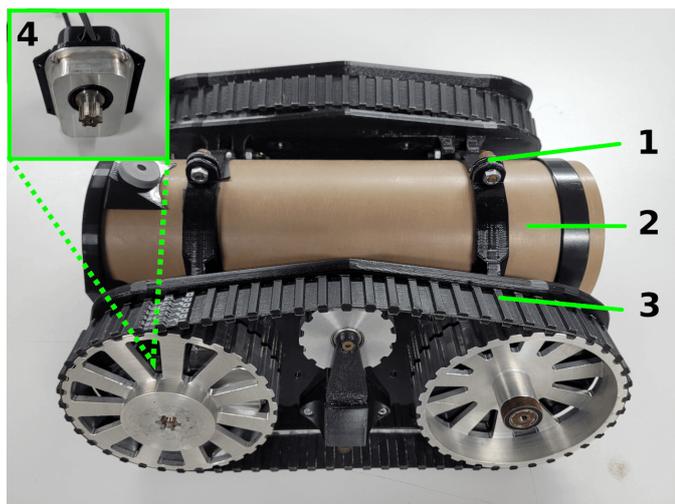


Figura 3. Módulos que constituem a estrutura do robô: suporte (1), corpo (2), esteira (3), motor (4)

Módulo do corpo: O corpo do robô corresponde a um tubo de PVC de 110 mm de diâmetro e 6.1 mm de espessura. Nas extremidades do tubo são fixados as tampas traseira e dianteira e ao longo do corpo são presos os suportes para acoplar diferentes módulos. Este corpo também é responsável por proteger e armazenar internamente a eletrônica embarcada no robô.

Módulo de esteira: A construção deste módulo é feita a partir de duas placas impressas em 3D. Neste conjunto estão acoplados o módulo do motor, polias, eixos, rolamentos e engrenagens para realizar a tração da esteira de movimentação.

Módulo de suporte: O módulo de suporte é definido pelo conjunto de partes que fixam os módulos de esteira e a iluminação no corpo do robô. Estes suportes permitem

a modularização da montagem, agrupando cada parte de forma independente.

Módulo do motor: Este módulo foi desenvolvido de forma que o motor trabalhe encapsulado. A construção do conjunto é feita utilizando uma placa base usinada e uma placa tampa impressa em 3D. Os eixos de transmissão de potência são usinados para atender as tolerâncias dimensionais necessárias para o encaixe entre as peças. Este módulo é acoplado no módulo de esteira para realizar o controle de movimentação do robô.

Eletrônica A eletrônica do robô foi projetada com o mínimo de componentes necessários, visando implementar um equipamento de baixo custo e fácil montagem. O robô é alimentado por uma bateria Li-Po e possui conversor DC-DC para atender especificações de cada equipamento. Este dispositivo tem como principal componente a placa Raspberry Pi, responsável por enviar sinais aos periféricos, armazenar dados e quando necessário realizar comunicação com o operador.

O dispositivo é capaz de sensorear o ambiente a ser inspecionado por meio de câmeras e LEDs de iluminação que permitem maior visibilidade dentro das tubulações. O robô utiliza dois motores elétricos de alto torque capazes de movimentar com facilidade o peso do dispositivo, o cabo de comunicação e transportar obstáculos que porventura estejam dentro das tubulações.

O diagrama apresentado na Figura 4 exemplifica as ligações elétricas e de comunicação entre os periféricos que constituem o sistema, descritos a seguir.

Raspberry Pi: A placa controladora utilizada é uma Raspberry Pi 4 Model B com 4 GB de memória RAM. Este controlador possui uma boa capacidade de processamento e tamanho físico reduzido, e consegue rodar o sistema operacional Linux, possibilitando o controle remoto de toda a locomoção, iluminação e aquisição de dados do robô via ROS.

Motor Dynamixel: O motor escolhido para o robô é um Dynamixel MX-64AT. Ele é um servo motor com controladores próprios garantindo acionamento robusto, economia de espaço e alta densidade de potência. O conceito descentralizado desses motores inteligentes minimiza o uso de controladores externos, diminuindo o espaço que esses circuitos ocupam. Além disso, os motores selecionados podem ser controlados via ROS, permitindo a alteração de parâmetros como velocidade, aceleração, torque, limite

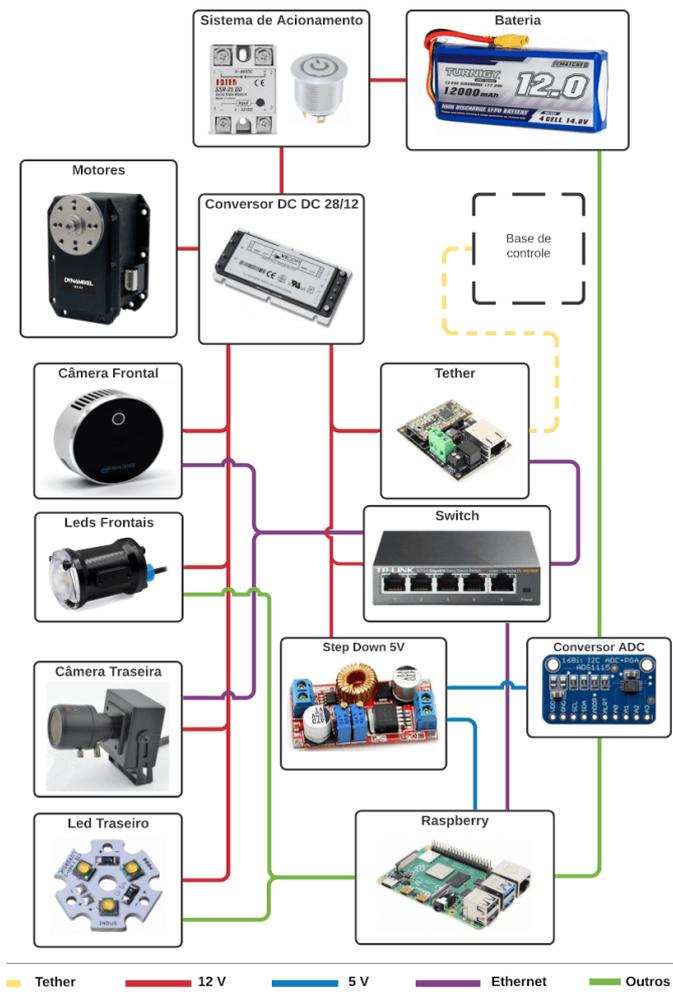


Figura 4. Diagrama das conexões eletrônicas do robô.

de temperatura de trabalho, entre outros itens. A comunicação entre motores e a Raspberry é feita por meio de um adaptador USB, o que facilita sua utilização.

Bateria: A escolha da bateria leva em consideração principalmente seu volume e peso, uma vez que o robô não pode ser grande e busca aumentar a autonomia energética de operação. Neste aspecto, as baterias do tipo Li-Po foram escolhidas para o projeto, devido a alta densidade energética, além de não apresentarem diminuição da capacidade de carga após um número elevado de recargas. Outro aspecto importante é que baterias Li-Po, em comparação com as de Li-Ion, são menos propensas à ocorrência de vazamentos do seu material interno diminuindo a chance de incidentes. Para a implementação do protótipo, foi utilizada uma bateria Turnigy 12000mAh 4S1P 12C 14.8V.

Câmeras: Para que seja possível realizar a inspeção e a teleoperação do robô, são utilizadas duas câmeras que proporcionam uma visão frontal e traseira do dispositivo. Foram escolhidas: uma câmera IP (Internet Protocol) que se comunica por um padrão ethernet, facilmente acessada pelo seu endereço de IP, e tem como vantagem o ajuste do foco e abertura da imagem de maneira manual; e uma Realsense LiDAR Camera L515, um dispositivo capaz de fornecer além de imagens de alta definição, informações

de distâncias do ambiente inspecionado. Esta capacidade se deve ao fato da câmera Realsense possuir a tecnologia *Light Detection And Ranging* (LiDAR), que por meio de um laser é capaz de medir distâncias e gerar uma nuvem de pontos tridimensional pelo espaço que o robô percorre. Esse dispositivo também conta com um sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) embarcado, o que facilita ainda mais a implementação de funcionalidades autônomas do robô.

Tether: O Fathon-x Tether é um dispositivo capaz de reproduzir uma comunicação *ethernet* com apenas um par de fios (padrão IEEE-1901), garantindo alta velocidade de transmissão com robustez. Esse dispositivo permite transmitir *streams* de vídeo e coleta de dados em cabos com mais de 300 metros de comprimento. A comunicação via cabo torna a transmissão de dados robusta e estável, pois não sofre qualquer tipo de interferência nos ambientes de inspeção. Ela garante transmissão de vídeos sem perda de qualidade e comunicação em tempo integral com o robô, tornando a teleoperação mais responsiva. O ponto negativo dessa tecnologia é exigir torques mais elevados dos motores, pois o robô terá que vencer um atrito crescente do cabo de comunicação conforme inspeciona o ambiente. Além disso, essa solução aumenta a possibilidade de enroscar o cabo de comunicação em alguma parte da tubulação e gerar problemas de mobilidade. Para amenizar o problema, é possível utilizar soluções semelhantes às apresentadas em (Shapovalov and Pereira, 2020), que propõe um planejador de caminhos que busca reduzir as chances de enroscamento do cabo durante a operação.

Switch ethernet: Para comunicação entre câmera IP, Raspberry e operador, um switch modelo TP Link TL-SG105E foi embarcado no robô. Este possibilita a comunicação entre 5 portas Gigabit com largura de banda suficiente para transmissão de dados de vídeo e traz diversas opções para configurações mais criteriosas da rede.

Iluminação: A iluminação do robô é feita utilizando LEDs de alta potência, alto fluxo luminoso e índice de reprodução de cor constante, que podem ser facilmente controlados via PWM.

Conversor DC-DC: Para manter a tensão constante mesmo com o descarregamento da bateria, um conversor 28V/12V (V28A12C200BL) foi adicionado para a alimentação do sistema embarcado, desde os motores até os LEDs para iluminação, câmeras, switch e Tether.

Step Down: Este dispositivo reduz a tensão disponibilizada pelo conversor DC-DC de 28 V para 5 V, que corresponde à tensão de alimentação da Raspberry, placa controladora do robô.

Conversor ADC: Este conversor é o responsável por controlar a intensidade luminosa dos LEDs. Com este equipamento é possível regular a tensão enviada para os LEDs por meio da variação do sinal PWM vindo da Raspberry.

2.2 Robô virtual

A utilização de simuladores é largamente difundida na robótica, permitindo que as características de um robô sejam testadas de maneira rápida e barata, sem a necessidade

da construção física do robô. O simulador escolhido neste artigo é o CoppeliaSim, e foi o mesmo utilizado em outros projetos do Instituto Tecnológico Vale, como por exemplo na criação do ambiente virtual de desenvolvimento e validação do EspeleoRobô (Cid et al., 2020). O simulador facilita a reprodução das dinâmicas dos corpos, permitindo ao programador focar especificamente na implementação do software do robô.

O dados reais físicos e geométricos do robô e do ambiente podem ser definidos na simulação, tornando esta ainda mais próxima da realidade. A integração do CoppeliaSim com o ROS é implementada via API (*Application Programming Interface*), permitindo uma comunicação direta com o software do robô. Portanto, os mesmos códigos de comando do protótipo podem ser utilizados para acionar o dispositivo virtual. Na simulação também é possível adicionar os sensores embarcados no robô, como as câmeras e sensores de velocidades dos motores.

A Figura 5 mostra o modelo criado no CoppeliaSim. Foram inseridos diversos sensores no robô, incluindo câmeras frontais e traseiras, acelerômetros, giroscópios, e sensores de rotação dos motores (*encoders*). Além dos sensores base do projeto, foi possível testar facilmente outros sensores como lasers e câmeras RGBD. Foram implementados scripts de integração entre a simulação e pacotes ROS, de forma que os testes realizados no simulador possam ser replicados no robô real.

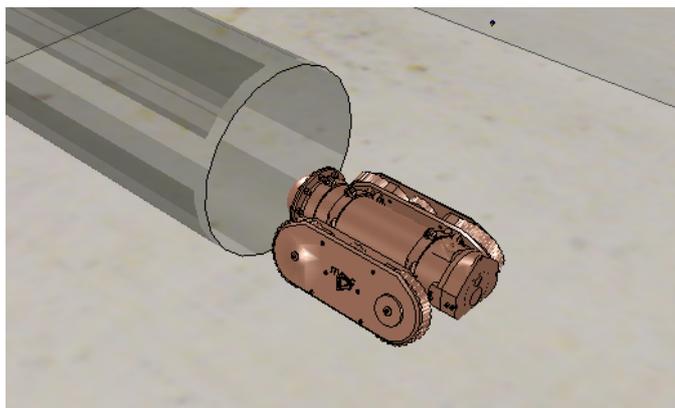


Figura 5. Simulação do robô de inspeção de tubulações no CoppeliaSim.

2.3 Software

O sistema desenvolvido utilizando o ROS foi projetado para ser totalmente dividido em módulos, com funções específicas e bem definidas. A modularidade do sistema facilita o desenvolvimento coletivo e a depuração à procura de falhas. A Figura 6 apresenta esta estrutura modular.

Módulo de inicialização do robô: O pacote *roboduto_bringup* é responsável por inicializar os pacotes e interfaces necessários para a utilização do robô. Ele é executado de forma automática toda vez que o robô é ligado, deste modo o dispositivo fica apto para iniciar uma inspeção assim que energizado.

Módulo de integração dos motores com ROS: A comunicação entre o computador embarcado e os motores é baseada no pacote ROS *dynamixel_workbench*, criado

Software no computador de teleoperação



Software embarcado no robô

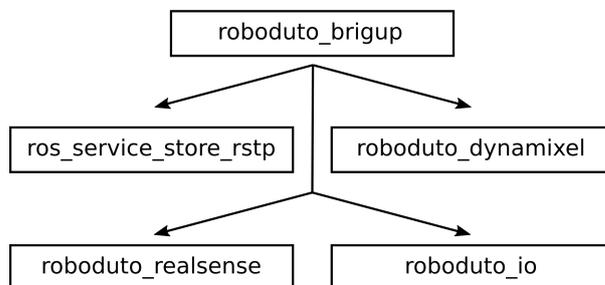


Figura 6. Diagrama dos pacotes ROS que constituem o software do robô.

pela própria empresa Dynamixel, que permite operar o motor de maneira fácil e eficiente. Para alterar alguns parâmetros físicos do robô, foi implementado o pacote *roboduto_dynamixel*, que utiliza como base o pacote original com configurações alteradas especificamente o presente projeto.

Módulo de gravação de vídeo: A captura de imagem da câmera IP é realizada com o pacote ROS *ros_service_store_rtsp*, que permite a gravação de *streams* de vídeo através do protocolo *ethernet*. Este pacote foi desenvolvido para o EspeleoRobô e portanto pequenas adaptações foram realizadas, como por exemplo a atualização da versão da linguagem de programação. A câmera Realsense l515 possui pacote ROS previamente disponibilizados pela Intel, fabricante da câmera, que possibilita a captura das imagens e controle de todas as funções do dispositivo. Para atender às especificações deste projeto, foi desenvolvido um pacote chamado *roboduto_realsense* que utiliza como base o pacote criado pela Intel com algumas configurações modificadas.

Módulo de controle de periféricos: Alguns periféricos são embarcados no robô para adicionar funcionalidades específicas. Foi implementado o pacote ROS *roboduto_io*, responsável por transformar as informações de sensores e atuadores em mensagens e comandos de execução. Este pacote pode controlar por exemplo, a intensidade luminosa dos LEDs por meio da variação do PWM, assim como realizar a leitura do nível de bateria do robô.

Módulo de teleoperação: Neste projeto foram utilizados outros dois pacotes desenvolvidos para o EspeleoRobô (Azpúrua et al., 2021): o *espeleo_gui* responsável por apresentar em uma interface gráfica informações do robô, como telemetria e imagens, para que o operador possa controlar o dispositivo; e o pacote *espeleo_teleop* responsável por converter entradas de um *joystick* ou teclado em comandos de velocidade com base na cinemática do robô.

3. MONTAGEM E VERIFICAÇÃO

A transformação do projeto digital em um protótipo funcional proporcionou diversos desafios, como a implementação de novas funções no software, correção de modelos 3D e ajustes de componentes eletrônicos. Nesta seção são abordados os principais desafios da montagem e as verificações necessárias para realizar os primeiros testes de funcionamento do robô.

3.1 Mecânica

A impressão 3D dos componentes modelados foi o primeiro passo para a montagem do robô. Devido à facilidade de produção com esta tecnologia, diversos protótipos das peças plásticas foram produzidos com intuito de corrigir e ajustar distâncias entre eixos, furos de parafusos e folgas entre peças que possuem movimentos. Também foi possível realizar testes de esforço mecânico melhorando o projeto e deixando todas as peças mais resistentes. A figura 7 mostra alguns dos componentes da estrutura mecânica que foram produzidos com a impressora 3D.



Figura 7. Componentes impressos em 3D da estrutura mecânica do robô.

O projeto modular do dispositivo facilita a montagem, pois um grupo de peças pode ser montado de forma independente e posteriormente acoplado a outros módulos. Este processo foi realizado em duas etapas: primeiro, a montagem do módulo de locomoção do lado direito e esquerdo, permitindo que o giro dos motores seja transmitido para a esteira; segundo, o corpo do robô recebeu os suportes impressos em 3D para acoplar os grupos de peças e periféricos.

3.2 Eletrônica

A montagem da eletrônica foi iniciada com a verificação das tensões necessárias em cada componente, pois a alimentação fornecida pela bateria é maior do que alguns periféricos suportam. Para isso o regulador de tensão, além de manter a tensão no nível de entrada correto, garante uma tensão constante mesmo durante o processo de descarregamento, enquanto houver carga na bateria. A partir da definição dessas alimentações de entrada foram produzidos os cabos de energia que saem do regulador e vão para os periféricos.

Os componentes eletrônicos foram testados externamente ao robô antes da montagem. A validação dos LEDs se

deu por meio de testes de intensidade luminosa em um ambiente escuro, no qual foram alterados os níveis de PWM e avaliada a nitidez da imagem gerada pela câmera.

Os motores Dynamixel possuem um sistema de comunicação e alimentação baseado no protocolo TTL, em que são necessários apenas 3 fios para alimentação e conexão entre os componentes da rede. Este motor também permite a configuração de parâmetros como aceleração e corrente máxima, que foram ajustados de forma a proteger os componentes do robô de desgastes prematuros. A câmera Realsense não necessita de alimentação externa, pois utiliza apenas uma porta USB 3.0 para receber energia e realizar a comunicação.

A teleoperação do robô se dá por meio do Tether e por isso sua montagem é muito simples, necessitando apenas de uma conexão através do cabo de rede à Raspberry e um par de fio para ser conectado ao computador da base de operação.

Por fim, a Raspberry recebe alimentação do regulador de tensão e os periféricos se conectam a ela para a integração com o software implementado para o robô. A Figura 8 mostra os componentes eletrônicos embarcados no motor antes da montagem.

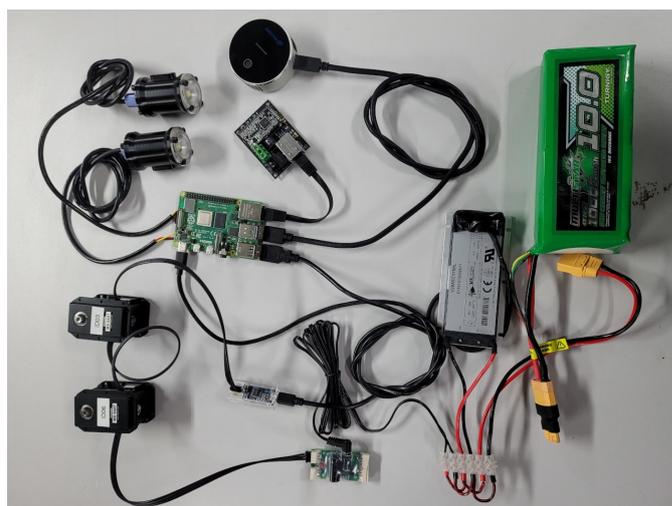


Figura 8. Montagem externa ao robô dos componentes eletrônicos embarcados.

3.3 Software

O sistema operacional Ubuntu versão 20.04 foi instalado na Raspberry Pi. Este sistema foi escolhido principalmente por ser compatível com o ROS e exigir poucos recursos computacionais para ser executado. Em seguida o ROS Noetic e todas as dependências também foram instaladas. Em paralelo, a rede de comunicação entre a Raspberry Pi e o computador de teleoperação foi configurada e testada.

Com a arquitetura de software principal configurada e a comunicação funcionando, os testes de cada pacote ROS do robô foram iniciados. Primeiramente os pacotes implementados para o EspeleRobô foram integrados no novo sistema e executados para testes iniciais. A principal atualização destes pacotes foi a migração dos scripts para a linguagem de programação Python 3. Em seguida, alguns

componentes como os motores Dynamixel e a câmera Realsense foram integrados utilizando os pacotes ROS fornecidos pelos próprios fabricantes.

Depois da execução de testes independentes de cada pacote ROS, foi realizada a inicialização simultânea, verificando a integração do sistema e o comportamento dos componentes.

4. EXPERIMENTOS PRELIMINARES E RESULTADOS

Após a criação do robô no simulador foram obtidos os primeiros resultados de movimentação. O sistema simulado possui integração com o ROS, portanto, permite a utilização dos mesmos pacotes implementados para o protótipo real. Por isso o pacote de teleoperação que utiliza o teclado do computador ou um joystick, pode ser validado por simulação.

A produção facilitada pela tecnologia de impressão 3D de todas as peças modeladas que constituem a estrutura do robô, resultou no desenvolvimento rápido e com baixo custo do protótipo.

A integração dos componentes eletrônicos que foi iniciada de forma externa ao robô foi finalizada ao fim da montagem. A criação dos pacotes permitiu o controle eficiente de cada periférico, tornando o robô funcional, possibilitando a movimentação por meio do controle de cada motor, a gravação de imagens geradas pelas câmeras e a iluminação utilizando os LEDs embarcados.

A Figura 9 mostra os resultados dos testes realizados no laboratório inserindo o robô em um segmento de tubulação com 80 centímetros de comprimento, em que foi possível criar uma nuvem de pontos 3D. Além disso, a união dos dados da câmera Realsense com a odometria dos motores Dynamixel possibilitou a realização de testes preliminares para calcular a orientação e posição do robô no espaço.

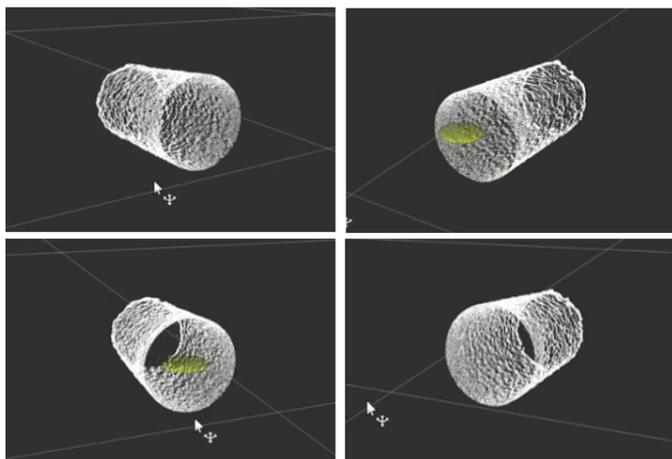


Figura 9. Visualização da nuvem de pontos 3D gerada com a câmera Realsense durante um experimento preliminar.

A atualização de pacotes ROS do EspeleoRobô para utilização no robô deste artigo foi outro ponto que acelerou o processo de criação do protótipo, permitindo reaproveitar códigos criados anteriormente.

Por fim, como mostrado na Figura 10, os componentes foram montados e embarcados na estrutura mecânica. Desta forma, foi possível realizar os primeiros testes bem-sucedidos de movimentação no protótipo produzido. Vídeos destes testes podem ser visualizados no repositório disponível no link <https://github.com/alexandremstf/roboduto>.



Figura 10. Robô de inspeção de tubulações reduzidas montado.

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento descrito neste artigo consistiu na criação de um protótipo funcional de um robô capaz de realizar inspeções em tubulações a partir de 14 polegadas. A produção deste protótipo envolveu a montagem da estrutura mecânica, a conexão eletrônica de todos os hardwares e a implementação do software embarcado no robô.

Até o presente momento foram realizados experimentos preliminares em ambientes controlados. No entanto, os testes têm se mostrado favoráveis, dados os resultados positivos. Por ser um protótipo funcional, robusto, de fácil replicabilidade e utilização simples, o Instituto Tecnológico Vale estuda possibilidades para tornar este projeto público. Outro fato relevante é que a premissa do projeto de desenvolver um robô de baixo custo foi alcançada com sucesso; comparando com o EspeleoRobô, o robô para a inspeção de tubulações teve um custo de produção 10 vezes menor.

Como trabalhos futuros, além da consolidação do robô como uma plataforma de inspeção móvel robusta e confiável, é proposto o desenvolvimento de um sistema de navegação autônomo e a geração de mapas 3D dos locais inspecionados, dado que a inspeção teleoperada depende de uma comunicação constante através de cabos que por sua vez podem limitar esta tarefa.

AGRADECIMENTOS

Esse artigo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - Brasil (FAPEMIG), do Instituto

Tecnológico Vale (ITV), da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

REFERÊNCIAS

- Azpúrua, H., Rezende, A., Potje, G., Júnior, G.P.d.C., Fernandes, R., Miranda, V., Domingues, J., Rocha, F., de Sousa, F.L.M., de Barros, L.G.D., et al. (2021). Towards semi-autonomous robotic inspection and mapping in confined spaces with the EspeleoRobô. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 101(4), 1–27.
- Cid, A., Nazário, M., Sathler, M., Martins, F., Domingues, J., Delunardo, M., Alves, P., Teotônio, R., Barros, L.G., Rezende, A., et al. (2020). A simulated environment for the development and validation of an inspection robot for confined spaces. In *2020 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2020 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2020 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, 1–6. IEEE.
- Ciszewski, M., Mitka, L., Buratowski, T., and Giergiel, M. (2017). Modeling and simulation of a tracked mobile inspection robot in MATLAB and V-REP software. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 5–11.
- de Barros, L.G., de Oliveira Teotônio, R., Alves, P.H., Torres, M.C., Domingues, J., Azpúrua, H., Von Pritzelwitz, P., and Pessin, G. (2021a). Dispositivo robótico para inspeção de tubos. Patent INPI, BR 10 2021 010685 9, Jun. 2021.
- de Barros, L.G.D., Teotônio, R., Alves, P., Torres, M.C.D., Domingues, J., Azpúrua, H., gustavo freitas, and Pessin, G. (2021b). A robotic device for inspecting small diameter pipes. In *Proceedings of the 26th International Congress of Mechanical Engineering*. ABCM.
- Nassiraei, A.A., Kawamura, Y., Ahrary, A., Mikuriya, Y., and Ishii, K. (2007). Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot “KANTARO”. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 136–143. IEEE.
- Ogai, H. and Bhattacharya, B. (2018). *Pipe inspection robots for structural health and condition monitoring*. Springer.
- Qu, Y., Durdevic, P., and Yang, Z. (2018). Smart-spider: Autonomous self-driven in-line robot for versatile pipeline inspection. *Ifac-papersonline*, 51(8), 251–256.
- Shapovalov, D. and Pereira, G.A.S. (2020). Exploration of unknown environments with a tethered mobile robot. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 6826–6831.
- Sun, Y., Ma, L., and Morris, J. (2009). A practical approach for reliability prediction of pipeline systems. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 210–214.