



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

Dissertação

**NOVO PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO DE ROLOS DE TRANSPORTADORES
DE CORREIA UTILIZANDO UM DISPOSITIVO ROBÓTICO**

Gabriel Carvalho Garcia

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2019**

Gabriel Carvalho Garcia

**NOVO PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO DE ROLOS DE TRANSPORTADORES
DE CORREIA UTILIZANDO UM DISPOSITIVO ROBÓTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Gustavo Medeiros Freitas,
D.Sc.

Coorientador: Prof. Amilton Sinatora, D.Sc.

Ouro Preto
2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G216n Garcia, Gabriel Carvalho .

Novo procedimento para inspeção de rolos de transportadores de correia utilizando um dispositivo robótico. [manuscrito] / Gabriel Carvalho Garcia. - 2019.

148 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas.

Coorientador: Prof. Dr. Amilton Sinatora.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

1. Minas e recursos minerais - Robôs industriais . 2. Manipuladores móveis. 3. Robôs - Sistemas de controle. I. Garcia, Gabriel Carvalho . II. Freitas, Gustavo Medeiros. III. Sinatora, Amilton. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 681.5:622.2

Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos
de Mineração - PROFICAM

Novo Procedimento para Inspeção de Rolos de Transportadores de Correia
Utilizando um Dispositivo Robótico

Gabriel Carvalho Garcia

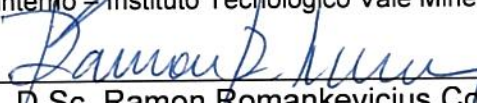
Dissertação defendida e aprovada em 27 de junho de 2019 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



D.Sc. Gustavo Medeiros Freitas
Orientador – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)



D.Sc. Gustavo Pessin
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)



D.Sc. Ramon Romankevicius Costa
Membro externo – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)



D.Sc. Fernando Cesar Lizarralde
Membro externo – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

*À minha família, pelo suporte e
carinho; e aos meus amigos, por
terem feito esta jornada mais
alegre.*

Agradecimentos

O dicionário apresenta diferentes significados para a palavra mestre: “*Indivíduo que possui o domínio de uma arte, ciência ou técnica*”, “*Pessoa que ensina*”, “*Pessoa que domina muito bem uma profissão, uma arte, uma atividade*”, entre outros. . . Mas o que vejo ao finalizar este mestrado é que ser um mestre está ligado a capacidade de aprender. De aprender a aprender, de aprender a escutar o próximo, a estar disposto e aberto a críticas, a pedir conselhos, a ajudar e ser ajudado, e de se tornar uma pessoa com o intuito de crescer. Ser um mestre também traz a responsabilidade de trabalhar pelo bem da humanidade, de buscar constantemente o avanço da ciência e de transformar o nosso mundo em um lugar melhor por meio do conhecimento adquirido.

Está claro que um mestrado não é feito apenas pelo estudante que foi o seu autor, um trabalho científico é a soma de esforços de uma série de pessoas envolvidas em um projeto, em um laboratório, em uma Universidade, em uma empresa. Dessa forma, é fundamental reconhecer e valorizar aqueles que fizeram este trabalho possível. Gostaria de agradecer ao amigo Marcos Paulo, por ter me aberto as portas do Instituto Tecnológico Vale e ter sido uma peça fundamental nesta caminhada. Um muito obrigado ao meu orientador Gustavo Freitas, por estar sempre presente e disposto a ajudar, e ter sido um grande mentor e parceiro durante todo o período deste mestrado. Deixo aqui também um forte agradecimento ao Eduardo Cota, um amigo que o mestrado me deu e sempre se mostrou uma pessoa de caráter ímpar e grande ternura, e ao Filipe Rocha que esteve sempre ao meu lado para ajudar e apoiar. Deixo também minha gratidão aos companheiros do Laboratório de Controle e Robótica: Ênio Lopes, Jacó Domingues, Héctor Azpúrua, Marcelo Hamanaka, Alexandre Souza, Guilherme Gaigher, Sabrina Santana, Guilherme Brito, Luiz Dias, Amauri Ferraz, e todos os demais que foram parte desta jornada participando ativamente dos momentos de concentração e descontração. Deixo meu agradecimento aos contínuos esforços dos Professores Alan Kardek, Thiago Euzébio, Gustavo Pessin e Amilton Sinatora, que permitiram a existência deste mestrado com a necessária conexão entre indústria e academia.

Meu profundo agradecimento aos meus pais, Anna e Manuel, por terem trabalhado arduamente para que eu possa hoje enfrentar a vida como ela se apresenta. E ao meu irmão, Juan Narowé, pela irrompível parceria e amizade. E minha gratidão *ad aeternum* a mansão República Necrotério e aos seus *Dephumptus* pelo acolhimento e irmandade durante esta jornada.

Sou eternamente grato a Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, por

proporcionar um ensino de qualidade e dar todo o apoio necessário para que nós, estudantes, possamos crescer e evoluir neste período de nossa vida. E por fim, um obrigado a Vale, pelas oportunidades e o suporte para o andamento deste projeto e por valorizar a pesquisa como um caminho para um futuro mais sustentável para a empresa e a nossa sociedade.

O presente trabalho 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 (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

“Not all those who wander are lost”
(J. R. R. Tolkien)

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

NOVO PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO DE ROLOS DE TRANSPORTADORES DE CORREIA UTILIZANDO UM DISPOSITIVO ROBÓTICO

Gabriel Carvalho Garcia

Junho/2019

Orientadores: Gustavo Medeiros Freitas
Amilton Sinatora

Os transportadores de correia (TCs) desempenham um papel importante no transporte de materiais em diferentes indústrias. Particularmente, a sua utilização em processos de mineração é extensa e vital para a operação desta indústria. Dessa forma, a inspeção dos componentes de transportadores de correias, como os rolos, é uma tarefa fundamental para garantir o correto funcionamento do equipamento. Visando apresentar uma solução efetiva para inspeção de transportadores de correias, é proposta uma metodologia de inspeção utilizando um dispositivo robótico composto por uma plataforma móvel capaz de se mover em diferentes terrenos, transpor obstáculos e subir e descer escadas com diferentes inclinações; um manipulador robótico; e um conjunto de sensores. A metodologia proposta retira os operadores das áreas de risco e fornece informações mais precisas do estado do equipamento. Além disso, a implementação do sistema não exige nenhuma modificação da estrutura existente dos TCs. Uma série de testes de campo preliminares validam o conceito proposto para operações no ambiente da mineração e permitem analisar a capacidade de inspeção do sistema. Para realizar uma inspeção efetiva é desenvolvida uma estratégia de controle cinemático de corpo completo para seguimento de trajetória. Com base no modelo cinemático do conceito do robô proposto, é apresentado um método de controle para comandar tanto a plataforma móvel quanto o manipulador robótico, considerando o dispositivo como um sistema de corpo completo. Tal método utiliza um controlador do tipo *feed-forward* em conjunto com linearização entrada/saída por *feedback*, responsável por lidar com as restrições não-holonômicas da plataforma móvel. A estratégia é validada por meio de simulações utilizando ROS e V-REP.

Palavras-chave: Robôs para mineração, Manipuladores móveis, Seguimento de trajetória.

Macrotema: Transportadores de correia; **Linha de Pesquisa:** Robótica Aplicada à Mineração;

Tema: Dispositivo robótico para a inspeção de rolos de correias transportadoras; **Área Relacionada da Vale:** Departamento de Engenharia e Desenvolvimento - Porto de Tubarão.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

A NOVEL PROCEDURE TO INSPECT BELT CONVEYORS IDLER ROLLS WITH A ROBOTIC DEVICE

Gabriel Carvalho Garcia

June/2019

Advisors: Gustavo Medeiros Freitas
Amilton Sinatora

Belt conveyors (BCs) play an important role in the transportation of materials in different industries. Particularly, its use in mining processes is extensive and vital to those operations. Therefore, inspecting the components of belt conveyors, such as idler rolls, is a fundamental task to ensure the equipment proper operation. Aiming to present an effective solution for belt conveyors inspection, we propose an inspection procedure using a robotic device composed by a mobile platform capable of moving in different terrains, overcoming obstacles and going up and down stairs with different slopes; a robotic manipulator; and a set of sensors. The proposed procedure removes operators from hazardous areas and provides more accurate information on the equipment condition. In addition, the system implementation does not require any modification on the existing BC structures. A series of preliminary field tests validate the proposed concept for operation in mining environment and allow us to analyze the inspection capacity of the system. We propose a whole body kinematic control for trajectory following in order to perform an effective inspection. Based on the kinematic model of the proposed robot concept, this work presents a control method to command both the mobile platform and the robotic manipulator, considering the device as a whole body system. The method uses a feed-forward controller with an input/output linearization by feedback responsible for dealing with the mobile platform non-holonomic constraints. Simulations using ROS and V-REP validate the strategy.

Keywords: Mining robotics, Mobile manipulators, Trajectory tracking.

Macrotheme: Belt conveyors; **Research Line:** Robotics applied to mining; **Theme:** Robotic device for conveyor belt idlers inspection; **Related Area of Vale:**Engineering and Development Department - Port of Tubarão.

Lista de Figuras

Figura 1.1	Transportador de correia.	18
Figura 1.2	Incêndio em torre de transferência entre transportadores de correias no porto da Vale de São Luís, Maranhão. Fonte: (IMIGRANTE, 2015).	19
Figura 1.3	Operadores realizando inspeção manual em transportador de correia.	20
Figura 1.4	Diagrama indicando etapas a serem realizadas para início, desenvolvimento e implantação do projeto.	21
Figura 2.1	Rolo com sensores e RFID. Fonte: (LODEWIJKS <i>et al.</i> , 2016).	25
Figura 2.2	Testes realizados com DOFS para monitorar temperatura em rolos de TC. Fonte: (YANG, 2014).	26
Figura 2.3	Trole para manutenção de TCs. Fonte: (LODEWIJKS, 2004).	27
Figura 2.4	VANT realizando captura de imagens térmicas em um TC. Fonte: (NASCI-MENTO <i>et al.</i> , 2017b).	28
Figura 2.5	<i>Hughes Mark II Robot</i> , um sistema para manipulação remota. Fonte: (CLARK, 1961).	29
Figura 3.1	Imagem de transportador de correia completo com componentes indicados.	34
Figura 3.2	Imagem de um rolo com indicação de seus elementos. Adaptado de: (NAS-CIMENTO <i>et al.</i> , 2017a).	35
Figura 3.3	Diferentes situações encontradas no ambiente dos transportadores de correias.	36
Figura 3.4	Esquema representativo do conceito preliminar da plataforma robótica.	37
Figura 3.5	Esquema representativo do conceito preliminar para arranjo de sensores, com elementos indicados.	38
Figura 3.6	Esquema representativo de um TC utilizado nos portos da Vale.	39
Figura 3.7	Diagrama representando a rotina proposta para inspeção de rolos.	41
Figura 4.1	Integração entre a plataforma móvel, braço manipulador e sensores.	42
Figura 4.2	Interface utilizada para controlar o manipulador robótico.	46
Figura 4.3	Equipe responsável pela teleoperação da plataforma móvel e do manipulador robótico durante testes de campo.	46
Figura 4.4	Plataforma móvel superando distintos desafios de locomoção.	48
Figura 4.5	Robô realizando rotina de inspeção proposta.	49

Figura 4.6 Imagem térmica de um trecho de um TC.	49
Figura 4.7 Espectro da emissão acústica de um rolo em falha e de um rolo em situação de funcionamento normal.	50
Figura 4.8 (a) Conceito da nova plataforma robótica. (b) Conjunto de locomoção com esteira e roda.	50
Figura 5.1 Esquemático do manipulador móvel simplificado.	52
Figura 5.2 Representativo do modelo de um robô móvel de tração diferencial.	54
Figura 5.3 Representativo das coordenadas de um ponto b localizado no eixo sagital do robô.	56
Figura 5.4 Diagrama de blocos para a estratégia de controle proposta.	63
Figura 5.5 Manipulador móvel utilizado para simulações.	64
Figura 5.6 Imagens sobrepostas de simulação do robô realizando uma trajetória sinusoidal. A linha verde representa o caminho percorrido pelo efetuador enquanto que a linha vermelha representa a trajetória de referência.	66
Figura 5.7 Trajetória realizada e de referência durante simulação no plano XY para a trajetória sinusoidal.	67
Figura 5.8 Erros de posição e orientação para a trajetória sinusoidal.	67
Figura 5.9 Velocidades aplicadas as juntas do manipulador móvel durante seguimento de trajetória sinusoidal.	68
Figura 5.10 Imagens sobrepostas de simulação do robô realizando uma trajetória quadrada. A linha verde representa o caminho percorrido pelo efetuador enquanto que a linha vermelha representa a trajetória de referência.	68
Figura 5.11 Trajetória realizada e de referência durante simulação no plano XY para a trajetória quadrada.	69
Figura 5.12 Erros de posição e orientação para a trajetória quadrada.	70
Figura 5.13 Velocidades aplicadas as juntas do manipulador móvel durante seguimento de trajetória quadrada.	70
Figura 5.14 Imagens sobrepostas de simulação do robô realizando uma trajetória representando uma inspeção. A linha verde representa o caminho percorrido pelo efetuador enquanto que a linha vermelha representa a trajetória de referência.	71
Figura 5.15 Trajetória realizada e de referência durante simulação no plano XY para a trajetória quadrada.	72
Figura 5.16 Erros de posição e orientação para a trajetória quadrada.	72
Figura 5.17 Velocidades aplicadas as juntas do manipulador móvel durante seguimento de trajetória quadrada.	73

Lista de Siglas e Abreviaturas

DLS *Damped Least-Squares*

DOFS *Distributed Optical Fiber Sensor*

EOD *Explosive Ordnance Disposal*

GDL Graus de Liberdade

GPS *Global Positioning System*

IMU *Inertial Measure Unity*

LIDAR *Light Detection And Ranging*

RFID *Radio-Frequency Identification*

SLAM *Simultaneous Localization and Mapping*

TC Transportador de Correia

VANT Veículos Aéreos Não Tripulados

V-REP *Virtual Robot Experimentation Platform*

Lista de Símbolos

B Distância do ponto b ao centro de rotação do robô

\dot{p} Velocidade linear do efetuador

$\dot{\theta}$ Velocidade das coordenadas do sistema simplificado

$\dot{\theta}_a$ Velocidade das juntas do sistema atuado

$\dot{\theta}_l$ Velocidade de rotação da esteira/conjunto de rodas da esquerda

$\dot{\theta}_r$ Velocidade de rotação da esteira/conjunto de rodas da direita

e_p Erro de posição do efetuador

e Erro da pose do efetuador

I Matriz identidade

$J(\theta)$ Matriz Jacobiana geométrica

K Matriz de ganho

λ Fator de amortecimento

λ_0 Constante de amortecimento

L_r Distância latitudinal entre as rodas da plataforma móvel

O_0 Sistema de coordenadas inercial

ω Velocidade angular do efetuador

ω_r Velocidade angular da plataforma móvel

O_p Sistema de coordenadas do efetuador

p Posição do efetuador do manipulador móvel

p_d Posição desejada para o efetuador
 p_e Posição atual do efetuador
 b Ponto localizado no eixo sagital da plataforma móvel
 x Pose do manipulador móvel
 J^\dagger Pseudo-inversa à direita da matriz J
 \mathcal{Q}_d Orientação desejada do manipulador móvel em quatérnio
 \mathcal{Q}_e Orientação atual do manipulador móvel em quatérnio
 q_r Pose da plataforma móvel
 R Matriz de rotação do manipulador móvel
 R_d Orientação desejada do manipulador móvel
 R_e Orientação atual do manipulador móvel
 R_r Raio das rodas da plataforma móvel
 S Operador anti-simétrico
 t Tempo
 τ Manipulabilidade do sistema robótico
 τ_0 Limite da vizinhança da manipulabilidade do sistema
 θ Configuração atual do manipulador móvel
 $\dot{\theta}_{1...6}$ Velocidades das juntas do braço
 u Ação de controle
 v_r Velocidade linear da plataforma móvel
 W Matriz de peso relacionadas ao custo da velocidade das juntas
 x_d Pose desejada para o manipulador móvel
 x_e Pose inicial do manipulador móvel

Sumário

Figura 1	Introdução	18
Figura 1.1	Objetivos	21
Figura 1.1.1	Objetivo geral	22
Figura 1.1.2	Objetivos específicos	22
Figura 1.2	Organização do documento	22
Figura 2	Revisão bibliográfica	24
Figura 2.1	Inspecção de transportadores de correias	24
Figura 2.1.1	Sistemas fixos de monitoramento	24
Figura 2.1.2	Sistemas móveis de inspeção	26
Figura 2.2	Manipuladores móveis	28
Figura 3	Metodologia proposta	32
Figura 3.1	Transportadores de correia	32
Figura 3.2	Plataforma móvel e manipulador	35
Figura 3.3	Sensores embarcados	36
Figura 3.4	Rotina de inspeção proposta	39
Figura 4	Teste de conceito	42
Figura 4.1	Equipamentos utilizados	42
Figura 4.2	Implementação e integração	44
Figura 4.3	Testes e resultados	47
Figura 4.4	Considerações	49
Figura 5	Modelagem e controle cinemático	52
Figura 5.1	Cinemática direta	52
Figura 5.2	Cinemática diferencial	53
Figura 5.3	Controle da plataforma móvel	54
Figura 5.4	Controle cinemático do manipulador móvel	57
Figura 5.4.1	Erro de posição	58
Figura 5.4.2	Erro de orientação	58

Figura 5.4.3	Lei de controle	58
Figura 5.4.4	Estabilidade do sistema	60
Figura 5.4.5	Controle de corpo completo	62
Figura 5.4.6	Singularidades cinemáticas	62
Figura 5.4.7	Diagrama de blocos	63
Figura 5.5	Simulação do controle de corpo completo	63
Figura 5.5.1	Trajectoria sinusoidal	65
Figura 5.5.2	Trajectoria quadrada	67
Figura 5.5.3	Trajectoria simulando rotina de inspeção	70
Figura 5.5.4	Discussão sobre as simulações	71
Figura 6	Conclusões	74
Figura 6.1	Contribuições	75
Figura 6.1.1	Novo procedimento para inspeção dos transportadores de correias	75
Figura 6.1.2	Testes de conceito para verificar a viabilidade técnica do projeto	75
Figura 6.1.3	Estratégia de controle de corpo completo para um manipulador móvel	76
Figura 6.1.4	Publicações	76
Figura 6.2	Trabalhos futuros	77
Referências Bibliográficas		78
Apêndices		82

1. Introdução

Transportadores de correias (TCs), como o que pode ser visto na Figura 1.1, são um dos meios mais utilizados para transporte em larga escala de materiais a granel como minérios, carvão, cereais, aparas de madeira, areia, cascalho e rochas. A sua aplicação em processos de mineração é extensa, sendo que podem ser encontrados em todas as etapas da mineração, como na extração da mina, nas etapas de beneficiamento na usina e no transporte dentro dos portos. Para exemplificar, a Vale, empresa multinacional no segmento de mineração, possui mais de 2.000 TCs, totalizando 1.000 km de extensão e aproximadamente 1,6 milhões de rolos.



Figura 1.1: Transportador de correia.

Pelo seu extensivo uso, a correta manutenção dos TCs se torna vital para o funcionamento pleno das indústrias das quais ela faz parte. Em um levantamento interno da Vale, foi apontado que entre 2014 e 2016, apenas nos portos de Ponta da Madeira e Tubarão, houve mais de R\$2,7 milhões em perdas materiais causadas exclusivamente por incêndios gerados por super aquecimento de rolos defeituosos, como o que pode ser visto na Figura 1.2. Devido a essa importância e pelo papel fundamental desempenhado no processo produtivo, faz-se necessário a realização de uma rotina de inspeção e manutenção constante nos componentes constituintes dos transportadores de correia.

A inspeção dos TCs na indústria da mineração é feita periodicamente de forma sensível. Operadores utilizam a audição, visão e olfato para buscar falhas nos seus componentes, em especial os rolos, como retratado na Figura 1.3. Este método depende da experiência dos inspetores, de sua acuidade visual e auditiva e expõe os mesmos a várias adversidades naturais encontradas nos ambientes onde os TCs são normalmente instalados, como chuva, poeira, forte exposição ao sol, risco de acidentes com partes móveis, alto nível de ruído e necessidade de percorrer longas distâncias.

Mesmo em condições ideais e de fácil acesso as estruturas do TC, as inspeções exigem



Figura 1.2: Incêndio em torre de transferência entre transportadores de correias no porto da Vale de São Luís, Maranhão. Fonte: (IMIGRANTE, 2015).

percorrer grandes extensões e verificar um alto número de componentes (LODEWIJKS, 2004). Por exemplo, para um operador inspecionar um TC de 150 metros, ele deve caminhar por ambos os lados do transportador e verificar 300 rolos de carga, já que cada cavalete contém 3 rolos e os mesmos estão espaçados, em média, a cada 1,5 metro. Além disso, os rolos de retorno, cavaletes, estrutura metálica e demais componentes também devem ser inspecionados. Diante destes problemas, que estão presentes mesmo nos casos mais simples de inspeção, deve-se buscar tecnologias que possam auxiliar nesta atividade, visando à elevação dos níveis de disponibilidade física e à preservação da saúde e segurança dos trabalhadores que executam as inspeções.

Na literatura são propostas diferentes soluções para o problema, que podem ser divididas em dois grupos se baseando no tipo de abordagem utilizada: o primeiro inclui as propostas com utilização de peças e sensores fixos instalados em pontos do TC (LODEWIJKS *et al.*, 2007, 2016; PANG e LODEWIJKS, 2011; YANG, 2014); enquanto que o outro grupo apresenta soluções que utilizam plataformas móveis com sensores acoplados e que se movimentam ao longo dos TCs (LODEWIJKS, 2004; NASCIMENTO *et al.*, 2017b; R. YONG, W. GONG, M. Z. SHEN, E G. GUOAN, 2014; YANG *et al.*, 2016). Apesar de existir uma série de abordagens diferentes na literatura, é possível concluir que atualmente não existe um sistema que se mostre como solução absoluta.

Diante destes problemas, que estão presentes mesmo nos casos mais simples de inspeção, é interessante buscar tecnologias que possam auxiliar a atividade de inspeção de TCs visando a elevação dos níveis de disponibilidade física e a preservação da saúde e segurança dos trabalhadores que executam as inspeções. Buscando apresentar uma solução eficaz para o problema, este trabalho propõe uma nova metodologia de inspeção de componentes de transportadores de correia, como foco nos rolos, utilizando um dispositivo robótico. O sistema robótico a ser



Figura 1.3: Operadores realizando inspeção manual em transportador de correia.

desenvolvido será composto por uma plataforma móvel, um braço manipulador, e um conjunto de sensores para a inspeção de rolos de transportadores de correias.

A metodologia proposta é baseada na utilização de um dispositivo robótico que irá se locomover nas estruturas laterais localizadas ao longo do transportador de correias. Estas estruturas são utilizadas pelos operadores para realizarem a inspeção, e são projetadas pensando na mobilidade de um homem de estatura média. A utilização das estruturas já existentes é um ponto de extrema importância deste trabalho pois evita a necessidade de instalação de estruturas adicionais, o que diminui o custo de implantação do sistema e acelera a sua aplicação em larga escala. Porém, devido a este requisito, o robô deve ser capaz de superar os desafios de locomoção comumente encontrados nestes locais. Dentre estes, podem-se destacar a presença de *decks* de largura reduzida com pisos modulares gradeados, e escadas de concreto ou metal com diferentes alturas entre degraus e inclinações variáveis. Também são encontrados alguns obstáculos como materiais transportado pelo TC que caíram, pelotas de ferro, trilhos de trem, barro, grama, entre outros.

Diante destes desafios, o robô deverá ter uma boa capacidade de locomoção e transposição de obstáculos. Além disso, o robô deve ser capaz de percorrer uma trajetória que permita captar as grandezas desejadas de forma efetiva. Dessa forma, este trabalho apresenta uma estratégia de controle de corpo completo, onde todas as juntas do manipulador móvel serão atuadas de forma simultânea, permitindo que o robô consiga rastrear a trajetória definida sem a necessidade de dois operadores ou dois sistemas de controle separados.

Devido a literatura apresentar escassos testes de robôs móveis terrestres no ambiente de mineração, sendo que não foi encontrado nenhum teste de campo no âmbito dos transportadores de correia, não é possível realizar uma análise a priori das capacidades que o robô deve apre-

sentar nem dos desafios que serão encontrados. Dessa forma, foi considerado fundamental uma prova de conceito para permitir definir as características essenciais ao sistema robótico a ser desenvolvido. Este trabalho, então, apresenta o desenvolvimento e os resultados de uma série de testes com caráter de prova de conceito para conhecer as dificuldades que serão apresentadas ao sistema.

Este trabalho foi responsável por iniciar e desenvolver as primeiras etapas de um projeto que depende da colaboração entre diferentes equipes. É importante ressaltar que não é o intuito desta dissertação abordar todos os pontos necessários para o desenvolvimento do sistema robótico para inspeção dos rolos, senão que este trabalho apresenta um conceito inicial do robô, a rotina de inspeção a ser realizada, resultados de um teste de conceito em campo e uma estratégia de controle para o robô. A Figura 1.4 apresenta etapas necessárias para o início, desenvolvimento e implantação do sistema. Em vermelho estão destacados alguns dos pontos que esta dissertação aborda, e em cinza estão outras etapas em andamento ou que serão iniciadas por outras equipes do ITV em conjunto com a UFRJ.

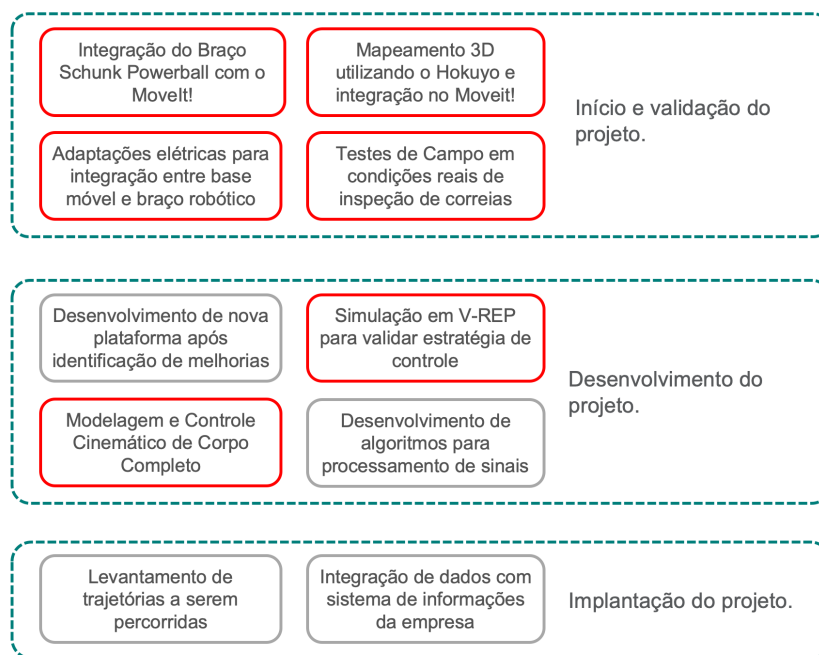


Figura 1.4: Diagrama indicando etapas a serem realizadas para início, desenvolvimento e implantação do projeto.

1.1. Objetivos

Os objetivos são divididos em objetivos gerais e específicos. O objetivo geral é o resultado principal esperado para este trabalho. Enquanto que os objetivos específicos são as etapas necessárias para se chegar ao objetivo geral. Estes estão descritos a seguir.

1.1.1. Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral propor uma nova metodologia utilizando um dispositivo robótico para a inspeção de componentes de transportadores de correia, em especial os rolos. Tal metodologia inclui a proposta de um conceito de robô e um conjunto de sensores, assim como uma estratégia de inspeção.

1.1.2. Objetivos específicos

Especificamente, os objetivos deste trabalho são:

- Realizar uma extensa revisão bibliográfica sobre as principais soluções para inspeção de TCs propostas na literatura;
- Propor uma estratégia de inspeção baseada no procedimento realizado por operadores, escolher os sensores a serem utilizados e criar uma rotina de inspeção;
- Criar um projeto conceitual de um dispositivo robótico capaz de realizar a inspeção proposta no item anterior;
- Relatar as dificuldades encontradas em campo durante testes realizados como prova de conceito;
- Implementar e avaliar métodos de controle de corpo completo para seguimento de trajetória baseado em cinemática diferencial;
- Desenvolver uma plataforma para simulação do sistema robótico em conjunto com a estratégia de controle proposta;
- Avaliar os resultados encontrados e definir novos caminhos a serem seguidos para andamento do projeto.

1.2. Organização do documento

Este documento é composto por seis capítulos.

Este capítulo introduz o problema da inspeção dos rolos dos transportadores de correias, aponta os desafios e os objetivos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte na inspeção de TCs, considerando as soluções baseadas em sistemas fixos e móveis. Em seguida é realizada uma revisão sobre manipuladores móveis, a sua importância para a robótica e técnicas de comandar estes dispositivos.

No capítulo 3 é descrita a proposta do dispositivo robótico para inspeção, comentando sobre cada um de seus componentes. Também é apresentada uma metodologia de inspeção a ser realizada com o robô.

O capítulo 4 descreve a implementação de um protótipo e relata uma série de testes realizados em caráter de prova de conceito.

A cinemática do dispositivo é apresentada no capítulo 5, onde também é desenvolvida uma estratégia de controle para comandar o robô considerando seu corpo completo.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões e contribuições do trabalho realizado e aponta os próximos passos para este trabalho.

2. Revisão bibliográfica

Esta pesquisa propõe um dispositivo robótico a ser utilizado para inspecionar rolos de transportadores de correias. Considerando o tipo de tarefa que deve ser realizada pelo robô, foi proposta a utilização de um manipulador móvel. Buscando abordar o problema de forma completa, a revisão da literatura é dividida em duas partes: a inspeção dos TCs, buscando entender como essa inspeção é feita tradicionalmente na indústria e qual o estado da arte da academia na busca de novas tecnologias para este intuito; e os manipuladores móveis, apresentando a importância desse tipo de robô e explorando técnicas para o controle do seu movimento.

2.1. Inspeção de transportadores de correias

Tradicionalmente a inspeção de TC é realizada por operadores especialistas, conhecidos como inspetores de correias. Estes inspetores se baseiam nos seus sentidos para verificar o estado dos componentes do TC. Apesar da dificuldade em apontar claramente quais os atributos avaliados por uma inspeção humana, podem-se destacar que os seguintes aspectos são avaliados: o som, buscando identificar ruídos que representam falhas, fator que está diretamente ligado à vibração do rolo; visual, procurando elementos que não estejam em condições normais; e no olfato, já que rolos superaquecidos podem liberar odores. Dessa forma, as pesquisas sobre métodos para inspeção de TCs se inspiraram nessas grandezas (som, vibração, temperatura e imagem) para buscar soluções que possam substituir o modo como são realizadas atualmente. Então, o problema pode ser definido como a busca de soluções sensoriais e de comunicação que possam ser aplicadas em larga escala e que resistam ao ambiente da mineração. Partindo dessa definição, as técnicas de inspeção propostas na literatura podem ser divididas em dois grupos baseados no tipo de abordagem utilizada: o primeiro inclui as propostas com utilização de peças e sensores fixos ao longo dos TCs; enquanto que o outro grupo apresenta as soluções que utilizam plataformas móveis com sensores acoplados e que se movimentam ao longo dos TCs.

2.1.1. Sistemas fixos de monitoramento

Um sistema de inspeção fixo é formado por uma série de sensores que são instalados nos rolos ou em partes da estrutura do TC. Dessa forma, é possível adquirir uma considerável quantidade de informações de cada rolo e, com um sistema de comunicação, integrá-los a um sistema de supervisão central. A seguir, são apresentadas algumas soluções que envolvem sistemas fixos de monitoramento.

A utilização de uma rede de sensores que se comunicam entre si e possuem informações individuais dos rolos foi proposto inicialmente por [Lodewijks et al. \(2007\)](#). No artigo é proposto o uso de *Smart Idlers*: rolos com sensores de temperatura embarcados e RFID para identificação. Em outro trabalho, [Pang e Lodewijks \(2011\)](#) propõem um sistema semelhante, acrescido com uma rede sem fio para transmissão de dados e um sistema de autoalimentação ou

baterias, o que evitaria a necessidade de fios. Mais recentemente, [Lodewijks et al. \(2016\)](#) propuseram um novo sistema de *Smart Idler*, como pode ser visto na Figura 2.1, com aplicação de conceitos de *Internet of Things* e *Big Data*. No campo de *Smart Idler*, existem duas soluções comerciais ([INGENUITY, 2017](#); [VAYERON PTY LTD, 2017](#)) que utilizam o mesmo conceito de instalação de sensores individuais nos rolos, porém seus catálogos não apresentam informações técnicas. Apesar da instalação de sensores individuais nos rolos se apresentar como uma solução interessante, o valor deste tipo de rolo é de aproximadamente 300 US\$ enquanto que rolos comuns custam 30 US\$, o que inviabiliza o uso desta solução devido ao grande número de rolos utilizado nos TCs. Além disso, não foram realizados testes de campo (apenas de laboratório) com os equipamentos, não sendo possível comprovar sua eficiência no ambiente agressivo onde os TCs são comumente instalados.



Figura 2.1: Rolo com sensores e RFID. Fonte: [\(LODEWIJKS et al., 2016\)](#).

Outra possibilidade de inspeção de correias é baseado no método descrito por [Rogers \(1988\)](#), que utiliza o conceito de *Distributed Optical Fiber Sensor* (DOFS) para realizar medidas de pressão, tensão e temperatura. A ideia dessa proposta é a instalação de cabos de fibra ótica em cavaletes para medir a temperatura destes. [Yang \(2014\)](#) aponta que a utilização desse sistema é capaz de encontrar falhas nos rolos por assumir que a temperatura do cavalete representa a condição do rolo que ali está instalado. Uma montagem de seu teste pode ser vista na Figura 2.2. [Hu et al. \(2011\)](#) conduziram experimentos com DOFS em uma mina de carvão. Foi constatada a possibilidade de detectar elevações de temperaturas em diferentes pontos ao longo de uma fibra de 6 km, com incerteza de medição de $\pm 2^\circ \text{C}$, sendo detalhado também um sistema que alerta sobre elevações de temperatura que possam danificar a correia, que entra em combustão a aproximadamente 150°C . O sistema proposto é capaz de autodiagnóstico, indicando rompimentos e falhas na fibra usada. Alguns exemplos de soluções comerciais com essa tecnologia são descritos por [Yokogawa \(2017\)](#) e [AP Sensing \(2017\)](#).

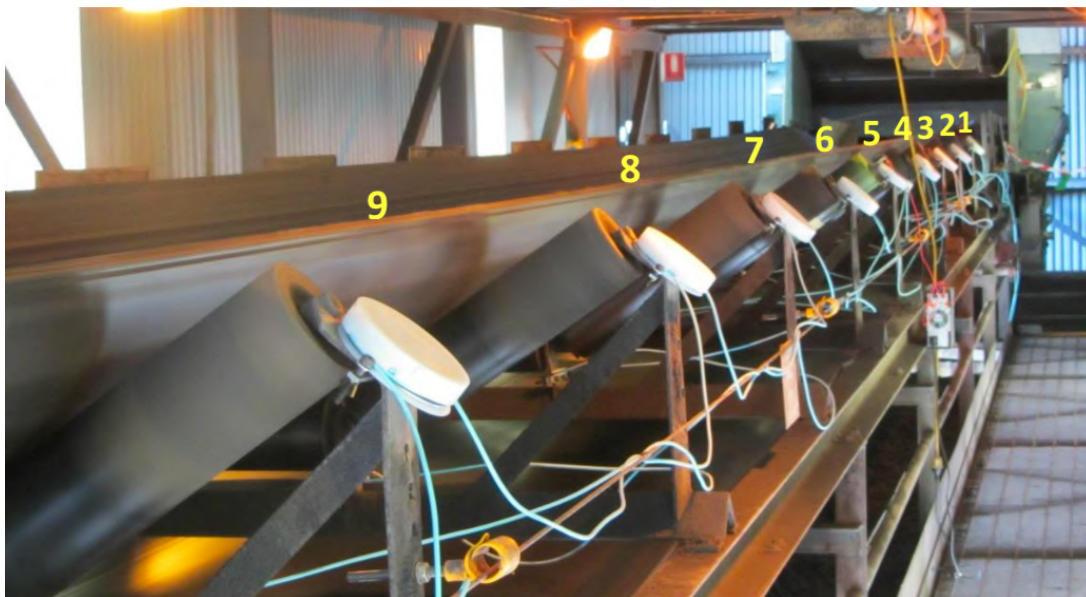


Figura 2.2: Testes realizados com DOFS para monitorar temperatura em rolos de TC. Fonte: (YANG, 2014).

A instalação de sensores fixos apresenta como vantagem uma alta acurácia, grande quantidade de informação e possibilidade de monitoramento de todos os rolos *on-line*. Porém, o seus custos podem se tornar muito altos para aplicação devido ao grande número de rolos, além de depender de instalação e manutenção *in situ* em caso de falhas.

2.1.2. Sistemas móveis de inspeção

Visto que a instalação de sensores para monitoramento dos rolos pode não ser prática ou viável economicamente, uma alternativa que se mostra relevante é o uso de plataformas móveis dotadas de sensores para a realização de inspeções dos rolos. Ao embarcar os sensores em plataformas móveis, não se faz necessário um grande número de dispositivos para sensoria-mento, permitindo que os custos nessa área sejam drasticamente reduzidos, além de permitir a utilização de sensores mais caros e precisos. Outra vantagem das plataformas móveis presente em algumas das soluções propostas é a utilização da estrutura existente nos TCs, excluindo a necessidade de instalação de sensores ou da troca de componentes existentes. Dessa forma, estas soluções podem ser adotadas na indústria de forma mais imediata que os sistemas fixos. Por outro lado, perde-se o controle *on-line* de todos os rolos ao mesmo tempo, já que na inspeção realizada por plataformas móveis, cada rolo só pode ser inspecionado uma vez por ciclo da plataforma.

Lodewijks (2004) apresentou a primeira ideia de um sistema para monitoramento de TCs utilizando uma plataforma móvel. Em seu artigo é proposta a utilização de um trólei utilizado para manutenção, como o apresentado pela Figura 2.3, acrescido de capacidades autônomas na estrutura do TC, equipado com um sistema robótico para manutenção e um equipamento para aquisição e análise de vibração. Também é proposto um método de processamento de sinais para

detecção de defeitos baseado na frequência da vibração. A sua pesquisa está focada no conceito do sistema e em sua análise, sendo que não são comentados aspectos técnicos construtivos ou resultados de testes de campo.



Figura 2.3: Trole para manutenção de TCs. Fonte: (LODEWIJKS, 2004).

Yang *et al.* (2016) também propõem um robô móvel que se desloca sobre a estrutura do TC. Porém, a sua abordagem sensorial é distinta, pois este realiza a captura de imagens em infravermelho dos rolos, motores, polias e outros componentes mecânicos. Os autores desenvolvem um método de processamento de imagens em infravermelho, que combina diferentes técnicas de reconhecimento de padrões e processamento de sinais para identificar os componentes e sua temperatura nas imagens obtidas. A partir disso, é realizado um prognóstico de falha, comparando a temperatura obtida com faixas de referência em diferentes níveis para cada tipo de componente reconhecido.

Outra abordagem encontrada na literatura é a utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs), que voariam ao lado dos TCs e estariam embarcados com sensores. Nesse contexto, a patente de R. Yong, W. Gong, M. Z. Shen, e G. Guoan (2014) reivindica a realização de inspeção com um VANT, com sistema de navegação autônoma, que identifica as rotas e zonas de inspeção por meio de adesivos refletivos instalados no corpo do TC e em outras estruturas, permitindo orientação vertical e horizontal da rota. O VANT realiza a inspeção com uso de câmera infravermelha de alta-resolução, para obter temperatura; sensor de RFID, para identificação do rolo; e sensores para leitura da concentração de gases, dado o objetivo para uso em minas subterrâneas de carvão, onde existe grande risco de explosão. Os dados captados são transmitidos on-line para estações terrestres, dotadas de capacidade para realizar o processamento de sinais e retransmitir a informação. A desvantagem do uso de VANTs está na curta duração da bateria e baixo *payload*, limitando a instalação de sensores. Além disso, em qualquer situação de falha durante o voo, o VANT pode se tornar um potencial objeto causador de desarme no TC.

Nascimento *et al.* (2017b) propõem um sistema baseado no uso de VANT com sensores embutidos e métodos para integração dos dados com soluções corporativas. Os autores relatam testes de voo, captura de áudio e imagens térmicas, todos realizados com o TC em funcionamento, porém de forma isolada, não permitindo sua verificação como um conjunto único.



Figura 2.4: VANT realizando captura de imagens térmicas em um TC. Fonte: (NASCIMENTO *et al.*, 2017b)

Avaliando as propostas presentes na literatura, é possível observar que não existe um sistema que se mostre como solução absoluta. Outro ponto a se notar é que resultados de testes em campo são escassos, colocando em xeque o real funcionamento dos sistemas em aplicações nos severos ambientes dos TCs.

2.2. Manipuladores móveis

Um manipulador móvel é um tipo especial de dispositivo formado basicamente por um braço robótico embarcado em uma plataforma móvel. O primeiro registro encontrado na literatura descrevendo a utilização de um manipulador móvel data de 1961. Clark (1961) analisa os aspectos técnicos de um sistema para manipulação remota, para o qual o autor utiliza o termo *Mobot*. Naquele trabalho estão descritos os subsistemas (braço e plataforma móvel) e as suas utilidades. O seu principal objeto de estudo é o *Hughes Mark II Mobot* (apresentado na Figura 2.5), sistema desenvolvido para utilização em laboratórios nucleares, formado por um veículo com dois braços robóticos e dois sistemas de televisão para teleoperação. O autor deixa clara a importância desse tipo de sistema para operação em ambientes perigosos e insalubres como o espaço, o oceano, laboratórios nucleares, entre outros. O trabalho descreve principalmente técnicas para teleoperação de manipuladores móveis, não comentando sobre cinemática ou controle destes dispositivos.

Os trabalhos subsequentes que abordam o tema de manipuladores móveis focam em aspectos de controle do manipulador robótico diante dos distúrbios gerados pela plataforma móvel. Um exemplo é apresentado por Lynch (1985), onde foi modelado um simples manipulador móvel com dois graus de liberdade (GDL) e testadas técnicas de controle para avaliar a

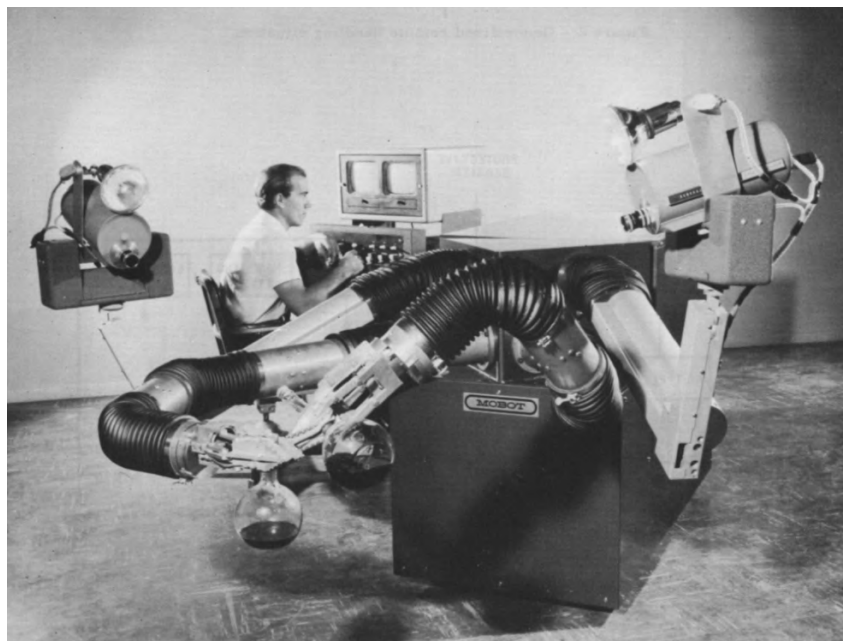


Figura 2.5: *Hughes Mark II Robot*, um sistema para manipulação remota. Fonte: (CLARK, 1961).

estabilidade do sistema diante do movimento da plataforma móvel. Joshi e Desrochers (1986) também consideraram o caso de um manipulador móvel com dois GDL para investigar técnicas de controle capazes de manter a orientação do efetuador diante de distúrbios aleatórios. Hootsmans (1992) propõem um algoritmo baseado na transposta da matriz Jacobiana para compensar o movimento do braço robótico de acordo com a suspensão passiva da plataforma móvel na qual este se encontra embarcado.

Um ponto em comum entre estes trabalhos consiste em propor soluções independentes para os problemas de locomoção e manipulação. Entretanto, esta não seria uma solução intuitiva para o controle de manipuladores móveis. Um exemplo encontrado na natureza seria uma pessoa pegando um objeto em uma mesa. A pessoa irá, instintivamente, se posicionar através de comandos simultâneos de braço e pernas de forma a pegar o objeto confortavelmente, evitando ficar muito próxima da mesa a ponto de ter dificuldade para manipular o objeto, ou muito distante para ter que realizar maior esforço devido ao efeito de alavanca ou atingir os limites de alcance de seu braço. Considerando que esse tipo de comportamento seja benéfico a um manipulador móvel, Yamamoto e Yun (1992) propõem a coordenação entre locomoção e manipulação para um manipulador móvel de forma integrada. Para tal, são empregadas técnicas de controle não-linear buscando maximizar a manipulabilidade localmente para seguimento de trajetória do efetuador do manipulador móvel. Yamamoto (1994) explicita a dificuldade do controle devido às restrições não-holonômicas às quais as plataformas móveis estão normalmente sujeitas.

Seraji (1993) propõe a utilização de uma matriz Jacobiana aumentada para o controle de *rovers* embarcados com braços robóticos. A ideia principal daquele trabalho, estendido por

Seraji (1998), é considerar os graus de liberdade da plataforma móvel e do manipulador como juntas de uma mesma cadeia cinemática, e dessa forma modelar a cinemática diferencial do sistema como um todo. O trabalho já aponta o problema de se inverter a matriz Jacobiana que, devido a redundância cinemática do manipulador móvel, não é quadrada e dessa forma não é invertível por métodos convencionais. Esta dificuldade inerente a qualquer cadeia cinemática redundante foi inicialmente tratada por Whitney (1969), que introduziu a ideia de se mover localmente em direção a posição desejada através de um modelo linear. Neste mesmo trabalho é proposta a utilização da pseudo-inversa da matriz Jacobiana para resolver o problema da redundância.

Outra abordagem interessante em relação à redundância cinemática é proposta por Nakamura *et al.* (1987), que utilizam os graus de liberdade extras para realizar outras tarefas além da principal. Por exemplo, se a tarefa principal do robô é seguir uma trajetória com o efetuador, uma tarefa secundária poderia ser o desvio de obstáculos. Naquele trabalho é proposto um método de divisão das tarefas do robô em subtarefas organizadas por prioridade. Siciliano e Slotine (1991) generalizaram este método para incluir um número arbitrário de tarefas sequenciais, sendo que uma tarefa subsequente não interfira em uma anterior. Apesar desses trabalhos focarem apenas na aplicação em braços robóticos, os mesmos conceitos podem ser estendidos para manipuladores móveis. Um exemplo é apresentado por Acar e Murakami (2011), onde os autores utilizaram o método de prioridade de tarefas em um manipulador móvel com apenas duas rodas (necessitando se equilibrar). Os autores definem que a tarefa de maior prioridade do robô é se manter estável, enquanto que a redundância do sistema é utilizada para o seguimento de trajetória.

Uma dificuldade que surge quando utilizados métodos baseados em inversão da matriz Jacobiana para solução da cinemática inversa do sistema é a presença de singularidades cinemáticas. Este problema é foco de diversas pesquisas. Várias abordagens baseadas em métodos numéricos e de otimização foram desenvolvidas e são discutidas por Maciejewski e Klein (1989). O problema desses métodos está relacionado a custos computacionais e a não garantia de estabilidade assintótica do erro durante seguimento de trajetória, (SICILIANO *et al.*, 2008). Chiaverini *et al.* (1994) exploram a utilização do método da pseudo-inversa amortecida (DLS) para resolver as singularidades em um manipulador industrial. O DLS utiliza a pseudo-inversa da Jacobiana e um fator de amortecimento para evitar as singularidades, permitindo que seja feita uma compensação entre acurácia e viabilidade da solução. Vargas *et al.* (2014) fazem o uso de um método que estima a inversa da matriz Jacobiana de forma dinâmica, denominada de inversa filtrada da matriz Jacobiana. Os autores comparam o seu método com a utilização do DLS e apresentam resultados superiores. Eles utilizam um manipulador com seis GDL para avaliação do método, sendo que não foi encontrado na literatura registros da técnica sendo aplicada a manipuladores móveis.

A aplicação da cinemática diferencial em conjunto com o DLS e a ideia de simplificar a plataforma móvel como juntas de uma cadeia cinemática para um manipulador móvel foi re-

centemente explorada por [Lee et al. \(2017\)](#). Naquele trabalho, os autores propõem uma técnica de controle para compensar o desvio gerado pela utilização do DLS. [Adorno \(2011\)](#) propõem uma abordagem diferente para a modelagem de um manipulador móvel. Os autores utilizam álgebra de quatérnios duais para modelar a cinemática do sistema. Naquele trabalho também foi utilizado DLS para evitar as singularidades cinemáticas.

3. Metodologia proposta

Este capítulo visa apresentar o que são os transportadores de correias, quais seus principais componentes e reforçar a necessidade da inspeção de alguns de seus componentes. Em seguida é apresentado o dispositivo robótico e a estratégia de inspeção a ser utilizado.

3.1. Transportadores de correia

Os transportadores de correias são equipamentos utilizados para transporte de materiais entre dois pontos. Estes equipamentos são formados por uma série de componentes. A Figura 3.1 traz a imagem de um modelo tridimensional de um TC utilizado pela Vale. Este TC recebe a carga pela parte mais baixa (a direita) e realiza a descarga pela parte mais alta (a esquerda). A Figura também traz imagens com detalhes dos principais componentes do TC. Segue uma breve explicação sobre os principais componentes para o propósito deste trabalho.

- Uma **correia** responsável por transportar o material. Esta correia pode apresentar diferentes características a depender do material a ser transportado. Dentro das usinas, por exemplo, muitas vezes são utilizadas correias resistentes a incêndios já que esta transporta minério de ferro a alta temperatura. Na mineração, as correias utilizadas normalmente são de borracha com a alma (material interno) constituída por cabos de aço ou uma malha de lona.
- Os **rolos** são equipamentos passivos de rotação concêntrica responsáveis por permitir que a correia se movimente. Um conjunto formado por um ou mais rolos em um suporte forma um *rolete*. Existem basicamente três tipos de roletes distintos. Os **roletes de carga** suportam o peso do material que está sendo transportado ao longo da correia, estão localizados na parte superior do TC e são os roletes que se apresentam em maior número. Os **roletes de retorno** estão localizados na parte inferior do TC, e têm o objetivo de manter a posição e o formato da correia. Os **roletes de impacto** geralmente são maiores por apresentarem um revestimento extra de borracha ou outro material macio. Isso se deve por serem utilizados nas regiões onde o TC recebe material, que vem de maior elevação, e sofrem impacto no momento do despejo.
- O **conjunto de acionamento** é formado basicamente por um motor elétrico e é responsável por aplicar o giro a um tambor que transfere o movimento para a correia.
- O **sistema de tensionamento** é responsável por manter a tensão de operação ideal da correia. Esta tensão varia durante a operação do TC por alterações em sua extensão, causadas por diferentes cargas aplicadas e outras condições, como a temperatura.
- O TC tem por objetivo levar material de um ponto a outro, dessa forma é necessário haver um equipamento para carga e outro para descarga. Os componentes responsáveis por tais

funções são o **chute de alimentação** e o **chute de descarga**.

- A **estrutura do transportador de correia** é formada por todos os outros elementos que suportam o TC, como estruturas metálicas, treliças, torres, etc..

Além destes, o TC conta com outros componentes, tais quais mesa de impacto e tambores de motriz, encosto e cauda. Uma discussão mais completa dos equipamentos supra explicados pode ser encontrada no livro (CEMA, 1997), utilizado como referência para a descrição destes componentes.

Alguns dos componentes do TC não representam desafios significativos de inspeção por já existirem tecnologias de monitoramento consolidadas, caso do sistema de acionamento, ou por estarem agrupados em uma pequena região, caso dos raspadores e sistema de esticamento, facilitando a inspeção por operadores (LODEWIJKS *et al.*, 2016). Porém, existem componentes que se encontram em grande quantidade e espalhados ao longo de praticamente toda a estrutura dos TCs, sem que hajam técnicas eficientes para a inspeção de tais. Dentre estes se destacam os rolos.

Os rolos são compostos por um eixo central estático, que é apoiado ao cavalete do TC, um rolamento em cada extremidade, e um revestimento, que na mineração é normalmente metálico. A Figura 3.2 apresenta um rolo com um corte onde é possível ver sua estrutura interna e seus elementos. Por estarem em constante movimento e sujeitos a diferentes cargas, os rolos sofrem um desgaste mecânico natural, o que pode levar a falha destes. Entre as falhas possíveis está o desgaste do revestimento do rolo, que pode levar a perfuração deste, e a problemas nos rolamentos, que podem travar, se deteriorar ou quebrar.

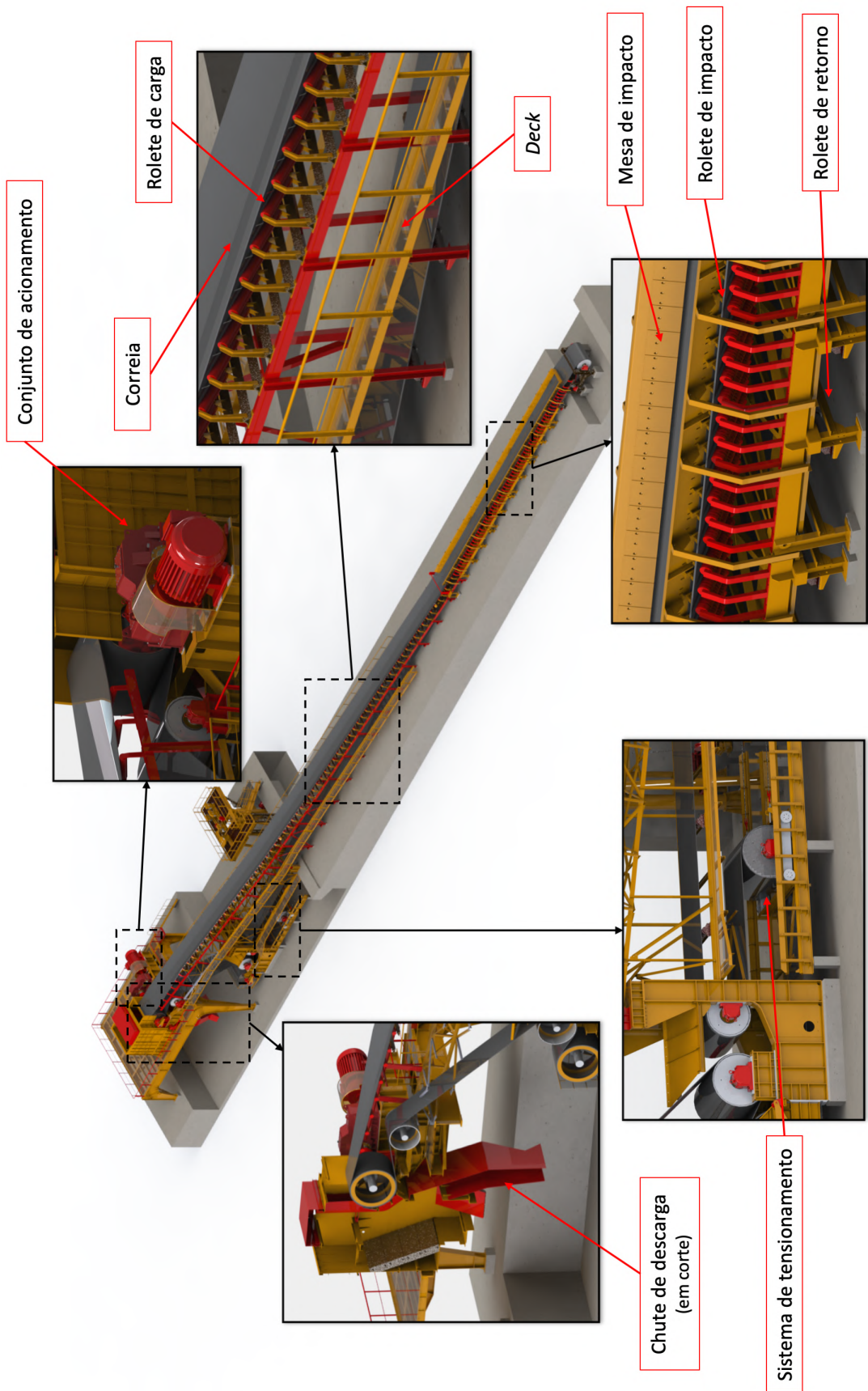


Figura 3.1: Imagem de transportador de correia completo com componentes indicados.

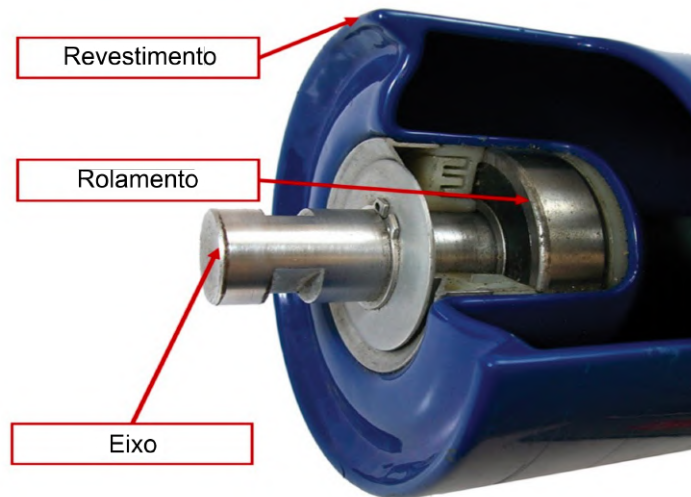


Figura 3.2: Imagem de um rolo com indicação de seus elementos. Adaptado de: (NASCI-MENTO *et al.*, 2017a).

3.2. Plataforma móvel e manipulador

Uma das premissas deste trabalho é realizar a inspeção dos transportadores de correia sem a necessidade de instalação de novas estruturas. Dessa forma, é necessário que o sistema robótico seja capaz de se locomover pelos mesmos locais utilizados pelos operadores durante a inspeção manual. A Figura 3.3 traz fotografias de diferentes situações encontradas nos ambientes dos TCs. Nessa Figura podem-se observar escadas de concreto desgastadas e de grade de metal com sujeira acumulada, *decks* de grades de metal, e um local sem pavimentação.

O principal desafio ao projetar o robô é como realizar a locomoção em um ambiente tão complicado. De acordo com (KANG *et al.*, 2003), esteiras laterais são eficientes para a transposição de terrenos complexos. Adicionalmente, robôs desenhados para ambientes industriais semelhantes, como óleo e gás, apresentam bons resultados usando esteiras sobre braços de alavanca rotacionais. Levando isso em conta, é proposto um dispositivo manipulador móvel, como ilustrado na Figura 3.4, para realizar a inspeção. A plataforma móvel é baseada em robôs do tipo EOD (*Explosive Ordnance Disposal*), utilizados por militares para auxílio no desarmamento de artefatos explosivos. A alta capacidade de locomoção deste conceito no ambiente industrial pode ser comprovada pelo robô Argos, que utiliza braços de alavanca com esteiras e foi vencedor do Total's Robotics Challenge (KYDD *et al.*, 2015). O robô possui dois pares de braços de alavanca rotacionais, posicionados em suas extremidades, e são utilizados para transpor obstáculos e variar a altura da plataforma. Cada conjunto de alavancas é acionado individualmente, cuja rotação é efetuada por dois motores distintos. Estes conjuntos também possuem esteiras, com acionamento solidário ao sistema de esteiras laterais. No topo da plataforma está instalado um manipulador robótico de longo alcance e com 6 graus de liberdade



(a) Escada de concreto.



(b) Escada de grade de metal.



(c) Local sem pavimentação.



(d) Deck de grades de metal.

Figura 3.3: Diferentes situações encontradas no ambiente dos transportadores de correias.

(GDL), capaz de posicionar e orientar o conjunto de sensores em diferentes poses de acordo com os requisitos da aquisição de dados.

3.3. Sensores embarcados

Para definir os sensores a serem utilizados para a inspeção é necessário analisar quais as grandezas que podem indicar anomalias no funcionamento dos rolos. Seguindo o levantamento feito por [Nascimento et al. \(2017a\)](#), podem-se destacar três sinais que permitem avaliar a condição de um rolo. São eles:

- **Acústico:** os rolamentos geram emissões acústicas devido a interação de seus componentes internos. Essas emissões acústicas apresentam frequências específicas que variam de acordo com a rotação de operação e a geometria do rolamento. Quando existe alguma anomalia no rolo estas emissões acústicas sofrem alterações em seus padrões, o que permite identificar estes defeitos de forma prematura.
- **Térmico:** o movimento de rotação que é aplicado aos rolamentos fazem com que o atrito

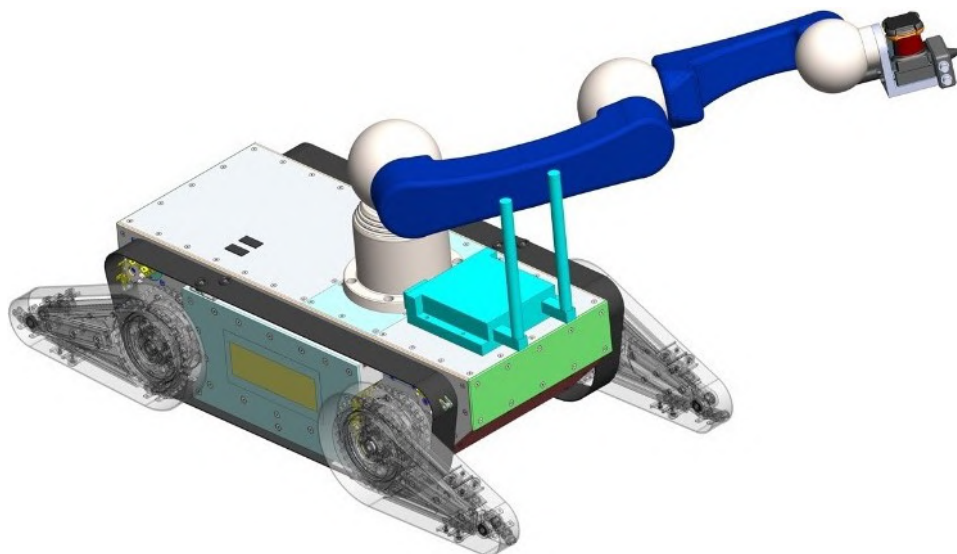


Figura 3.4: Esquema representativo do conceito preliminar da plataforma robótica.

interno de seus componentes gerem calor. A temperatura resultante deste atrito varia de acordo com a velocidade e carga do TC, a temperatura no local, e a exposição a outras fontes de calor, como insolação. Apesar disso, falhas do rolo fazem como que este venha a apresentar temperaturas elevadas quando comparado aos rolos em sua vizinhança. Vale ressaltar que a alta temperatura em um rolo é um dos problemas de maior risco para o TC. Já que quando a correia é parada e existe um rolo defeituoso, o contato continuado entre um ponto da borracha da correia e o metal a alta temperatura do rolo pode acarretar um incêndio. Nesse cenário, a produção é interrompida por períodos razoavelmente longos para contenção de chamas, substituição de estrutura e reconstrução do TC.

- **Vibração:** assim como para a emissão acústica, a interação entre os elementos internos do rolo gera uma vibração que apresenta uma frequência definida, a depender das condições de operação do TC. A análise das assinaturas desta vibração ao longo do tempo pode permitir que seja feita uma previsão da vida útil do rolo ou detectar falhas imediatas.

Baseando-se neste levantamento é possível definir os instrumentos a serem utilizados para a inspeção.

A captura da resposta sonora dos rolos será realizada por um **microfone**, para que esse sinal acústico seja comparado com padrões sonoros que possam indicar situações de rolos defeituosos. A medição de temperatura se dará por meio de uma **câmera térmica** posicionada de modo que capture imagens de rolos vizinhos, para realizar uma comparação entre as suas temperaturas. Como a plataforma percorre toda a extensão do transportador de correia, todos os rolos terão suas temperaturas medidas. A inspeção da vibração será efetuada por um **acelerômetro** acoplado a uma ponteira de toque. Essa inspeção é viabilizada pelo movimento do braço robótico, que terá sua trajetória planejada de modo que a ponteira encoste fisicamente no cavalete, mancais ou eixos de rolos a serem avaliados; por questões de segurança, esta ação não

é permitida para operadores humanos.

Além dos sinais supra listados, imagens coloridas também podem ser utilizados para avaliação das condições estruturais do rolo e de seu revestimento. Novos componentes diferem dos antigos por diversos aspectos visuais, como pontos de desgaste e estrutura da pintura. Técnicas avançadas de visão computacional podem detectar falhas com alta taxa de precisão (CHA *et al.*, 2018). Para captura dessas imagens será utilizada uma **câmera RGB**.

Para permitir um maior nível de autonomia para o sistema robótico, é necessário que exista algum método para mapeamento do entorno do robô. Dessa forma este será capaz de calcular trajetórias que lhe permita tocar partes do TC e navegar no ambiente. Dessa forma, também é proposta a utilização de um LIDAR, do inglês *Light Detection and Ranging*), que combinado com um movimento de rotação do punho do braço robótico será utilizado para gerar um mapa em nuvem de pontos tridimensional do ambiente.

O manipulador robótico de seis graus de liberdade embarcado na plataforma é responsável por carregar todos os sensores utilizados na inspeção e também por garantir o correto posicionamento dos mesmos.

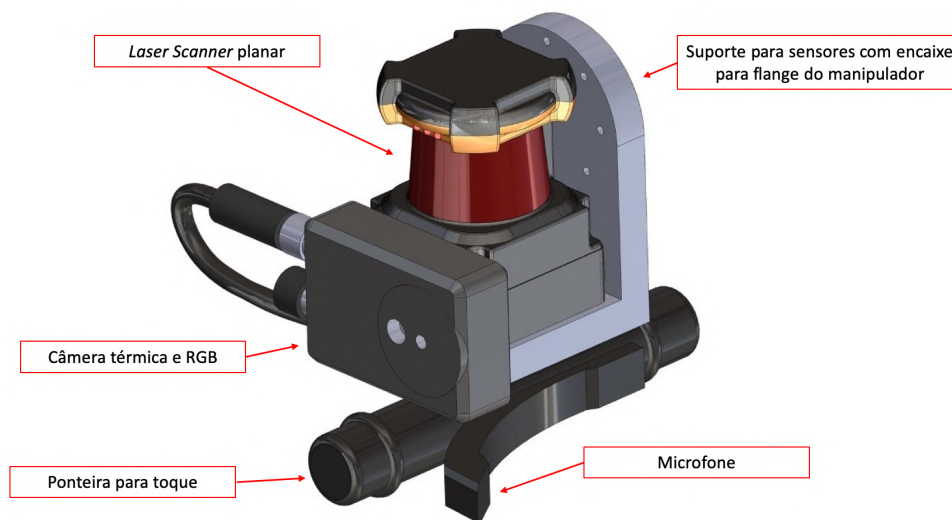


Figura 3.5: Esquema representativo do conceito preliminar para arranjo de sensores, com elementos indicados.

Os sensores estão posicionados em um arranjo mecânico a ser instalado no punho do manipulador robótico. A Figura 3.5 apresenta um conceito preliminar do arranjo destes sensores. Um suporte que se encaixaria na flange do manipulador seria responsável por portar os sensores tal que o braço robótico seja capaz de facilmente posicioná-los para aquisição de dados em uma posição designada.

Também será embarcado na plataforma um sistema responsável por localizar o robô no espaço. Este sistema é importante para fornecer a localização dos rolos defeituosos. Para tal função será utilizado um conjunto entre uma unidade inercial (IMU, do inglês *Inertial Measurement Unit*) e um receptor de sinal de GPS (*Global Positioning System*).

Apesar da proposta de utilização dos sensores supracitados, o tratamento desses dados, a classificação e a detecção de falhas não fazem parte do escopo desta dissertação.

3.4. Rotina de inspeção proposta

O manipulador móvel deve seguir uma rotina de inspeção para inspecionar periodicamente os transportadores de correia. O principal problema enfrentado na inspeção dos componentes do TC, como o representado na Figura 3.6, incluindo a correia, as polias e os rolos, é que eles estão em constante movimento.

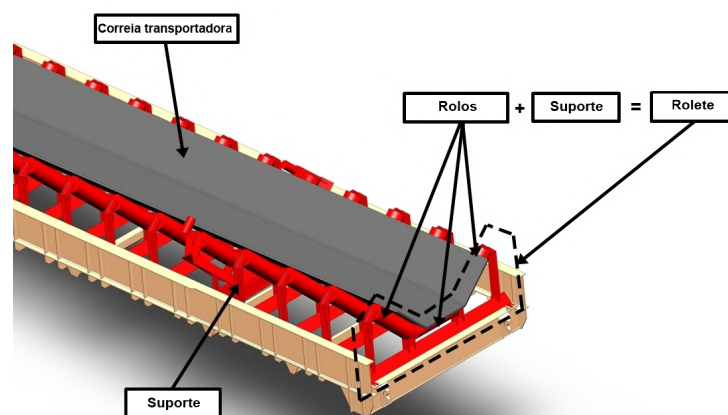


Figura 3.6: Esquema representativo de um TC utilizado nos portos da Vale.

Para o monitoramento acústico e térmico, soluções como a câmera térmica e o microfone permitem que as medições sejam feitas sem necessidade de contato físico com os componentes. Porém, para analisar a vibração do sistema é importante que exista contato entre o sensor e a peça a ser estudada. No entanto, esta não é uma tarefa trivial. Muitas partes móveis não podem ser tocadas, como a correia e os rolos. Além disso, muitas vezes os pontos desejados apenas podem ser alcançados por espaços estreitos. O manipulador móvel deve tocar os componentes do TC sem colidir com nenhuma parte restrita. Para isso, os sistemas de mapeamento e controle precisam ser precisos e robustos. Devido a esta diferença entre o processo de se realizar o monitoramento acústico e térmico e a medição da vibração, este último será realizado em menor frequência. Dessa forma, o robô se moverá ao longo do TC captando imagens térmicas e a emissão acústica, e apenas caso seja necessária uma inspeção mais detalhada, devido a periodicidade ou a uma anomalia, será realizada a medição da vibração.

Diante das dificuldades impostas ao sistema, e buscando criar uma rotina de inspeção que condiga com os sensores e o manipulador móvel, é proposto o seguinte fluxo de inspeção, ilustrado na Figura 3.7.

1. Nesta primeira etapa, a plataforma móvel deve se locomover linearmente ao longo da correia com uma velocidade constante. O sistema de controle de rastreamento de trajetória deve ser tal que a câmera térmica possa adquirir de forma efetiva a termografia dos rolos à medida que a extensão é percorrida. Além dos dados térmicos, também será coletada a emissão acústica dos rolos com o microfone e poderá ser observado o desgaste do revestimento dos rolos com a câmera RGB.
2. Os sinais coletados pela câmera térmica e pelo microfone são enviados em tempo de execução para um sistema central. Estes sinais, são, então, analisados por um especialista, em caso de teleoperação; ou por um sistema de processamento de sinais e imagens, para o caso de inspeção autônoma. A partir destes dados é possível realizar uma análise e um acompanhamento da vida útil do rolo. Caso seja constatada a necessidade de informações sobre vibração, devido a periodicidade definida ou anomalia, o robô é parado próximo ao ponto de interesse para realizar uma inspeção individual mais detalhada.
3. Durante essa segunda inspeção, aplicada a um rolo em específico, é necessária a realização do toque do sensor de vibração em alguns pontos da estrutura para analisar de forma mais completa a situação do rolo. Para realizar este contato com segurança, o manipulador robótico posiciona o LIDAR em frente à área de interesse e o punho do manipulador gira o sensor para construir um mapa tridimensional que representa o espaço de trabalho, constituído por uma seção do TC.
4. Para o caso de um sistema teleoperado, o especialista seleciona os pontos a terem sua vibração medida utilizando uma interface que apresenta um mapa tridimensional e a imagem da câmera RGB, enquanto que para o sistema autônomo, seria utilizado uma câmera em conjunto com processamento de imagens e nuvem de pontos para encontrar a localização espacial dos pontos a serem tocados. Uma vez que estes pontos estão selecionados, é realizado o toque do sensor utilizando um algoritmo de planejamento de trajetória com desvio de obstáculos para que não ocorra colisão entre o manipulador e alguma parte do TC ou qualquer outro eventual obstáculo.
5. Por fim, são reunidos as imagens coloridas e os sinais de temperatura, emissão acústica e vibração, e disponibilizados para um sistema central. Um especialista ou um sistema para processamento de dados utilizarão, então, estas informações para diagnosticar a situação do rolo em questão, indicando ações que devem ser tomadas afim de reparar ou substituir a peça danificada. Um sistema de GPS em conjunto com uma IMU será utilizado para localizar o rolo não sadio, e fornecer esta informação para a equipe de manutenção. Neste sentido, Nascimento *et al.* (2017c) propõem uma arquitetura de integração entre um sistema de monitoramento de TCs e sistemas corporativos de gestão de ativos e manutenções.

Em seguida, o braço retorna para a configuração de inspeção contínua ao longo da correia, calculando uma trajetória que evite o contato com qualquer obstáculo, e o movimento

linear da plataforma é retomado.

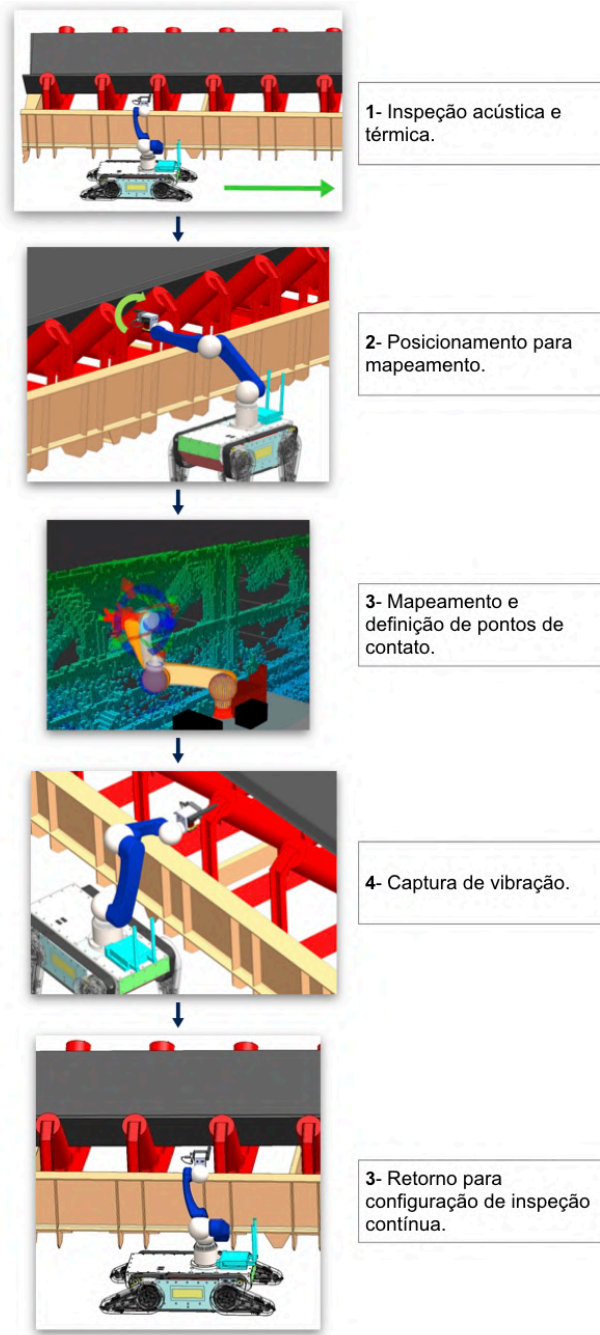


Figura 3.7: Diagrama representando a rotina proposta para inspeção de rolos.

4. Teste de conceito

A concepção deste trabalho faz parte de um projeto inovador no âmbito da indústria de mineração. Até onde o autor conhece, um robô móvel terrestre que seja capaz de se locomover nos diversos ambientes onde se encontram os transportadores de correias nunca foi proposto e testado em campo. Dessa forma, foi necessário realizar testes de conceitos para avaliar a viabilidade técnica deste projeto e conhecer a fundo os desafios que serão encontrados pelo sistema robótico. Nesse sentido, uma vez que já se propôs um conceito de robô, de sensores e de uma rotina de inspeção, o seguinte esforço foi a viabilização de um teste de campo. Este capítulo irá apresentar os equipamentos utilizados para tal prova de conceito, o *software* desenvolvido, os resultados encontrados e as lições aprendidas.

4.1. Equipamentos utilizados

A plataforma móvel utilizada para estes testes foi o robô para a neutralização de artefatos explosivos DIANE, desenvolvido pela Universidade Federal de Rio de Janeiro (FREITAS, 2014). Este robô foi construído com o intuito de realizar missões de até uma hora de duração a baixas velocidades de translação, sendo por vezes necessário manipular objetos de até 10 kg, transpor obstáculos (principalmente escadas) e passar por acessos estreitos.

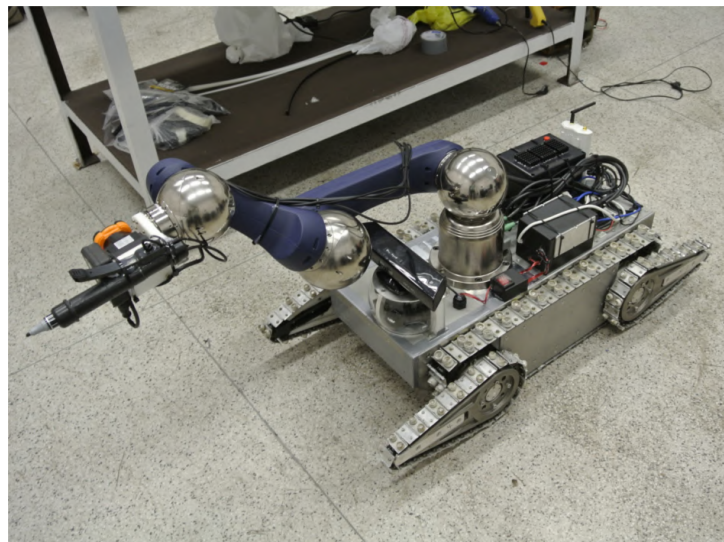


Figura 4.1: Integração entre a plataforma móvel, braço manipulador e sensores.

A plataforma móvel se locomove por meio de esteiras laterais e possui quatro braços atuados também dotados de esteiras ativas. Este modo de locomoção proporciona alta capacidade de transposição de obstáculos à plataforma, afetando negativamente a eficiência energética e a velocidade de translação. Devido a aplicação a qual este robô foi projetado, ele apresenta alta capacidade de carga. Dessa forma, este apresenta um peso maior do que o necessário para realização de inspeções. Esta característica aumenta a estabilidade, porém diminui a eficiência

energética do robô. Esta plataforma apresenta resistência a poeira e respingos de água, o que permitiu sua aplicação durante os testes de campo.

Sobre a plataforma móvel foi acoplado um braço manipulador comercial. O manipulador utilizado foi o Schunk Powerball Arm LWA 4P (SCHUNK, 2017), que pesa 15 kg e apresenta capacidade de elevar cargas de até 7,5 kg. Este manipulador foi escolhido devido a sua praticidade de uso e possibilidade de embarcar na plataforma. O braço possui seis (GDL) proporcionados por seis juntas rotacionais, caracterizando assim um manipulador antropomórfico. Entre as vantagens deste manipulador podem-se destacar a ausência de um módulo externo de potência, já que estes estão integrados às juntas, e a possibilidade de utilizar comunicação CAN para comandá-lo. Um ponto negativo para aplicação deste manipulador é a sua baixa resistência a poeira e água. Durante os testes, foi utilizada uma capa de tecido impermeável para evitar danos ao equipamento.

Para realizar o sensoriamento das grandezas de interesse, foram utilizados os seguintes instrumentos, integrados em um suporte que foi acoplado ao manipulador robótico.

- **Câmera térmica e RGB - FLIR AX8:** Este componente possui pequenas dimensões, fator de proteção IP-67, e câmeras RGB de 640x480 pixels e térmica de 80x60 pixels. Estas características permitem que o equipamento seja adequado para a obtenção de imagens térmicas e coloridas em ambiente industrial.
- **Laser - Hokuyo UTM-30LX:** LIDAR de precisão milimétrica e leitura de 270°. É possível rotacionar o LIDAR afim de obter a leitura tridimensional do entorno do robô.
- **Sensor inercial - Xsens Mti-G-710:** Instalado diretamente na carcaça do robô, este é caracterizado como uma IMU, possuindo diversos sensores inerciais embutidos como acelerômetro, GPS, giroscópio e barômetro. É um equipamento de alta precisão (precisão de 0.2° para roll e pitch, e 1° para yaw), pequenas dimensões e baixo consumo energético. Seu encapsulamento com fator de proteção IP-67 e alta resistência a campos magnéticos o torna adequado para operações em ambiente industrial.
- **Microfone:** Foi utilizado um microfone convencional com faixa de leitura dos 20 Hz aos 20 kHz.
- **Ponteira de toque:** Não estando ainda disponível o equipamento para realizar a leitura da vibração mecânica da estrutura, um equipamento foi concebido afim de simular suas características. O mesmo é baseado em uma base fixada à unidade de instrumentação, ligado a uma ponteira de toque complacente através de uma mola.

A integração dos equipamentos foi feita no laboratório em uma laboratório da Vale do Porto de Tubarão. É possível visualizar na Figura 4.1 a plataforma robótica DIANE com o manipulador Schunk Powerball Arm e a unidade de instrumentação acoplados.

4.2. Implementação e integração

Para a realização dos testes foi necessário realizar a integração entre todos os equipamentos e o desenvolvimento de um *software* para realizar a rotina de inspeção proposta. A plataforma móvel já possuía um sistema de teleoperação funcional, enquanto que para braço e os sensores foi necessário o desenvolvimento de um sistema para integração e comando destes.

O braço deve ser capaz de orientar os sensores de forma a captar as grandezas de forma efetiva, e em outro estágio, deve realizar o contato entre a ponteira de toque e alguns pontos do transportador de correia. Além disso, este deve realizar tais tarefas evitando o contato com o TC ou qualquer outro elemento ao seu redor. A resolução deste problema pode ser resumida na obtenção de um mapa tridimensional por meio do LIDAR e no cálculo da trajetória do braço, evitando colisões com base no mapa criado, para realizar o toque e o posicionamento dos sensores.

O sensor LIDAR Hokuyo é capaz de fornecer diretamente a leitura de distâncias em um plano de 270° no entorno de seu centro. Afim de obter uma nuvem de pontos tridimensional de todo o ambiente, é utilizada a mobilidade do braço para rotacionar o LIDAR e dessa forma realizar um mapeamento espacial por meio da sobreposição de vários planos tomados a medida que o LIDAR era rotacionado. A sobreposição destes pontos, para gerar um mapa tridimensional, é realizado pelo *Octomap*.

O *Octomap* é um *framework* baseado em *octrees* e que usa *probabilistic occupancy estimation* para permitir a criação de modelos tridimensionais volumétricos (HORNUNG *et al.*, 2013). A representação probabilística utilizada pelo *Octomap* é uma forte aliada na construção de mapas tridimensionais criados a partir de medidas de distância (*range measurements*) geradas pelo LIDAR, já que estes dados estão sujeitos a erros de medidas, além da ocorrência de uma série de pontos aleatórios que são criados por reflexões, objetos dinâmicos e poeira. Para fazer um uso adequado do *Octomap* é aplicado um movimento de rotação no Lidar de 180° no sentido horário, em seguida 360° no sentido anti-horário, e novamente 180° horário, voltando a posição inicial. Dessa forma, cada ponto é medido quatro vezes, e as múltiplas incertezas podem ser fundidas em uma robusta estimação da verdadeira geometria do ambiente.

Outro ponto importante do comportamento probabilístico do *Octomap* é a possibilidade de fusão de dados vindos de diferentes sensores, como uma câmera RGB-D e o LIDAR, em um mesmo mapa tridimensional. Por fim, é construído um modelo que não possui apenas informação das áreas ocupadas, mas também dos espaços livres e desconhecidos, permitindo que o algoritmo de planejamento de caminhos tenha conhecimento dos espaços que o braço pode ocupar e dos que ele deve evitar.

Com o mapa tridimensional criado, o operador tem acesso a uma interface onde pode definir os pontos de contato. O próximo passo, então, é calcular o caminho para que o sensor de vibração possa atingir esses pontos de forma precisa e evitando colisões. Este problema pode ser formalizado como a tarefa de encontrar um *caminho* que vá de um *estado inicial* a um *estado*

final, composto de configurações conectadas por caminhos livres de colisões (SUCAN *et al.*, 2012). Esse tipo de formulação para o problema é conhecido como planejamento de caminho por amostragem, já que é baseado em um conjunto de estados possíveis para o robô. Dentre as técnicas propostas na literatura para solucionar esse problema, os planejadores de caminhos baseados em árvores são muito utilizados por rapidamente encontrarem soluções efetivas.

O planejador de caminhos baseado em árvores inicia por enraizar uma árvore no estado inicial do manipulador. O estado, para o caso do manipulador, é constituído pela sua configuração. A partir deste ponto, é gerado um conjunto de pontos pertencentes ao espaço de estados livre de colisões que se ligam ao ponto inicial por ramos, e o processo é então repetido para esse novo conjunto de pontos. O resultado desse processo é uma árvore, que em caso de sucesso, possui um conjunto de ramos, que representam caminhos, que ligam o ponto inicial ao ponto final. Durante este processo, é gerado um novo problema que é o de encontrar os pontos mais pertinentes para a construção da árvore. Já que o número de configurações possíveis é infinito.

Para resolver o problema da construção da árvore, foi utilizado o algoritmo proposto em (LAVALLE e KUFFNER JR, 2001) que é baseado no método *Rapidly-Exploring Random Trees* (RRT) (LAVALLE, 2006). O algoritmo funciona da seguinte forma: é criado um vértice no estado inicial, em seguida, é gerado um ponto aleatório no espaço de estados, esse ponto é conectado ao seu vizinho mais próximo da árvore e é criado um caminho entre eles. Este caminho é avaliado em busca de colisões, caso não existam colisões, o caminho é armazenado. Este processo é executado de forma repetida, e rapidamente é criada uma árvore que explora o espaço de estados livre de colisões. Utilizando esta estratégia, o algoritmo cria duas árvores, uma enraizada no ponto inicial e outra no ponto final, o caminho final é então gerado a partir dos conjuntos de estados que pertencem simultaneamente a essas duas árvores.

A abordagem para planejamento de caminhos com desvio de obstáculos explicada é oferecida dentro do *MoveIt!* (CHITTA *et al.*, 2012). O *MoveIt!* é um pacote para o *Robot Operating System* (ROS) (QUIGLEY *et al.*, 2009) que inclui diversos algoritmos para planejamento de movimento, geração de trajetórias e monitoramento do ambiente, e permite realizar o controle de braços robóticos de maneira facilitada. Dentre as bibliotecas suportadas e oferecidas pelo *MoveIt!*, foi utilizada a *Open Motion Planning Library* (OMPL) (SUCAN *et al.*, 2012). Esta biblioteca oferece uma implementação do RRT e permite a sua integração com o mapa gerado pelo *Octomap*.

Por fim, durante a realização dos testes, a plataforma foi teleoperada com comandos direcionais com um *joystick*, enquanto outro operador controlou o braço utilizando a interface do *MoveIt!*. A Figura 4.2 apresenta uma imagem desta interface com o mapa tridimensional gerado pelo *Octomap* de um trecho de um TC. Nesta interface, o operador utiliza um mouse para posicionar o efetuador na pose desejada.

Para execução dos sistemas explicados, dois computadores são embarcados no conjunto. O primeiro é instalado na carcaça do DIANE, tendo como objetivo fazer o comando dos atua-

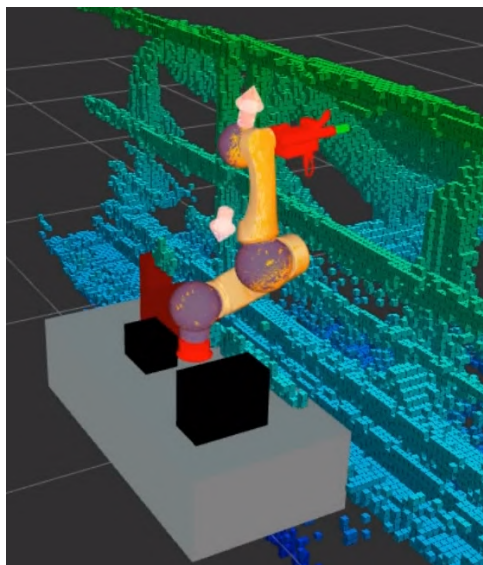


Figura 4.2: Interface utilizada para controlar o manipulador robótico.

dores da plataforma, bem como obter e transmitir para a base as imagens das câmeras utilizadas para a teleoperação. O segundo computador é instalado sobre a plataforma dentro de um *case* de proteção, possuindo a tarefa de obter a leitura dos sensores, realizar o mapeamento e todo o controle do braço manipulador. Ambos estes computadores são dispositivos de dimensões reduzidas e alto poder de processamento, sendo adequados a serem embarcados em dispositivos móveis com fonte limitada de energia.

Outros dois computadores foram utilizados como base de comando da plataforma móvel e do manipulador, sendo necessário dois operadores para comandar o sistema, como pode ser observado na Figura 4.3. A comunicação do robô com a base de comando foi realizada via *wireless* utilizando um rádio Ubiquiti Rocket M900 embarcado na plataforma com duas antenas omnidirecionais. A base de comando recebeu os sinais do robô através das próprias placas de rede *wireless* de seus computadores.



Figura 4.3: Equipe responsável pela teleoperação da plataforma móvel e do manipulador robótico durante testes de campo.

4.3. Testes e resultados

Um dos pontos principais a serem analisados é a mobilidade do robô nos locais onde estão localizados os TCs. Sendo assim, a primeira parte dos testes visou avaliar a capacidade de locomoção e de transposição de obstáculo da plataforma robótica. Para isso, o dispositivo foi colocado em situações onde deveria transpor diversos obstáculos, como escadas, trilhos de trem, trechos lamacentos e terrenos não estruturados. Os testes foram realizados no Porto de Tubarão, em Vitória, Brasil. Esta prova de conceito foi realizada durante quatro dias, em cinco ambientes de TCs diferentes, totalizando aproximadamente oito horas de testes.

O robô conta com braços de alavancas que podem rotacionar e possuem esteiras ativas. Esta composição se mostra muito eficiente para a transposição de obstáculos e para subir e descer escadas. Outra vantagem desta configuração é a disponibilidade de braços nas duas extremidades do robô. Dessa forma, o robô é capaz de transpor obstáculos em ambos os sentidos de direção. Dessa forma, não há necessidade de realizar manobras de giro, o que muitas vezes não é possível devido a pequena largura das passarelas. Os braços de alavanca também se mostraram efetivos para elevar o sistema robótico e inspecionar locais onde não seria possível apenas com o manipulador.

A Figura 4.4 apresenta várias situações as quais o robô foi exposto. Nessas imagens é possível observar o robô transpondo obstáculos, se elevando utilizando os braços de alavanca, subindo um lance de escada e se locomovendo em uma região coberta por pelotas de ferro. A plataforma móvel se mostrou versátil, conseguindo transpor todos os terrenos propostos.

Em alguns dos dias de testes houveram precipitações, criando assim trechos lamacentos. Apesar de conseguir se locomover nestas regiões, foi constatado que houve grande acúmulo de resíduos em peças mecânicas externas e nas esteiras. No longo prazo, esta exposição pode causar avarias na estrutura do dispositivo.

A passarela de passagem do agente de inspeção ao lado dos TC geralmente possui um piso em grade. Após os testes, notou-se que a interação com esta estrutura foi danosa às esteiras, sendo que diversas placas e frisos sofreram deformações ou quebras.

O robô DIANE possui velocidade de translação de 0,3 m/s sobre terreno plano e pavimentado, permitindo que sejam inspecionados continuamente aproximadamente 1 km de TC em uma hora; adicionando os tempos de parada e de locomoção da base até as correias, este tempo aumenta consideravelmente. Esta velocidade desenvolvida é considerada baixa para aplicação visada, já que a inspeção de algumas centenas de metros de TC levaria horas.

A segunda parte dos experimentos teve por intuito realizar a rotina de inspeção proposta no Capítulo 3. Para isso, o robô foi situado em um local onde pudesse se mover linearmente, parar, realizar o toque da ponteira com o eixo do rolo, e retornar para posição de inspeção. A Figura 4.5 traz imagens do robô se locomovendo ao lado do TC, realizando o mapeamento e realizando o toque da ponteira. Cabe destacar que o eixo possui apenas 2 cm de diâmetro, e que a habilidade de tocá-lo é um dos diferenciais do projeto frente a outras soluções móveis como



(a) Robô se movendo em pelotas de ferro.



(b) Plataforma subindo um lance de escada.



(c) Plataforma transpondo trilho de trem.



(d) Braços de alavanca sendo utilizados para elevar o corpo do robô.

Figura 4.4: Plataforma móvel superando distintos desafios de locomoção.

a utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs). É importante salientar que esta ação de toque na estrutura com o TC em funcionamento não poderia ser realizada por um operador humano, devido a sua alta periculosidade; entretanto, esta ação é altamente necessária para se obter informações sobre a situação do rolo que não poderiam ser coletadas com a correia parada. Também foram realizados alguns procedimentos de inspeção na parte interna do TC, para se aproximar do rolo inferior.

A análise dos dados obtidos durante a locomoção do dispositivo se mostrou efetiva, sendo possível ver com clareza a imagem térmica dos pontos de interesse dos rolos. Na Figura 4.6 é apresentada a análise termográfica realizada em uma lateral do transportador, onde podem-se ver dois rolos: o da esquerda em falha, apresentando maior temperatura, e o da direita em condições normais. Analisando o espectro da emissão acústica (Figura 4.7) também é possível notar a diferença entre um rolo em condição normal e um que apresentava falhas, que emite um ruído com maior amplitude. Tal característica é facilmente percebida quando se presencia um rolo em situação de falha, já que este apresenta um ruído notavelmente mais alto.

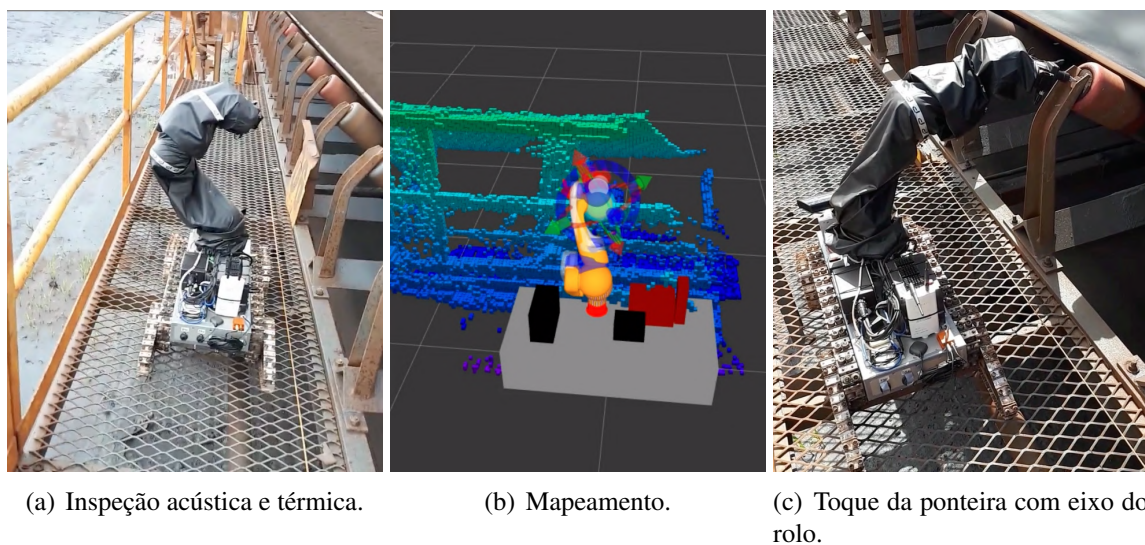


Figura 4.5: Robô realizando rotina de inspeção proposta.

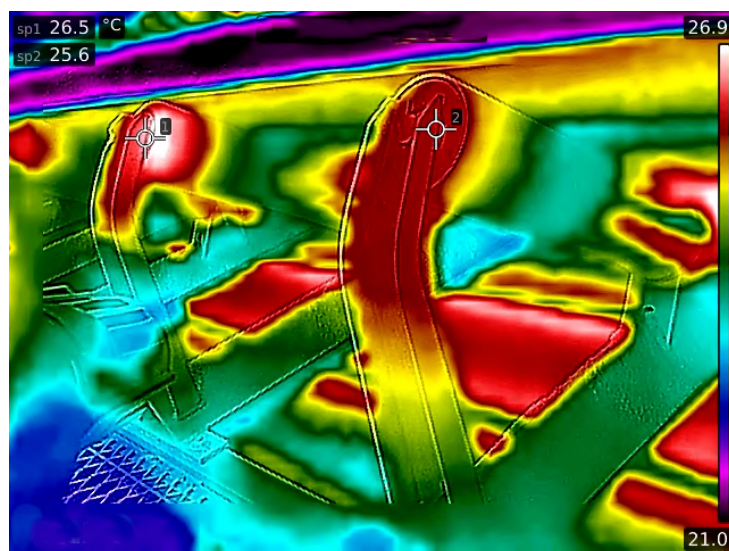


Figura 4.6: Imagem térmica de um trecho de um TC.

4.4. Considerações

Diante dos resultados obtidos nos testes de conceito, é possível afirmar que o dispositivo proposto apresenta boa capacidade para operar nos ambientes que lhe serão destinados. Porém, uma série de melhorias podem ser sugeridas de acordo com estes testes. A plataforma utilizada foi projetada para outro tipo de aplicação: a neutralização de artefatos explosivos. Para este intuito, o robô não deve percorrer grandes distância e sua alta capacidade de carga é essencial. Porém, para a inspeção de TC não é necessário uma capacidade de carga alta, já que em um primeiro momento o único a ser transportado são os sensores, e por outro lado, será necessário que o robô percorra largas distâncias, o que torna necessária uma velocidade mais alta.

Outro ponto que pode ser um limitante para a aplicação de um robô como o utilizado

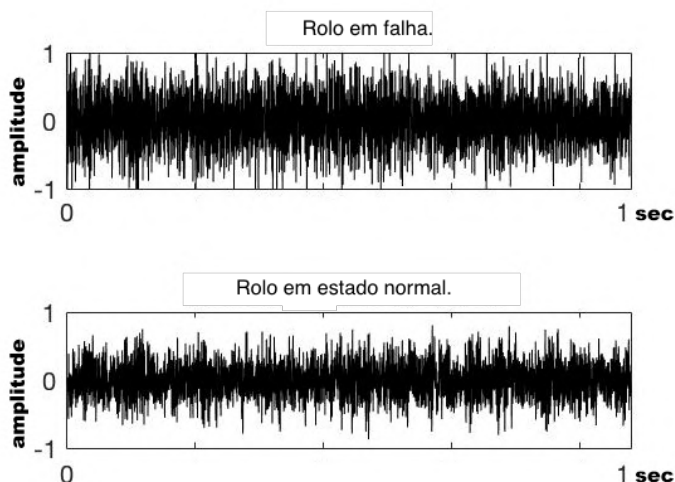


Figura 4.7: Espectro da emissão acústica de um rolo em falha e de um rolo em situação de funcionamento normal.

para os testes é a baixa eficiência energética deste. Como o robô será utilizado por longos períodos, é importante que este apresente boa eficiência energética para diminuir a frequência de recarga de suas baterias. Tanto o baixo consumo energético quanto a baixa velocidade apresentados pelo robô utilizados nos testes estão relacionados a utilização exclusivamente de esteiras para locomoção e de sua massa elevada. Uma possível solução para este problema é a utilização de rodas em conjuntos com as esteiras. Sendo as esteiras utilizadas para transposição de terrenos complexos e as rodas para locomoção em situações mais simples.

O Instituto Tecnológico Vale e a Universidade Federal do Rio de Janeiro estão desenvolvendo uma nova versão do dispositivo robótico que utiliza rodas e esteiras. Neste novo desenho, o robô possui quatro rodas acopladas a braços independentemente acionados com esteiras. A montagem é feita de maneira que as esteiras apenas tocam o solo quando os braços estão abaixados; caso contrário, as rodas se tornam o mecanismo de locomoção principal.

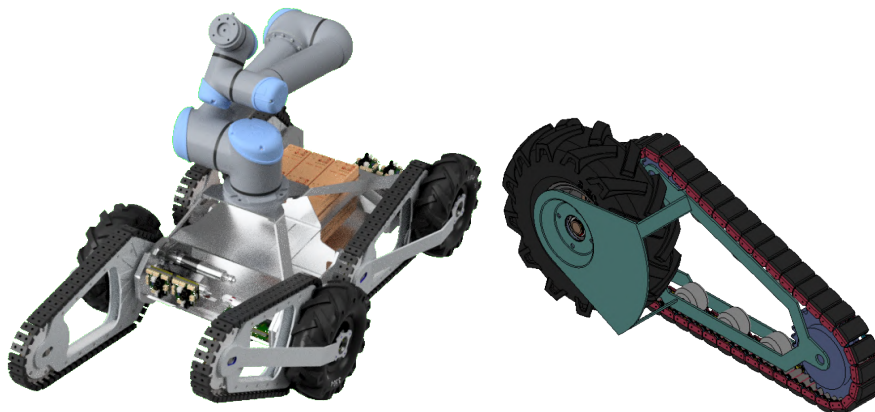


Figura 4.8: (a) Conceito da nova plataforma robótica. (b) Conjunto de locomoção com esteira e roda.

Durante os testes foi possível analisar a capacidade de amostragem dos sinais em diferentes situações. As imagens das câmeras térmicas se mostraram capazes de avaliar a temperatura dos rolos com bastante eficácia. A captação da emissão acústica com o microfone também se mostrou viável. Devido a indisponibilidade, não foi utilizado um sensor para medir a vibração, dessa forma, não foi possível avaliar este quesito, apesar de que foi possível avaliar a capacidade de tocar a estrutura.

O manipulador utilizado se mostrou capaz de orientar e posicionar os sensores como esperado, permitindo uma boa aquisição de dados. Apesar disso, o manipulador possui uma capacidade de carga muito acima do necessário (7,5 kg), enquanto que o arranjo de sensores não ultrapassa 1 kg. Isso faz com que o manipulador seja mais pesado do que o necessário. Também, o manipulador se mostrou curto para a inspeção de alguns pontos de sessões de TC com maior elevação, e não apresenta a resistência necessária para utilização sob chuva e poeira. Assim sendo, esforços devem ser realizados no desenvolvimento de um braço robótico mais leve, maior e mais robusto para operação no ambiente da mineração.

Em relação ao sistema de comando, foram enfrentadas dificuldades em relação a operação do manipulador. A trajetória gerada pelo algoritmo RRT não garante um caminho em linha reta entre o ponto inicial e ponto de toque, gerando movimentos inesperados do efetuador durante a medição de vibração. Além disso, eram necessários dois operadores, um para a plataforma móvel e outro para o manipulador. Essa metodologia de controle dificulta a sincronização entre os movimentos. Muitas vezes a plataforma móvel era parada para que o efetuador fosse reorientado, gerando atrasos na inspeção. Para resolver este problema, é proposta uma nova metodologia para comando do dispositivo. A utilização de uma estratégia de controle de corpo completo faz com o movimento entre a plataforma móvel e o manipulador ocorra de forma integrada, permitindo que os sensores se encontrem sempre em uma configuração adequada para captação dos sinais enquanto a plataforma móvel se locomove ao lado do TC.

5. Modelagem e controle cinemático

O dispositivo robótico proposto é composto por uma base móvel serialmente acoplada a um manipulador, conjunto este que é conhecido como um manipulador móvel. Ele deve realizar uma missão como se segue: mover ao longo do TC com o efetuador em uma orientação fixa, parar, tocar uma parte específica da estrutura, retornar a posição de monitoramento anterior e voltar a se mover.

A base móvel é um veículo tracionado por esteiras com arquitetura *skid-steer*. Para simplificar o controle, a plataforma foi modelada como um robô móvel de tração diferencial, ignorando os efeitos de escorregamento e os braços de alavanca. Dessa forma, é possível representar a plataforma móvel como duas juntas prismáticas, que representam o deslocamento nos eixos x e y , e uma junta de rotação que caracteriza a guinada. O manipulador é composto por seis juntas de rotação. Na Figura 5.1 é apresentado o esquemático do manipulador móvel simplificado.

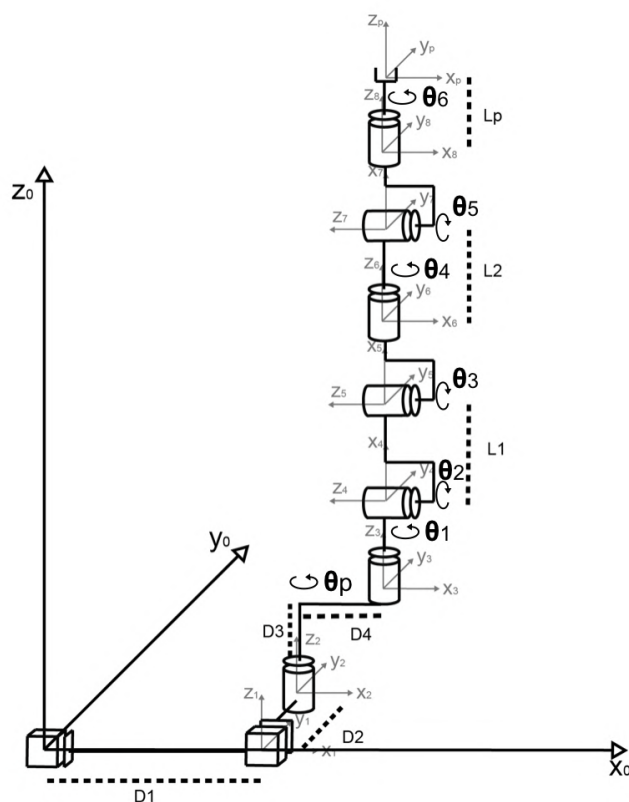


Figura 5.1: Esquemático do manipulador móvel simplificado.

5.1. Cinemática direta

A cinemática direta fornece um mapeamento entre a configuração das juntas e a pose do efetuador $x = (p_{0p}, R_{0p})$, onde $p_{0p} \in \mathbb{R}^3$ dá a posição e $R_{0p} \in SO(3)$ é a matriz de rotação que

representa a orientação do sistema de coordenadas do efetuador O_p com respeito ao sistema de coordenadas inercial O_0 .

O sistema robótico simplificado (Figura 5.1) possui nove graus de liberdade considerando o corpo completo da plataforma. A posição do efetuador é obtida pela Equação (5.1):

$$\vec{p}_{0p} = \overbrace{(\vec{p}_{01})_0 + (\vec{p}_{12})_0 + (\vec{p}_{23})_0}^{\text{Plataforma móvel}} + \overbrace{(\vec{p}_{34})_0 + \dots + (\vec{p}_{8p})_0}^{\text{Manipulador}} \quad (5.1)$$

Da Equação (5.1), a posição \vec{p}_{0p} é dada por:

$$\vec{p}_{0p} = D_1x + D_2y + D_3z + D_4x + R_{04}L_1x + R_{06}L_2z + R_{08}L_pz, \quad (5.2)$$

onde $\vec{x} = [1, 0, 0]^T$, $\vec{y} = [0, 1, 0]^T$, $\vec{z} = [0, 0, 1]^T$ e $R_{0p} = R_{01}R_{12}\dots R_{78}R_{8p}$; a mesma representação é válida para obter R_{04} , R_{06} e R_{08} na Equação (5.2).

5.2. Cinemática diferencial

A cinemática diferencial relaciona as velocidades linear e angular das juntas às velocidades do efetuador, por meio do mapeamento:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} = J(\theta)\dot{\theta}, \quad (5.3)$$

onde $J(\theta)$ é a matriz Jacobiana geométrica, $\dot{p} \in \mathbb{R}^3$ corresponde a velocidade linear e $\omega \in \mathbb{R}^3$ à velocidade angular do efetuador em relação as velocidades das juntas $\dot{\theta}$.

A matriz Jacobiana $J(\theta) \in \mathbb{R}^{6 \times 9}$ que representa o manipulador móvel simplificado é definida como:

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \vec{x}_0 & (\vec{y}_1)_0 & (\vec{z}_2)_0 \times (\vec{p}_{2p})_0 & (\vec{z}_3)_0 \times (\vec{p}_{3p})_0 & \dots & (\vec{z}_8)_0 \times (\vec{p}_{8p})_0 \\ 0 & 0 & (\vec{z}_2)_0 & (\vec{z}_3)_0 & \dots & (\vec{z}_8)_0 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

onde $\dot{\theta}$ representa as velocidades das coordenadas do sistema simplificado:

$$\dot{\theta} = [\dot{d}_1, \dot{d}_2, \dot{\theta}_p, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6]^T. \quad (5.5)$$

O sistema real, na verdade, possui oito graus de atuação, composto pelos dois conjuntos de rodas e pelas seis juntas de rotação do braço, o que leva a

$$\dot{\theta}_a = [\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6]^T, \quad (5.6)$$

onde $\dot{\theta}_a$ são as velocidades das juntas do sistema atuado, composto por $\dot{\theta}_r$ e $\dot{\theta}_l$ que representam a velocidade de rotação das esteiras direita e esquerda, e $\dot{\theta}_{1..6}$ são as velocidades das juntas do braço. Para realizar o remapeamento entre $[\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l]$ e $[\dot{d}_1, \dot{d}_2, \dot{\theta}_p]$ é utilizada uma estratégia de

linearização de entrada/saída por *feedback*.

5.3. Controle da plataforma móvel

A plataforma móvel do sistema é modelada como um robô móvel de tração diferencial, e tem sua pose definida por

$$q_r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \phi_r \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

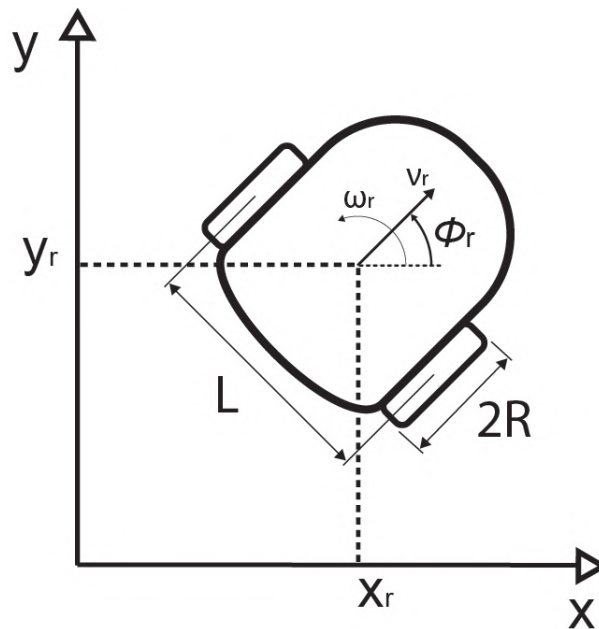


Figura 5.2: Representativo do modelo de um robô móvel de tração diferencial.

Considerando o robô se movendo a uma velocidade linear v_r e angular ω_r , como representado na Figura 5.2, é possível relacionar estas à derivada temporal de sua pose q_r , como

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\phi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_r) & 0 \\ \sin(\phi_r) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix}. \quad (5.8)$$

Desenvolvendo a igualdade apresentada pela Equação (5.8) é possível encontrar a seguinte relação, que estabelece a restrição de não holonomia da plataforma móvel

$$\dot{x}_r \sin(\phi_r) - \dot{y}_r \cos(\phi_r) = 0. \quad (5.9)$$

Para representar um caso de restrição não holonômica, onde a plataforma móvel não é capaz de realizar um movimento em específico, considere o robô em uma posição qualquer com

orientação $\phi_r = \pi/2$, como indicado na Figura 5.3. Agora, suponha que o robô deve fazer um movimento linear na direção X , ou seja, se mover para direita. Intuitivamente é possível notar que ele não é capaz de realizar tão movimento. O que se confirma quando é aplicado $\phi_r = \pi/2$ na Equação (5.9), tal qual

$$\dot{x}_r \text{sen}(\pi/2) - \dot{y}_r \text{cos}(\pi/2) = 0 \rightarrow \dot{x}_r = 0. \quad (5.10)$$

Como pode ser visto, na pose atual do robô, ele não é capaz de se mover em X . Uma solução intuitiva para realizar o movimento e lidar com a restrição seria aplicar um movimento de rotação em conjunto com um movimento linear no sentido de X . Seguindo esse raciocínio, Siciliano *et al.* (2008) propõem uma mudança de coordenada: utilizar como referência um ponto b , como indicado na Figura 5.3, localizado ao longo do eixo sagital do robô, a uma distância B do seu centro de rotação. Dessa forma, pode-se definir as coordenadas deste ponto como

$$\begin{aligned} x_b &= x_r + B \text{cos}(\phi) \\ y_b &= y_r + B \text{sen}(\phi), \end{aligned} \quad (5.11)$$

que tem como derivada temporal

$$\begin{aligned} \dot{x}_b &= \dot{x}_r - B \text{sen}(\phi) \dot{\phi} \\ \dot{y}_b &= \dot{y}_r + B \text{cos}(\phi) \dot{\phi}, \end{aligned} \quad (5.12)$$

em formato matricial,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & -B \text{sen}(\phi) \\ 0 & 1 & B \text{cos}(\phi) \end{bmatrix}}_{M_1} \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Considerando esta nova coordenada b que está relacionada a pose do robô por (5.12) e a relação definida em (5.8), é possível estabelecer uma matriz que relaciona as velocidades de b com as velocidades linear e angular do robô como,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -B \text{sen}(\phi) \\ 0 & 1 & B \text{cos}(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{cos}(\phi_r) & 0 \\ \text{sen}(\phi_r) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix}, \quad (5.14)$$

que resulta em,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \text{cos}(\phi) & -B \text{sen}(\phi) \\ \text{sen}(\phi) & B \text{cos}(\phi) \end{bmatrix}}_{M_2} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

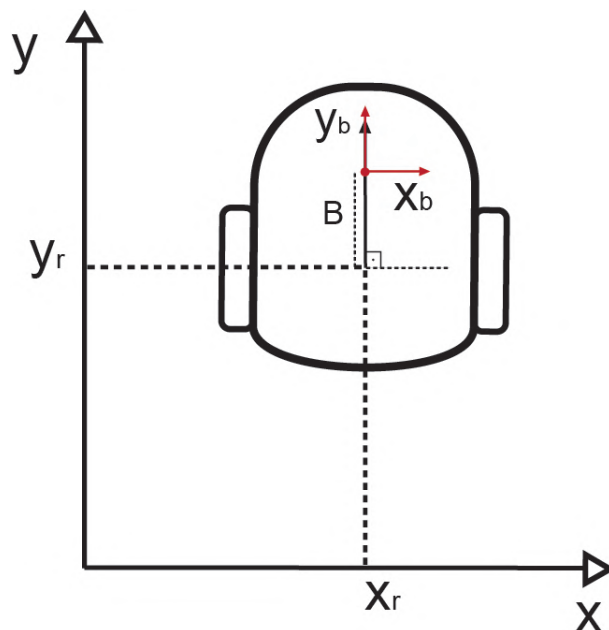


Figura 5.3: Representativo das coordenadas de um ponto b localizado no eixo sagital do robô.

A matriz M_2 estabelece a relação entre a velocidade do ponto b e a velocidade linear e angular do centro de rotação do robô. Baseado nessa relação é possível estabelecer que o ponto b não possui restrições não holonômicas. Esta matriz M_2 possui determinante B , e é então invertível, partindo de que $B \neq 0$. Dessa forma, pode-se aplicar a seguinte transformação de entrada

$$\begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} = M_2^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ -\sin(\phi)/B & \cos(\phi)/B \end{bmatrix}}_{M_3} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix}. \quad (5.16)$$

É importante notar que neste ponto é perdida a controlabilidade da orientação da plataforma móvel, sendo que esta se torna um grau passivo. Tal comportamento é esperado, já que existem apenas dois graus de liberdade atuados e três a serem controlados.

Voltando na matriz definida em (5.13) e substituindo em (5.16) é possível estabelecer uma relação entre a derivada da pose do robô e suas velocidades angular (ω_r) e linear (v_r), como

$$\begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} = M_3 M_1 \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}. \quad (5.17)$$

Por fim, é necessário relacionar as velocidades linear e angular do robô às velocidades de giro das rodas, já que são estas as grandezas diretamente controláveis. A seguinte matriz estabelece esta relação:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1/R_r & L_r/R_r \\ 1/R_r & -L_r/R_r \end{bmatrix}}_{M_4} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix}, \quad (5.18)$$

onde $\dot{\theta}_r$ e $\dot{\theta}_l$ representam as velocidades de giro do conjunto de rodas direito e esquerdo respectivamente, R_r indica o raio das rodas e L_r é a distância entre os pontos de contato entre os conjuntos das rodas direita e esquerda e o solo. Na Figura 5.2 estão indicadas estas dimensões. Voltando em (5.17), é possível estabelecer a relação entre $[\dot{x}_r, \dot{y}_r, \dot{\phi}]$ e $[\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l]$, estando sua necessidade apresentada na Seção 5.2, tal qual

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = M_4 M_3 M_1 \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}. \quad (5.19)$$

Esta estratégia de mudança de coordenada como referência para o controlador é apresentada por Siciliano *et al.* (2008) e é chamada de linearização entrada/saída por *feedback*. No livro está desenvolvida a estratégia de controle para o caso de um robô móvel do tipo monociclo, sendo estendida para o robô de arquitetura diferencial e aplicada ao caso do manipulador móvel por Silva e Adorno (2018) com o uso de quatérnios duais.

5.4. Controle cinemático do manipulador móvel

Para realizar uma inspeção efetiva é necessário que os sensores se movam em um caminho definido a uma velocidade determinada. Dessa forma, é necessária uma estratégia de controle para atuar nas juntas do manipulador e da plataforma móvel de forma a conduzir a estrutura mecânica de uma pose inicial x_e para uma pose desejada variante no tempo $x_d(t)$. Este problema é conhecido como *seguimento de trajetória* ou *rastreamento*. O objetivo de controle é definido, então, por

$$x_e \rightarrow x_d(t), \quad e = x_d(t) - x_e \rightarrow 0, \quad (5.20)$$

onde e é o erro da pose do efetuador durante o seguimento da trajetória. Devido a utilização de uma representação independente entre a orientação e a posição, o erro da pose é calculado de forma separada.

5.4.1. Erro de posição

O erro de posição e_P indica a distância em coordenadas cartesianas entre a posição atual e a posição desejada, e é calculado como

$$e_P = p_d(t) - p_e(\theta) \in \mathcal{R}^3, \quad (5.21)$$

onde $p_d(t)$ é a posição desejada no momento t e $p_e(\theta)$ é a posição do efetuador para a configuração atual θ .

5.4.2. Erro de orientação

O cálculo do erro de orientação não é tão natural quanto o erro de posição, e depende particularmente da representação utilizada, podendo ser esta, por exemplo, ângulos de Euler ou quatérnios unitários. De acordo com [Siciliano et al. \(2008\)](#), o cálculo do erro de orientação em quatérnios unitários é computacionalmente mais eficiente do que em ângulos de Euler. Dessa forma, foi utilizada a representação em quatérnios unitários. Sejam, então, $\mathcal{Q}_d = \{\eta_d, \varepsilon_d\}$ e $\mathcal{Q}_e = \{\eta_e, \varepsilon_e\}$ os quatérnios que representam, respectivamente, a rotação desejada R_d e a atual R_e . O erro de orientação pode ser descrito pela matriz de rotação $R_d R_e^T$, tal qual desenvolvido em [\(SICILIANO et al., 2008\)](#), que pode ser expressa em quatérnios como $\Delta\mathcal{Q} = \{\Delta\eta_d, \Delta\varepsilon_d\}$, onde

$$\Delta\mathcal{Q} = \Delta\mathcal{Q}_d * \Delta\mathcal{Q}_e^{-1}. \quad (5.22)$$

O operador “*” representa produto entre quatérnios e é calculado como $\mathcal{Q}_1 * \mathcal{Q}_2 = \{\eta_1 \eta_2 - \varepsilon_1^T \varepsilon_2, \eta_1 \varepsilon_2 + \eta_2 \varepsilon_1 + \varepsilon_1 \times \varepsilon_2\}$.

Considerando que $\Delta\mathcal{Q} = \{1, 0\}$ se e somente se R_d e R_e estão alinhados, por meio de manipulação algébrica da Equação [\(5.22\)](#) pode-se definir o erro de orientação como

$$e_O = \eta_d \varepsilon = \eta(\theta) \varepsilon_d - \eta_d \varepsilon(\theta) - S(\varepsilon_d) \varepsilon(\theta), \quad (5.23)$$

onde Δ_d e ε_d representam, respectivamente, a parte escalar e vetorial da orientação desejada, e S é o operador anti-simétrico. O operador anti-simétrico para um vetor $V = [V_1, V_2, V_3]$ corresponde a $S(V) =$

$$S(V) = \begin{bmatrix} 0 & -V_3 & V_2 \\ V_3 & 0 & -V_1 \\ -V_2 & V_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

5.4.3. Lei de controle

Estando então bem definidos os erros de posição e orientação, a derivada temporal do erro [\(5.20\)](#) é definida como

$$\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}_e, \quad (5.24)$$

que, em conjunto com a equação da cinemática diferencial (5.3), pode ser reescrita como:

$$\dot{e} = \dot{x}_d - J(\theta)\dot{\theta} \in \mathcal{R}^6. \quad (5.25)$$

É considerado que o robô é comandado por meio da velocidade das juntas. Para isso, é assumida a hipótese de que as juntas do robô são capazes de responder a qualquer velocidade imposta a elas e dessa forma o sistema é representado como um integrador simples, que tem como entrada a velocidade das juntas e a saída é a posição destas. Esta hipótese se apresenta plausível partindo da premissa que as juntas do dispositivo possuem controladores de baixo nível nos seus motores que garantem uma resposta imediata e correta à velocidade requerida. Este tipo de controle é conhecido como controle cinemático e é aceitável para aplicação no sistema em questão devido as baixas velocidades que serão aplicadas as juntas, que em conjunto com os controladores de baixo nível e com as reduções de alto ganho, apresentam boa resposta aos comandos de velocidade. Caso seja necessária a utilização de velocidades maiores ou para aumentar a robustez do controlador, o controle dinâmico pode ser utilizado.

Considerando a equação da derivada do erro definida por (5.25), e sendo a ação de controle u aplicada a velocidade das juntas $\dot{\theta}$, pode-se estabelecer a seguinte relação como uma lei de controle baseada em uma ação proporcional com *feed-forward*,

$$\dot{\theta} = u = F(J(\theta))(\dot{x}_d + Ke), \quad (5.26)$$

onde K é uma matriz de ganho positiva definida.

Devido a redundância existente na cadeia cinemática do robô, a matriz Jacobiana que relaciona a velocidade da sua pose às velocidade das suas juntas se apresenta em uma forma não quadrada (5.4). Sendo assim, não é possível realizar a inversão desta matriz, dessa forma, $F(J(\theta))$ representa a função que calcula a velocidade das juntas em relação à velocidade da pose. Um método viável para encontrar a função $F(J(\theta))$, para calcular quais as velocidades a serem aplicadas nas juntas de forma que o robô siga a trajetória definida, é a sua formulação como um problema de otimização linear com restrições.

Uma formulação interessante para este problema de otimização é utilizar a redundância do sistema para reduzir a velocidade das juntas, por meio da minimização de uma função relacionada ao custo quadrático da velocidade de cada uma das juntas, definida como

$$g(\dot{\theta}) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T W \dot{\theta}, \quad (5.27)$$

onde W é uma matriz de pesos relacionada ao custo da velocidade das juntas.

Siciliano *et al.* (2008) apresentam o desenvolvimento do problema de otimização utilizando *método dos Multiplicadores de Lagrange* e as devidas manipulações algébricas, que levam à solução ótima

$$\dot{\theta} = W^{-1}J^T(JW^{-1}J^T)^{-1}\dot{x}_e. \quad (5.28)$$

No caso especial onde se considera que todas as juntas apresentam o mesmo gasto por velocidade funcional e dessa forma a matriz W é uma matriz identidade I , a solução (5.28) pode ser simplificada para

$$\dot{\theta} = J^\dagger \dot{x}_e, \quad (5.29)$$

onde J^\dagger é a pseudo-inversa à direita da matriz J

$$J^\dagger = J^T(JJ^T)^{-1}. \quad (5.30)$$

Dessa forma, pode-se reescrever a lei de controle definida em (5.26) substituindo a função $F(J(\theta))$ por J^\dagger , tal qual

$$\dot{\theta} = u = J^\dagger(\dot{x}_d + Ke), \quad (5.31)$$

5.4.4. Estabilidade do sistema

A lei de controle (5.26) está definida para o erro da pose, porém, como já apontado, o erro é calculado independentemente para a orientação e posição. Dessa forma, têm-se que

$$\dot{\theta} = u = J^\dagger \begin{bmatrix} \dot{p}_d + K_{pe}p \\ \omega_d + K_{oe}o \end{bmatrix}, \quad (5.32)$$

Onde \dot{p}_d e ω_d representam, respectivamente, as velocidades linear e angular.

Estudo da estabilidade do erro de posição

A dinâmica do erro da posição em malha fechada é então governada pelo sistema

$$\dot{p}_d - \dot{p}_e + K_{pe}p = 0. \quad (5.33)$$

E considerando a derivada temporal de (5.21) como

$$\dot{e}_p = \dot{p}_d - \dot{p}_e, \quad (5.34)$$

têm-se que esta dinâmica é descrita por

$$\dot{e}_p + K_{pe}p = 0. \quad (5.35)$$

A solução desta equação é dada por

$$e_P(t) = e^{-K_P t} e_P(0), \quad (5.36)$$

sendo K_P uma matriz de ganho positiva definida, tem-se

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_P(t) = 0. \quad (5.37)$$

Ou seja que o erro de posição e_P tende assintoticamente para 0.

Estudo da estabilidade do erro de orientação

Assim como o erro de posição, a dinâmica do erro de orientação em malha fechada é governada pelo sistema:

$$\omega_d - \omega_e + K_{Oe} e_O = 0. \quad (5.38)$$

Porém, a equação do erro de orientação é não linear em relação a e_O , já que esta leva em conta a velocidade angular do efetuador e não a derivada temporal do erro de orientação, não permitindo, assim, a manipulação realizada para o erro de posição. Para definir a estabilidade desse sistema é interessante estabelecer uma relação entre a derivada no tempo da orientação em quatérnions \mathcal{Q}_d e a velocidade angular ω_d . Seguindo [Siciliano et al. \(2008\)](#), esta relação é definida como:

$$\dot{\eta}_e = -\frac{1}{2} \varepsilon_e^T \omega_e \quad (5.39)$$

$$\dot{\varepsilon}_e = \frac{1}{2} (\eta_e I_3 - S(\varepsilon_e)) \omega_e, \quad (5.40)$$

esta definição se mantém verdadeira na relação entre \mathcal{Q}_d e ω_d .

Para estudar a estabilidade do sistema [\(5.38\)](#) é usada como candidata a seguinte função positiva definida de Lyapunov:

$$V = (\eta_d - \eta_e)^2 + (\varepsilon_d - \varepsilon_e)^T (\varepsilon_d - \varepsilon_e), \quad (5.41)$$

que ao derivar-se no tempo tomando em vista [\(5.39\)](#) e [\(5.40\)](#), leva a:

$$\dot{V} = -e_O^T K_{Oe} e_O, \quad (5.42)$$

que é definida negativa. Considerando o *Segundo Método de Lyapunov*, ou *Método Direto*, pode-se afirmar que e_O converge para zero, provando, assim, a estabilidade assintótica do sistema.

5.4.5. Controle de corpo completo

A lei de controle que irá atuar nas velocidades das juntas do braço robótico e na velocidade das rodas da plataforma móvel está definida em (5.31). Porém, esta lei de controle considera a atuação nas coordenadas definidas por θ (5.5), enquanto que as variáveis controláveis são as velocidades das juntas definidas por θ_a . Então, para esta lei de controle ser factível é necessário aplicar simultaneamente o remapeamento entre θ e θ_a definido por (5.19). Dessa forma, redefine-se a lei de controle de corpo completo, para as juntas atuadas, como

$$u_a = MJ^\dagger(\dot{x}_d + Ke), \quad (5.43)$$

sendo M a matriz de remapeamento definida pela estratégia de controle por linearização entrada/saída por *feedback*, e estendida para as juntas do braço robótica com a matriz identidade I_6 , tal qual

$$M = \begin{bmatrix} M_4 M_3 M_1 & 0 \\ 0 & I_6 \end{bmatrix}_{8 \times 9}. \quad (5.44)$$

5.4.6. Singularidades cinemáticas

A solução para o sistema definido em (5.30) e para os demais sistemas que dependem da inversão da matriz Jacobiana podem ser computadas apenas quando a matriz Jacobiana apresenta posto-linha completo. Dessa forma, essas soluções não podem ser calculadas nas vizinhanças das singularidades cinemáticas do dispositivo robótico.

Uma abordagem para contornar o cálculo das velocidades das juntas nas singularidades é a utilização da pseudoinversa amortecida (sigla em inglês, DLS, do termo *Damped Least-Squares*), proposta em (NAKAMURA e HANAFUSA, 1986). A DLS é definida como

$$DLS(J) = J^T (JJ^T + \lambda I)^{-1}, \quad (5.45)$$

onde λ é um fator de amortecimento que leva a conversão melhor condicionada de um ponto de vista numérico. λ é calculado como

$$\lambda = \begin{cases} 0, & \tau \geq \tau_0 \\ \lambda_0 \left(1 - \frac{\tau}{\tau_0}\right)^2, & \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (5.46)$$

onde $\tau = \sqrt{\det J(\theta) J^T(\theta)}$ é a manipulabilidade do sistema robótico. λ_0 define a constante de amortecimento. τ_0 define os limites desta vizinhança. Note que o fator de amortecimento aplicado pelo DLS resulta em um erro de cálculo na pseudo-inversa da matriz Jacobiana, o que pode acarretar em um desvio da trajetória. A magnitude de tal desvio será proporcional a constante de amortecimento. Dessa forma, é importante definir os parâmetros do DLS de forma

a evitar desvios maiores do que a precisão necessária para execução das tarefas.

Utilizando a inversa amortecida, pode-se definir a lei de controle $u = \dot{\theta}_a$ como

$$u_a = MDLS(J(\theta))(\dot{x}_d + Ke). \quad (5.47)$$

5.4.7. Diagrama de blocos

Por fim, pode-se construir o diagrama de blocos ilustrado na Figura 5.4 que representa o Algoritmo de controle definido pela Equação (5.47). As entradas do Diagrama são a pose desejada para o efetuador e a sua derivada temporal. O erro é calculado como nas Equações (5.21) e (5.21), em seguida lhe é aplicado um ganho e somado à derivada supracitada, o que configura a ação *feedforward* do controlador. No seguinte bloco, o DLS utiliza as informações da configuração atual das juntas e da pose da plataforma móvel para calcular as velocidades que logo serão remapeadas pela matriz M (5.44) e então aplicadas no robô. O bloco da cinemática direta calcula a pose do efetuador de acordo com as informações da pose da plataforma e das juntas do manipulador para cálculo do erro, fechando, assim, a malha de controle.

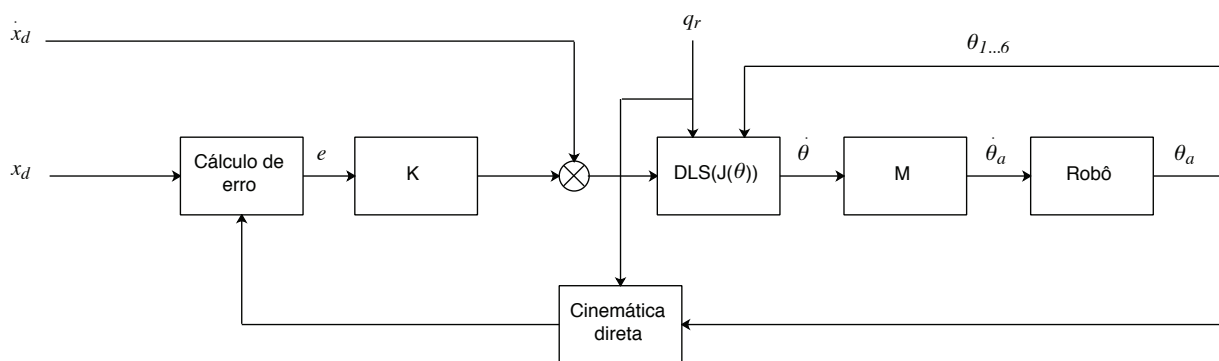


Figura 5.4: Diagrama de blocos para a estratégia de controle proposta.

5.5. Simulação do controle de corpo completo

A estratégia de controle proposta é validada por meio de simulações computacionais. As simulações computacionais são muito utilizadas para testes e análises de sistemas robóticos devido a facilidade de implementação e baixo custo, quando comparado a construção física do mesmo. Para esta dissertação, a escolha da utilização de simulação para validar a estratégia de controle se deu pelo fato de um protótipo do robô ainda não estar disponível. Dessa forma, se decidiu por utilizar a simulação de uma plataforma comercial cinematicamente semelhante ao robô proposto para realizar os testes.

A plataforma escolhida para as simulações é o *Seekur Jr.* da *Mobile Robots* embarcado com um braço robótico de 6 GDL da *Schunk*. O *Seekur Jr.* possui quatro rodas e apresenta uma

arquitetura *skid-steer*. A Figura 5.5 apresenta a *Seekur Jr.* com o braço robótico.

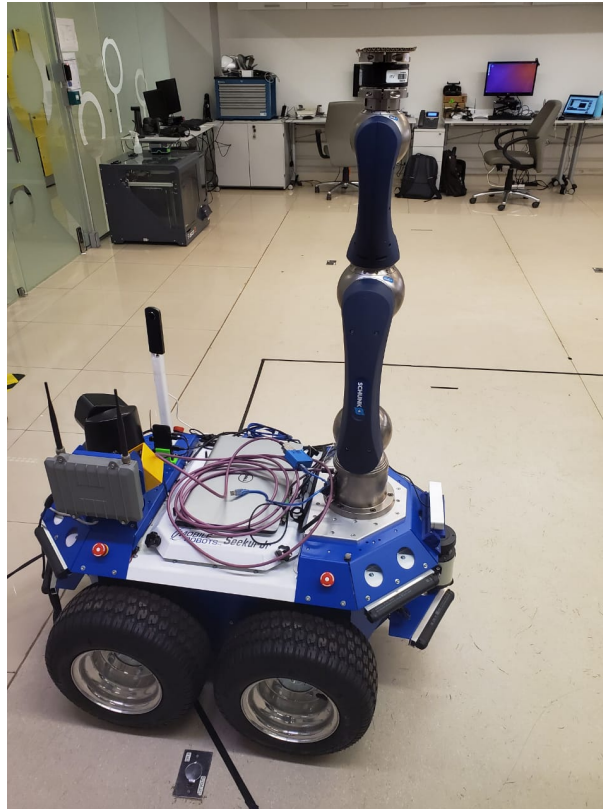


Figura 5.5: Manipulador móvel utilizado para simulações.

O simulador utilizado para realização dos testes foi o *Virtual Robot Experimentation Platform* (V-REP) (ROHMER *et al.*, 2013), sendo utilizado o *Bullet 2.78* como motor de dinâmica. Este simulador apresenta a vantagem de poder ser facilmente integrado com diferentes plataformas, como ROS e MatLab, o que aumenta sua versatilidade. Além disso, ele simula com fidelidade a cinemática e a dinâmica dos corpos, que podem ser construídos por meio de uma interface do tipo ‘arrasta e solta’, o que acelera o processo de desenvolvimento do ambiente simulado. Outro motivo para a adoção deste simulador é o fato da Coppelia Robotics, proprietária do V-REP, oferecer uma versão educacional gratuita. O modelo do robô foi construído a partir de arquivos de modelagem tridimensional disponibilizados pelos fabricantes dos referidos equipamentos. Para simular o transportador de correia foi utilizado o modelo tridimensional de um destes equipamentos presente no porto Tubarão em Vitória, ES, controlado pela mineradora Vale.

O algoritmo de controle foi implementado no *Robot Operating System* (ROS) (QUIGLEY *et al.*, 2009). O ROS é um meta-sistema operacional *open-source* (o meta vem pelo fato do ROS funcionar em outro sistema operacional) que apresenta boa modularidade, possibilidade de programação em Python ou C++, grande disponibilidade de algoritmos prontos e uma comunidade ativa. O ROS foi utilizado por ele permitir integração com o V-REP e o código criado para testes no simulador podem ser reutilizados para aplicação no robô real.

Foi desenvolvido o algoritmo de controle no ROS de forma que este receba as informações do V-REP referente as configurações de cada uma das juntas do manipulador robótica, a pose da plataforma móvel e ao tempo de simulação. No caso do robô real, a informação referente a configuração das juntas poderia facilmente ser obtida a partir do *driver* do manipulador, enquanto que a pose da plataforma móvel se apresenta como um problema mais complicado. Uma possível solução é a utilização de técnicas para localização de robôs móveis, como localização de *Markov* (FOX *et al.*, 1999), filtro de *Kalman* (ROUMELIOTIS e BEKEY, 2000) ou localização de *Monte Carlo* (THRUN *et al.*, 2001), em conjunto com os mapas existentes das estruturas dos TCs. Outra solução seria a aplicação de técnicas de *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), que não dependeriam de mapas previamente conhecidos dos locais onde os robôs seriam aplicados. Uma vez com os dados fornecidos pelo V-REP, o algoritmo no ROS é responsável por calcular as velocidades a serem aplicados nas juntas de acordo com a estratégia previamente explicada.

Buscando validar a estratégia de controle para diferentes cenários, foram realizadas simulações para seguimento de três trajetórias distintas que são descritas como se segue.

5.5.1. Trajetória sinusoidal

O primeiro caso a ser testado foi o seguimento de uma trajetória sinusoidal. Apesar de ser uma trajetória que dificilmente seria realizada pelo robô durante uma inspeção, este caso permite analisar a capacidade da plataforma móvel e da estratégia de controle de serem realizadas curvas em diferentes sentidos.

A Figura 5.6 apresenta uma série de imagens sobrepostas do manipulador realizando o rastreamento da trajetória sinusoidal. A linha verde representa o caminho percorrido pelo efetuador enquanto que a linha vermelha representa a trajetória de referência. Pela figura é possível perceber que o robô é capaz de realizar o seguimento da trajetória de forma efetiva. No início da trajetória (parte esquerda da imagem) existe um desvio da referência, isso se deve ao período de regulação onde o efetuador se encontra distante da pose desejada.

A Figura 5.7 apresenta o caminho percorrido no plano XY para outro ensaio de seguimento de uma trajetória sinusoidal. Novamente é percebido o momento de regulação no início da trajetória que acarreta em um desvio à referência, na parte esquerda da imagem. Em seguida a trajetória percorrida mantém uma boa proximidade da referência. Nos momentos das curvas, aproximadamente nas posições $x = 1,2m$, $x = 2,8m$ e $x = 4,3m$, existe um desvio a referência que é prontamente corrigido. A Tabela 5.1 apresenta os erros quadráticos médios (RMS, do inglês) para a posição e orientação. Na Figura 5.8 é possível analisar os erros de posição e de orientação ao longo do tempo. Durante o seguimento da trajetória (desconsiderando o período de regulação), os desvios se apresentam principalmente no eixo y e não ultrapassam os 10 cm. As velocidades de comando das juntas do manipulador e das rodas da plataforma móvel estão apresentadas na Figura 5.9. É possível notar que todas as juntas são ativadas em algum mo-

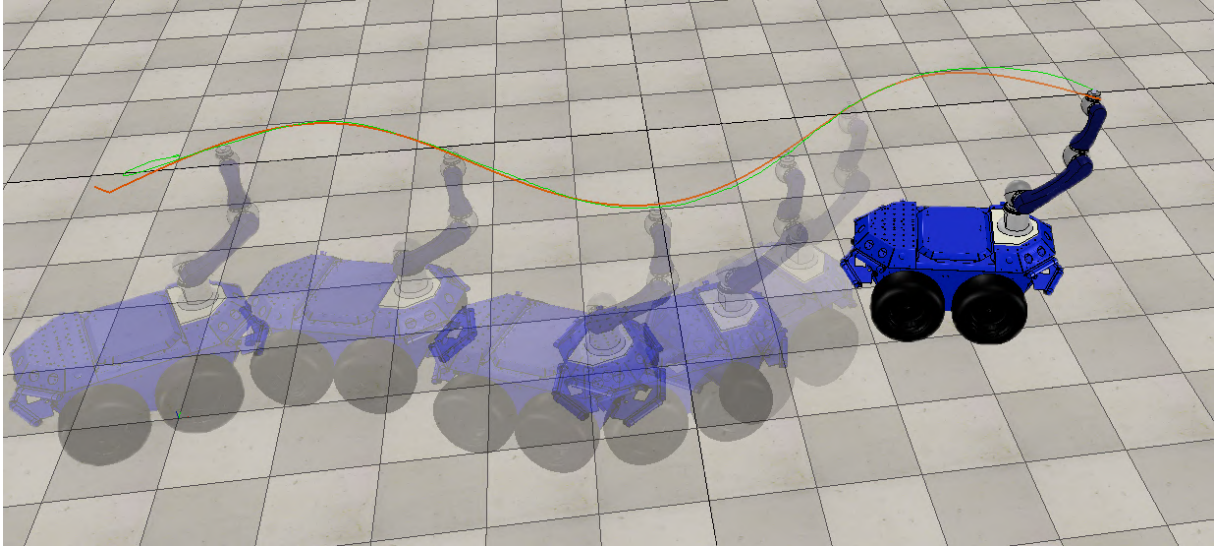


Figura 5.6: Imagens sobrepostas de simulação do robô realizando uma trajetória sinusoidal. A linha verde representa o caminho percorrido pelo efetuador enquanto que a linha vermelha representa a trajetória de referência.

Tabela 5.1: Erros de posição e orientação para trajetória sinusoidal.

Erro de posição	X	Y	Z
Erro RMS [m]	0.02630	0.04231	0.01228
Erro de orientação	Roll	Pitch	Yaw
Erro RMS [rad]	0.00018	0.00306	0.01670

mento, como é de se esperar em uma estratégia de controle de corpo completo.

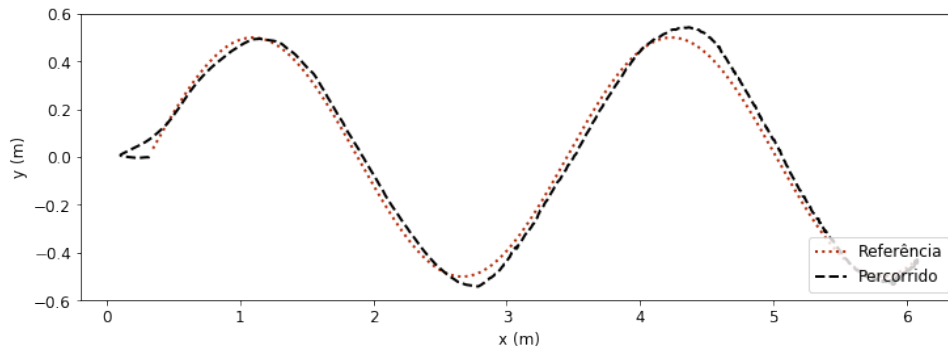


Figura 5.7: Trajetória realizada e de referência durante simulação no plano XY para a trajetória sinusoidal.

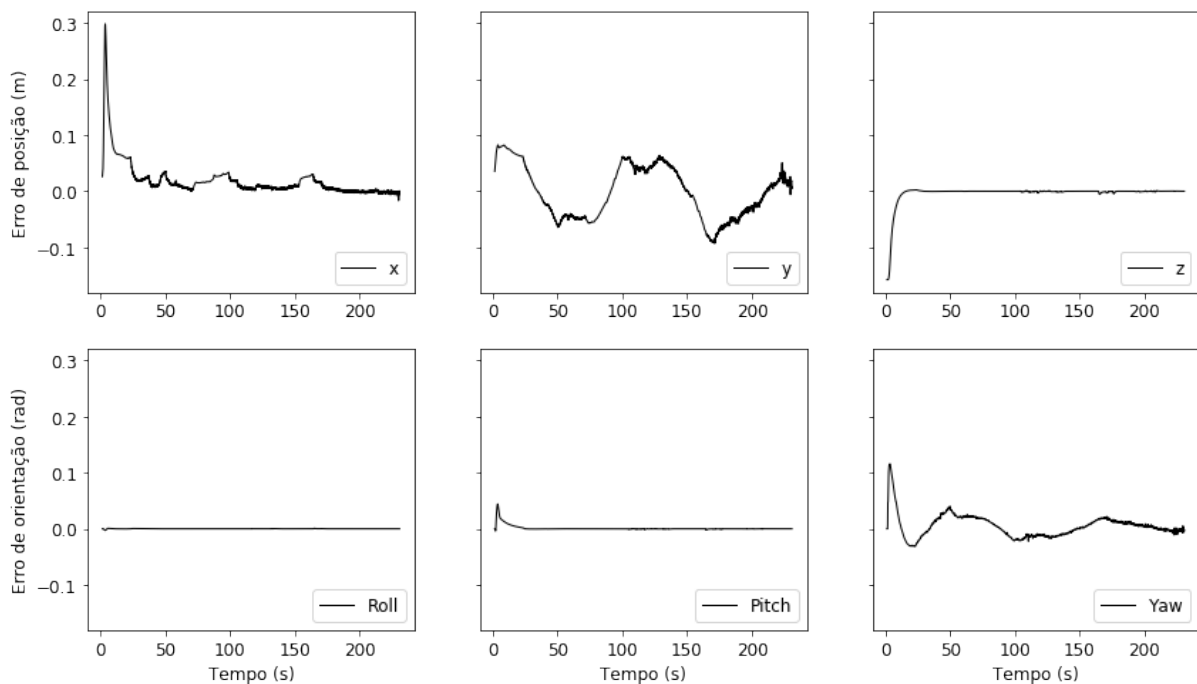


Figura 5.8: Erros de posição e orientação para a trajetória sinusoidal.

5.5.2. Trajetória quadrada

A segunda trajetória utilizada para os testes apresenta o formato de um quadrado com 2 metros de lado. De acordo com Ulrich e Sasiadek (2012), as trajetórias quadradas representam um caso de estudo ideal para avaliar os distúrbios transientes devido as trocas ortogonais de direção. Ou seja, este ensaio é importante para analisar o comportamento do controlador quando existe uma mudança repentina e não suave na trajetória a ser rastreada; tal situação é vista nos vértices do quadrado. Nestes pontos, o efetuador precisa realizar um giro de 90° e seguir em outro sentido, sendo que a plataforma móvel não consegue realizar diretamente esse movimento devido a restrição não holonômica. Como pode ser visto na Figura 5.10, o robô é capaz de seguir a trajetória com sucesso. É interessante notar o comportamento do robô nos pontos de inflexão

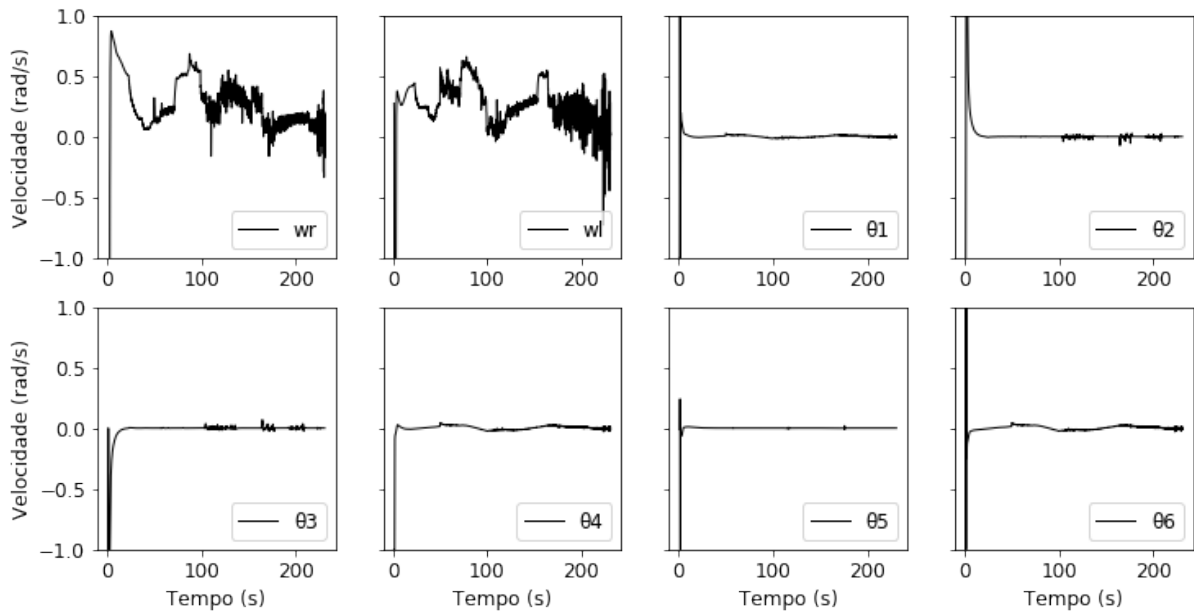


Figura 5.9: Velocidades aplicadas as juntas do manipulador móvel durante seguimento de trajetória sinusoidal.

(vértices do quadrado), em especial na parte superior esquerda da imagem, onde pode-se ver a plataforma móvel realizando um giro enquanto o manipulador altera consideravelmente sua configuração para manter o seguimento da trajetória.

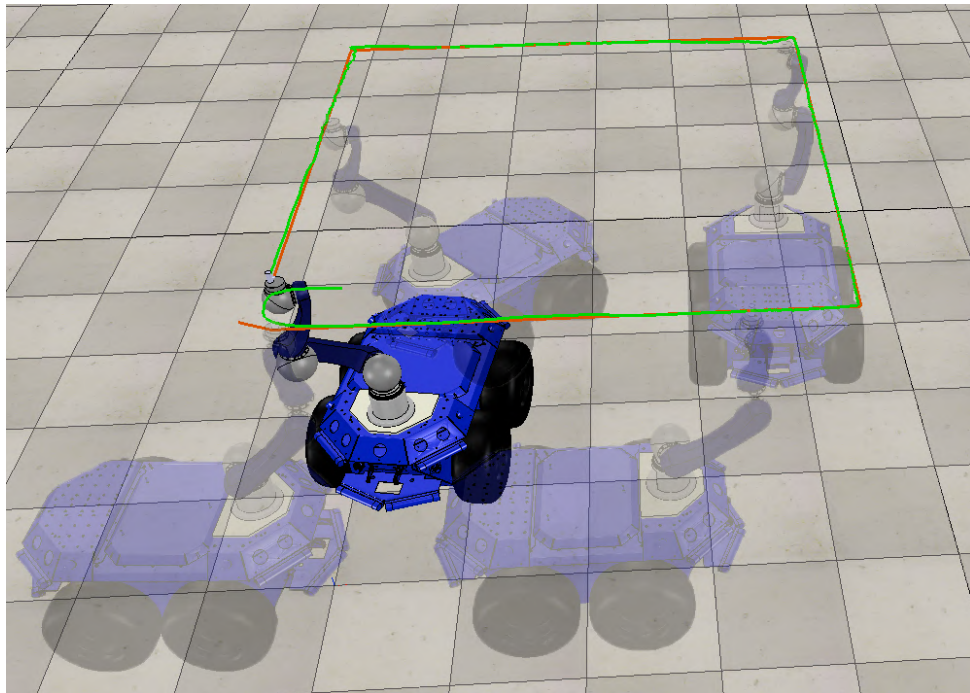


Figura 5.10: Imagens sobrepostas de simulação do robô realizando uma trajetória quadrada. A linha verde representa o caminho percorrido pelo efetador enquanto que a linha vermelha representa a trajetória de referência.

Tabela 5.2: Erros de posição e orientação para trajetória quadrada.

Erro de posição	X	Y	Z
Erro RMS [m]	0.02683	0.02907	0.01269
Erro de orientação	Roll	Pitch	Yaw
Erro RMS [rad]	0.00041	0.01479	0.01632

A Figura 5.11 apresenta o caminho percorrido e a referência no plano XY para um ensaio de seguimento da trajetória quadrada. Nesta imagem é possível ver com maior precisão o desvio ocorrido nas vértices do quadrado. Apesar do desvio ocorrido, o robô é capaz de recuperar o seguimento da trajetória logo em seguida. Ademais, o robô é capaz de seguir com pouco desvio as arestas do quadrado. A Tabela 5.2 apresenta os RMS para a posição e orientação durante o seguimento da trajetória. Uma melhor análise desses desvios pode ser feita nos gráficos da Figura 5.12. Nessa figura estão explicitados os erros de orientação e posição, e é possível notar que após o período de regulação, os erros são mais notáveis no eixo X e Y devido ao vértices do quadrado. Mesmo assim, os erros nestes pontos não ultrapassam os 10 cm e são prontamente corrigidos. Apesar dos erros serem pequenos para a aplicação a ser realizada e para as dimensões do robô, estes devem ser levados em conta no momento do cálculo da trajetória, buscando manter uma margem para ditos desvios. O cálculo da trajetória para a inspeção dos transportadores de correias não faz parte do escopo deste trabalho. Na Figura 5.13 estão apresentadas as velocidades de comando das juntas do manipulador robótico e das rodas da plataforma móvel.

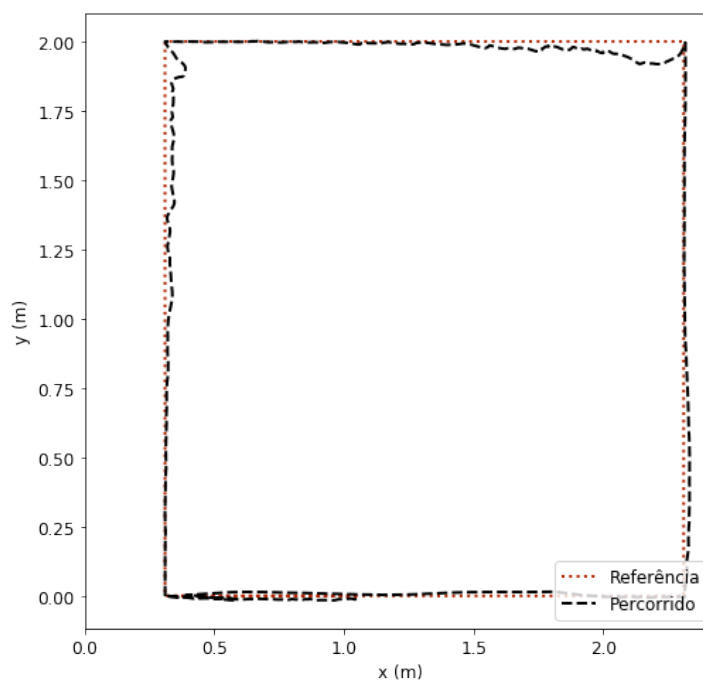


Figura 5.11: Trajetória realizada e de referência durante simulação no plano XY para a trajetória quadrada.

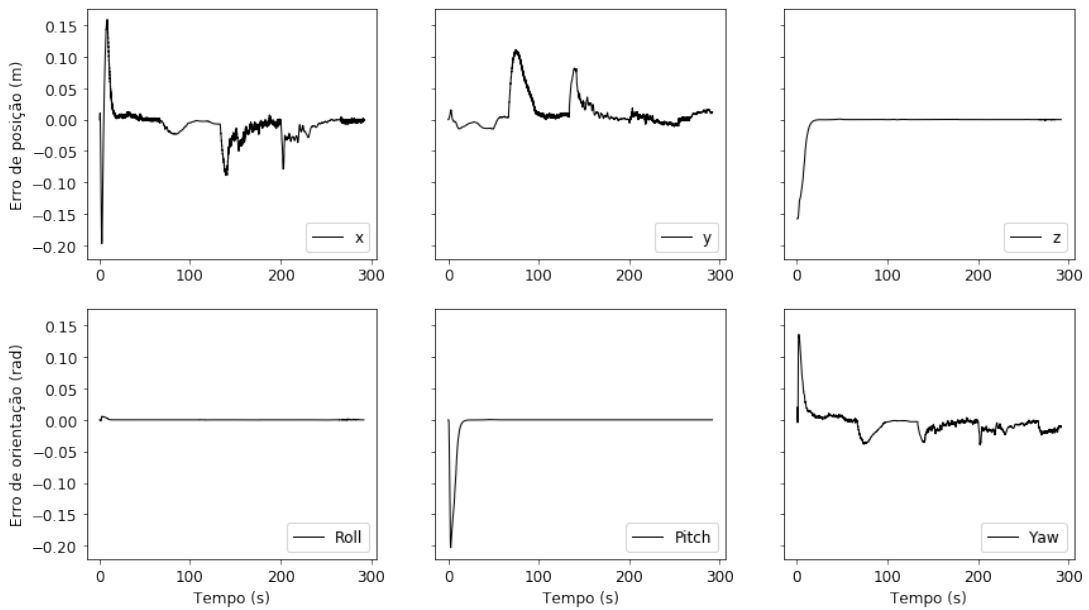


Figura 5.12: Erros de posição e orientação para a trajetória quadrada.

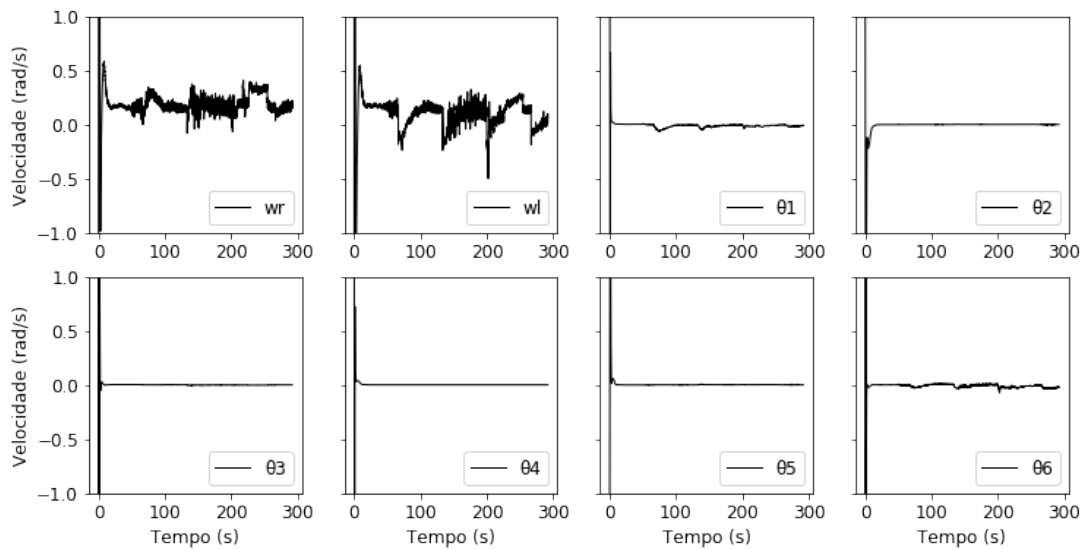


Figura 5.13: Velocidades aplicadas as juntas do manipulador móvel durante seguimento de trajetória quadrada.

5.5.3. Trajetória simulando rotina de inspeção

Os últimos ensaios realizados buscaram recriar uma missão a ser realizada pelo robô no âmbito da inspeção dos transportadores de correia. Foi utilizado um modelo tridimensional de um transportador de correia real utilizado pela Vale. Neste teste, a trajetória é uma reta ao longo do transportador que possui uma inclinação. Dessa forma, a trajetória se mantém constante no eixo Y, enquanto varia nos eixos X e Z. Foi utilizado um recurso de simulação que adiciona a imagem de uma câmera acoplada ao efetuador do manipulador móvel. Portanto, é possível simular como seria a captura das câmeras durante a execução da inspeção. A orientação a ser

seguida durante a trajetória foi, então, definida buscando manter os rolos no campo de visão da câmera. Na Figura 5.14 é possível observar o cenário simulado, sendo que na parte inferior esquerda é apresentada a imagem da câmera acoplada ao efetuador do robô. Na imagem da câmera podem-se observar os rolos e os cavaletes do transportador de correia, como esperado. Também pode ser observado na figura como o braço se estende desde a primeira imagem do robô (a esquerda) até a última (a direita), seguindo a inclinação do TC.

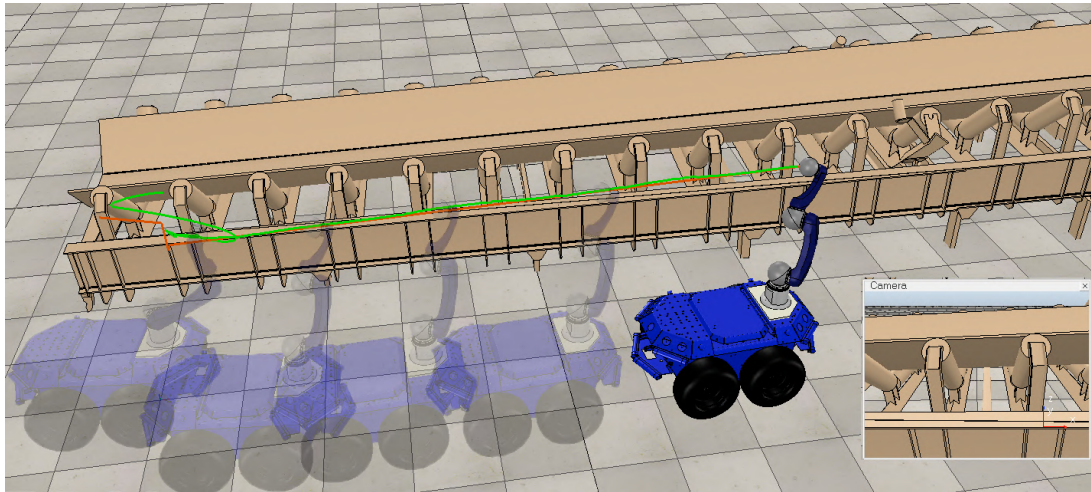


Figura 5.14: Imagens sobrepostas de simulação do robô realizando uma trajetória representando uma inspeção. A linha verde representa o caminho percorrido pelo efetuador enquanto que a linha vermelha representa a trajetória de referência.

Uma análise mais detalhada do ensaio pode ser feita pelas Figuras 5.15 e 5.16 que apresentam o caminho percorrido e referência, e os erros, respectivamente. É possível observar que existe um desvio considerável durante a etapa de regulação no eixo Y. Após este período de regulação, o robô segue a trajetória praticamente sem desvios à referência. A Figura 5.17 apresenta as velocidades aplicadas as juntas do manipulador e a rodas da plataforma móvel. Em um momento inicial todas as juntas são ativadas com velocidades altas. Isto se deve ao período de regulação, onde o erro é grande, o que gera uma ação de controle de maior módulo. Após a regulação, a ação de controle é mais suave e se concentra principalmente nas rodas.

5.5.4. Discussão sobre as simulações

As simulações realizadas buscaram retratar situações que serão encontradas durante a inspeção de transportadores de correia em campo. Por meio destas simulações foi possível observar o comportamento do controlador e do manipulador móvel. Além disso, o ambiente simulado desenvolvido no V-REP e os algoritmos implementados no ROS podem ser utilizados durante o andamento do projeto para realização de novos testes e aplicação da estratégia de controle no robô real.

Com base nos ensaios realizados foi possível levantar algumas conclusões. Primeiramente foi notada a boa capacidade da estratégia proposta para realizar o seguimento de diferen-

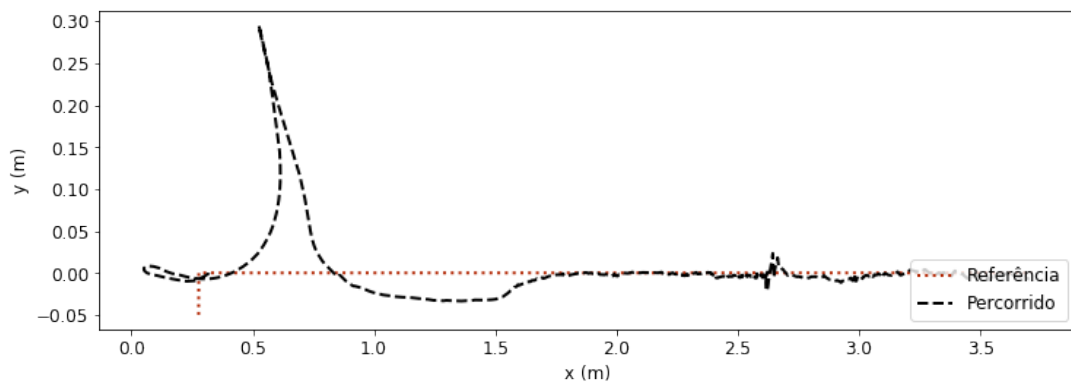


Figura 5.15: Trajetória realizada e de referência durante simulação no plano XY para a trajetória quadrada.

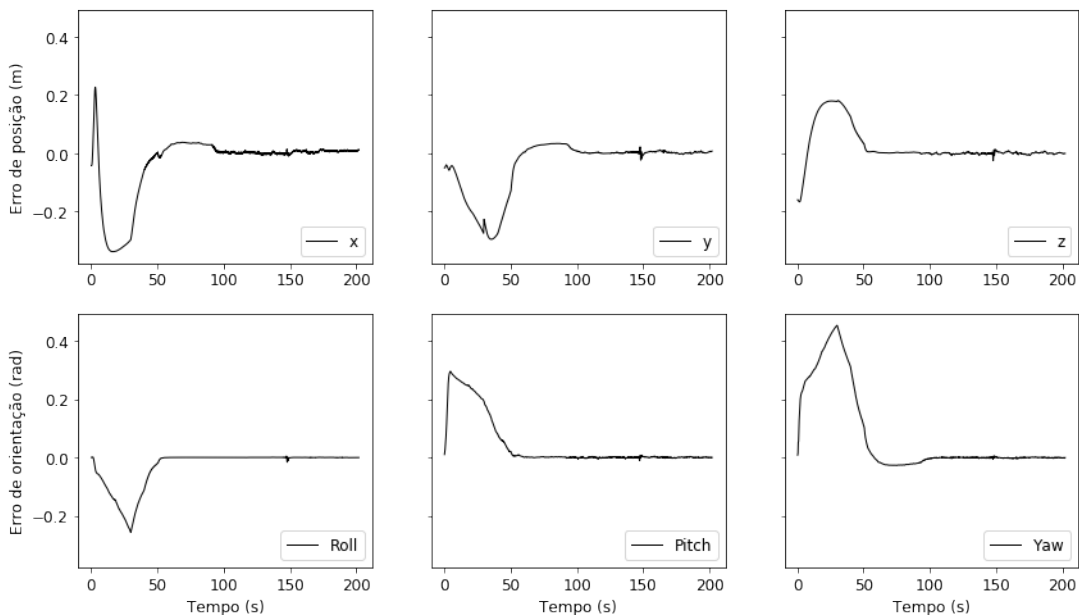


Figura 5.16: Erros de posição e orientação para a trajetória quadrada.

tes trajetórias, assim como foi constatada a capacidade da plataforma se mover em situações onde esta estaria sujeita a restrições não holonômicas, como no caso dos vértices do quadrado. As trajetórias foram criadas partindo de pontos próximos a posição do efetuador do robô; mesmo assim é possível notar desvios consideráveis durante a etapa de regulação. Uma possível solução para isto seria calcular as trajetórias partindo da pose inicial do efetuador, dessa forma não seria necessária a etapa de regulação. Mesmo assim, foi importante adicionar este desvio durante os ensaios para avaliar a capacidade de regulação do controlador, que se mostrou capaz de ir ao encontro da trajetória após alguns segundos.

Os erros apresentados durante o seguimento da trajetória não ultrapassaram os 10 cm. Estes erros podem estar relacionados a atuação do fator de amortecimento do DLS, de atrasos no controlador devido a resposta dos movimentos não ser instantânea e de efeitos relacionados a dinâmica do robô. Desvios desta magnitude são aceitáveis para o posicionamento dos sensores

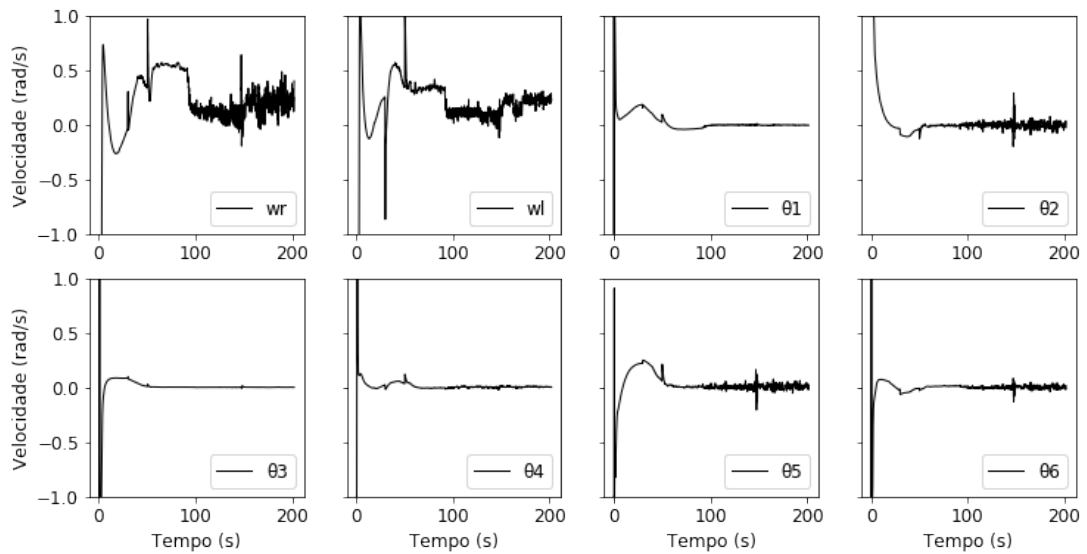


Figura 5.17: Velocidades aplicadas as juntas do manipulador móvel durante seguimento de trajetória quadrada.

durante a inspeção visual e acústica. Porém, para a inspeção de vibração, onde é necessário realizar o contato entre o efetuador e o TC seria necessário maior precisão, em torno de 1 cm. Para isso pode-se utilizar uma trajetória mais lenta com um ganho maior do controlador, o que durante os experimentos diminuiu consideravelmente o erro.

Os testes realizados permitiram avaliar como o controle de corpo completo atua ativamente em todas as juntas para rastrear a trajetória, como esperado. Porém, a análise dos gráficos das velocidades das juntas apresentam acentuada oscilação em alguns momentos. Para aplicação no robô real seria necessário realizar algum tipo de filtragem desses sinais para evitar mudanças de velocidades bruscas que pudessem desestabilizar a plataforma ou gerar danos físicos aos seus componentes. Apesar de que a desestabilização ou movimentos errôneos não foram percebidos no simulador, que utiliza controladores do tipo PID para comandar as juntas do robô. O que leva a concluir que os próprios *drivers* dos motores utilizados podem ser suficientes para realizar tal filtragem. Mais estudos devem ser realizados nesse âmbito para aplicação no robô real.

6. Conclusões

A inspeção de rolos de transportadores de correias no ambiente industrial de mineração é um problema de alta relevância devido ao papel fundamental exercido por estes equipamentos. Os TCs são utilizados em diferentes etapas do processo de mineração; desde a mina, até o embarque nos navios, incluindo a usina e os terminais ferroviários. Esta inspeção é atualmente realizada por operários especialistas de forma manual, um processo insalubre e que apresenta risco à saúde dos operadores que a realizam. Além disso, a inspeção realizada por operadores possui baixa repetibilidade, a frequência de monitoramento não é suficiente para encontrar alguns problemas e não é possível realizar o acompanhamento da vida útil dos equipamentos.

Entre os diversos elementos de um TC, os que apresentam maiores desafios para a inspeção são os rolos. Estes equipamentos estão em constante movimento e são alocados em grande quantidade por toda a extensão do TC. Neste sentido, a literatura propõe diferentes soluções para a inspeção dos rolos, mas nenhuma se mostra viável para aplicação no ambiente da mineração. Diante deste cenário, esta dissertação descreve um novo procedimento para inspecionar estruturas de transportadores de correia usando um dispositivo robótico.

A solução proposta é uma rotina de inspeção a ser realizada por um dispositivo robótico utilizando as estruturas já existentes nos TCs. O dispositivo é formado por uma plataforma móvel embarcada com um braço manipulador e sensores térmicos, acústicos e de vibração. O sistema proposto apresenta importantes vantagens comparados a inspeção convencional feita por operadores. A análise acústica e de vibração permite acompanhar a vida útil do rolo, o que possibilita a predição de falhas e a otimização das rotinas de manutenção. A inspeção de temperatura pode indicar um problema iminente como um incêndio e reportar a necessidade de um reparo urgente. Além disso, a solução remove o operador de áreas de risco e sua implementação não requer nenhuma modificação nas estruturas dos TCs.

Buscando avaliar a viabilidade técnica do projeto, foram realizados uma série de testes com caráter de prova de conceito. Dessa forma, foi possível confirmar as capacidades do dispositivo proposto em superar os diferentes desafios de locomoção encontrados nos ambientes dos TC. Também foi possível avaliar a qualidade da inspeção com base na estratégia de sensoriamento proposta, exceto para a vibração. Com base nestes testes iniciais, foram propostas melhorias no projeto do manipulador móvel e uma nova abordagem para controle do robô.

Para otimizar o sistema de comando do robô e permitir que seja feita uma inspeção com maior qualidade, devido a melhor posicionamento dos sensores ao longo da inspeção, foi proposta uma estratégia de controle cinemático de corpo completo. Baseando-se em uma simplificação proposta do manipulador móvel, foi desenvolvida uma estratégia de controle de seguimento de trajetória que leva em conta todas as juntas do robô em uma mesma malha de controle. Para tal, é utilizado um controlador do tipo *feed-forward* em conjunto com uma linearização entrada/saída por *feedback*, responsável por vencer as restrições não-holonômicas da plataforma móvel. O algoritmo de controle foi desenvolvido em ROS o que permite que este

seja utilizado no robô real, e um ambiente de simulações foi construído em V-REP o que permitiu simular o funcionamento da estratégia proposta. Com base nas simulações foi constatada a eficiência do controlador para rastrear distintas trajetória.

Por fim, com base nos estudos realizados, é importante ressaltar que uma solução completa e funcional para a inspeção autônoma de transportadores de correias deve considerar uma equipe de robôs heterogêneos. Para permitir a inspeção na maior parte dos ambientes onde os TCs se encontram, seria necessário combinar agentes aéreos, guiados por cabo/trilho e terrestres. Tal sistema iria se beneficiar de diferentes capacidades de mobilidade, carga útil e autonomia de energia para otimizar o procedimento de inspeção de ambientes complexos.

6.1. Contribuições

As principais contribuições deste trabalho estão descritas a seguir.

6.1.1. Novo procedimento para inspeção dos transportadores de correias

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de um novo procedimento para inspeção de transportadores de correias utilizando um manipulador móvel, um conjunto de sensores e uma rotina de inspeção. Foi parte do trabalho levantar os principais desafios a serem enfrentados pela plataforma móvel responsável por se movimentar em locais desafiadores, e dessa forma desenvolver um conceito de mobilidade para o robô. Também foram mapeados quais as grandezas utilizadas pelos inspetores e baseado nisso são estabelecidos os sensores a serem utilizados. Por fim, é proposta uma rotina de inspeção que permite que a inspeção seja feita de forma segura e completa, sendo o robô capaz de levantar diferentes informações sobre o TC. Devido ao caráter de inovação do procedimento proposto, a empresa Vale em conjunto com a Universidade Federal do Rio de Janeiro realizaram o depósito de uma patente deste trabalho.

6.1.2. Testes de conceito para verificar a viabilidade técnica do projeto

Devido a ser uma metodologia inovadora para a inspeção dos TCs, não são encontrado registros de testes de campo para avaliar a viabilidade de um robô para realizar tal operação. Dessa forma, os testes de campo como prova de conceito foram essenciais para definir as principais dificuldades a serem enfrentadas durante a inspeção e ditar novos caminhos a serem seguidos pelo projeto. Os testes de conceito também permitiram confirmar a capacidade da abordagem sensorial proposta.

6.1.3. Estratégia de controle de corpo completo para um manipulador móvel

Diante dos resultados encontrados durante os testes de conceito foi encontrada a necessidade de uma estratégia de controle de corpo completo onde a plataforma móvel e o manipulador robótico fossem controlados de maneira unificada. Tal controle foi desenvolvido e validado em ambiente de simulação e se mostrou capaz de realizar o seguimento de trajetórias de forma efetiva.

6.1.4. Publicações

O trabalho desenvolvido durante a construção desta dissertação foi apresentado e publicado nos seguintes meios:

- Publicação e apresentação no Congresso Brasileiro de Automática (CBA) de 2018 sob o título de “Modelagem e controle de um dispositivo robótico para inspeção de rolos de transportadores de correias”. Este artigo apresenta a metodologia proposta para a inspeção, tendo foco na estratégia de controle. Tal estratégia era diferente da apresentada nesta dissertação, e foi uma primeira tentativa de realizar o controle de corpo completo. Essa estratégia apresentou problemas para superar as restrições não holonômicas do robô e por isso foi descartada no decorrer do trabalho. Este artigo pode ser visto no Apêndice [6.2](#).
- Patente depositada sob o título de “Dispositivo robótico e método para inspeção de componentes de um transportador de correia”. Esta patente reivindica o conceito do dispositivo robótico e a metodologia proposta, incluindo a abordagem sensorial e a rotina de inspeção. Esta patente pode ser vista no Apêndice [6.2](#).
- Publicação e apresentação na *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* de 2018 na categoria *abstract-only* sob o título de “*A novel robotic inspection system for belt conveyor idlers*”. Este resumo expandido apresenta a metodologia de inspeção proposta utilizando um dispositivo robótico, discutindo brevemente os testes realizados, destacando a importância do projeto e mostrando sua viabilidade técnica. Este resumo expandido pode ser visto no Apêndice [6.2](#).
- Apresentação oral na conferência *Mines of the Future* sob o título de “*A novel robotic device for inspection of belt conveyor idler rolls*”. Esta apresentação fez parte de uma conferência realizada em Aachen, Alemanha, no ano de 2018, que tinha por intuito apresentar os avanços da academia no âmbito da tecnologia na mineração. Foi apresentado o conceito do dispositivo e os resultados dos testes realizados.

- Relatório técnico publicado sob o título “Estado da arte, teste de conceito e estudo técnico do dispositivo robótico para a inspeção de rolos de correias transportadoras”. Este relatório apresenta uma revisão da literatura sobre as tecnologias para inspeção de rolos e sobre robôs manipuladores móveis, assim como discute os testes realizados e propõe melhorias para uma nova versão do sistema robótico. Este relatório pode ser visto no Apêndice [6.2](#).

6.2. Trabalhos futuros

Trabalhos futuros podem estar focados na extensão do modelo cinemático do manipulador móvel, considerando os braços de alavanca existentes na plataforma móvel proposta como outros quatro GDL. Dessa forma, serão adicionadas novas juntas ao sistema e este apresentará uma redundância cinemática ainda maior. Buscando explorar essa redundância, devem ser estudadas metodologias de controle que permitam evitar singularidades, evitar colisões e reduzir o gasto energético em conjunto com o seguimento de trajetória.

Outro ponto fundamental para consolidação desta pesquisa é a implementação da estratégia de controle no robô real e realização de novos testes para validação deste. Enquanto que no âmbito do projeto macro, esforços devem ser dirigidos à finalização da construção do manipulador móvel e ao desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais para identificação de anomalias e acompanhamento da vida útil dos equipamentos. Também é importante viabilizar a integração do sistema desenvolvido aos *softwares* utilizados pela empresa para gestão de ativos e manutenção, seguindo as premissas da Indústria 4.0.

Referências Bibliográficas

- ACAR, C., MURAKAMI, T. “Multi-task control for dynamically balanced two-wheeled mobile manipulator through task-priority”. Em: *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 2195–2200. IEEE, 2011.
- ADORNO, B. V. *Two-arm manipulation: From manipulators to enhanced human-robot collaboration*. Tese de Doutorado, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2011.
- AP SENSING. “AP Sensing -Fire Detection”. <https://www.apsensing.com/application/fire-detection/>, 2017. Acessado em 04/06/2018.
- CEMA, C. E. M. A. *Belt conveyors for bulk materials*. CEMA, 1997. ISBN: 1891171186,9781891171185.
- CHA, Y.-J., CHOI, W., SUH, G., et al.. “Autonomous structural visual inspection using region-based deep learning for detecting multiple damage types”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 33, n. 9, pp. 731–747, 2018.
- CHIAVERINI, S., SICILIANO, B., EGELAND, O. “Review of the damped least-squares inverse kinematics with experiments on an industrial robot manipulator”, *IEEE Transactions on control systems technology*, v. 2, n. 2, pp. 123–134, 1994.
- CHITTA, S., SUCAN, I., COUSINS, S. “Moveit![ROS topics]”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, v. 19, n. 1, pp. 18–19, 2012.
- CLARK, J. W. “MOBOTRY: The new art of remote handling”, *IRE Transactions on Vehicular Communications*, v. 10, n. 2, pp. 12–24, 1961.
- FOX, D., BURGARD, W., THRUN, S. “Markov localization for mobile robots in dynamic environments”, *Journal of Artificial Intelligence Research*, v. 11, pp. 391–427, 1999.
- FREITAS, G. M. *Reconfiguração de robôs móveis com articulação ativa navegando em terrenos irregulares*. Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, 2014.
- HOOTSMANS, N. A. M. *The motion control manipulators on mobile vehicles*. Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology, 1992.

- HORNUNG, A., WURM, K. M., BENNEWITZ, M., et al.. “OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees”, *Autonomous Robots*, v. 34, n. 3, pp. 189–206, 2013.
- HU, C., WANG, J., ZHANG, Z., et al.. “Applications Study of Distributed Optical Fiber Sensor System in Coal Mine”. Em: *Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2011 Symposium on*, pp. 1–4. IEEE, 2011.
- IMIGRANTE. “Incêndio é registrado na Vale na madrugada desta segunda”. <https://imirante.com/sao-luis/noticias/2015/01/26/incendio-e-registrado-na-vale-na-madrugada-desta-segunda.shtm>, 2015. Acessado em 04/06/2019.
- INGENUITY. “Smart-Idler™”. <http://www.ingenuity-design.com.au/portfolio-posts/smart-idler/>, 2017. Acessado em 04/06/2018.
- JOSHI, J., DESROCHERS, A. “Modeling and control of a mobile robot subject to disturbances”. Em: *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on*, v. 3, pp. 1508–1513. IEEE, 1986.
- KANG, S., CHO, C., LEE, J., et al.. “ROBHAZ-DT2: Design and integration of passive double tracked mobile manipulator system for explosive ordnance disposal”. Em: *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, v. 3, pp. 2624–2629. IEEE, 2003.
- KYDD, K., MACREZ, S., POURCEL, P., et al.. “Autonomous robot for gas and oil sites”. Em: *SPE Offshore Europe Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- LAVALLE, S. M. *Planning algorithms*. Cambridge University Press, 2006.
- LAVALLE, S. M., KUFFNER JR, J. J. “Randomized kinodynamic planning”, *The International Journal of Robotics Research*, v. 20, n. 5, pp. 378–400, 2001.
- LEE, K., OH, J., SIM, O., et al.. “Inverse kinematics with strict nonholonomic constraints on mobile manipulator”. Em: *Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on*, pp. 2469–2474. IEEE, 2017.
- LODEWIJKS, G., DUINKERKEN, M., DE LA CRUZ, A. L., et al.. “The application of RFID technology in belt conveyor systems”, *Proceedings of BeltCon*, v. 14, pp. 1–17, 2007.
- LODEWIJKS, G. “Strategies for automated maintenance of belt conveyor systems.” *Bulk Solids Handling*, v. 24, n. 1, pp. 16–22, 2004.

- LODEWIJKS, G., LI, W., PANG, Y., et al.. “An application of the IoT in belt conveyor systems”. Em: *International Conference on Internet and Distributed Computing Systems*, pp. 340–351. Springer, 2016.
- LYNCH, R. *Analysis of the Dynamics and Control of a Two Degree of Freedom Robotic Manipulator Mounted on a Moving Base*. Relatório técnico, ARMY MILITARY PERSONNEL CENTER ALEXANDRIA VA, 1985.
- MACIEJEWSKI, A. A., KLEIN, C. A. “The singular value decomposition: Computation and applications to robotics”, *The International journal of robotics research*, v. 8, n. 6, pp. 63–79, 1989.
- NAKAMURA, Y., HANAFUSA, H. “Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control”, *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, v. 108, n. 3, pp. 163–171, 1986.
- NAKAMURA, Y., HANAFUSA, H., YOSHIKAWA, T. “Task-priority based redundancy control of robot manipulators”, *The International Journal of Robotics Research*, v. 6, n. 2, pp. 3–15, 1987.
- NASCIMENTO, R. S., MORATO, R. R., BIANCHI, A. C., et al.. *Inspeção autônoma de transportadoras de correia - Plataforma integrada com uso de VANTs*. Tese de Mestrado, Escola de Minas-Universidade Federal de Ouro Preto / Instituto Tecnológico Vale - Mineração, 2017a.
- NASCIMENTO, R., CARVALHO, R., DELABRIDA, S., et al.. “An Integrated Inspection System for Belt Conveyor Rollers - Advancing in an Enterprise Architecture”. Em: *Proceedings of the 19th International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 2: ICEIS*, pp. 190–200. SciTePress, 2017b.
- NASCIMENTO, R., CARVALHO, R., DELABRIDA, S. E., et al.. “An Integrated Inspection System for Belt Conveyor Rollers-Advancing in an Enterprise Architecture.” Em: *ICEIS (2)*, pp. 190–200, 2017c.
- PANG, Y., LODEWIJKS, G. “The application of RFID technology in large-scale dry bulk material transport system monitoring”. Em: *Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2011 IEEE Workshop on*, pp. 1–5. IEEE, 2011.
- QUIGLEY, M., CONLEY, K., GERKEY, B., et al.. “ROS: an open-source Robot Operating System”. Em: *ICRA workshop on open source software*, v. 3, p. 5. Kobe, Japan, 2009.

- R. YONG, W. GONG, M. Z. SHEN, E. G. GUOAN. “Belt conveyor automatic inspection system and method based on multi-rotor unmanned aerial vehicle”. 2014. CN103869819B.
- ROGERS, A. J. “Distributed optical-fibre sensors for the measurement of pressure, strain and temperature”, *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*, v. 58, n. 5S, pp. S113–S122, 1988.
- ROHMER, E., SINGH, S. P., FREESE, M. “V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework”. Em: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1321–1326. IEEE, 2013.
- ROUMELIOTIS, S. I., BEKEY, G. A. “Bayesian estimation and Kalman filtering: A unified framework for mobile robot localization”. Em: *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, v. 3, pp. 2985–2992. IEEE, 2000.
- SCHUNK. “Powerball Lightweight Arm LWA 4P: Mobile Greifsysteme - Zukunftsweisend in der Servicerobotik”. <http://www.schunk-modular-robotics.com/en/home/products/powerball-lightweight-arm-lwa-4p.html>, 2017. Acessado em 05/01/2018.
- SERAJI, H. “An on-line approach to coordinated mobility and manipulation”. Em: *Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on*, pp. 28–35. IEEE, 1993.
- SERAJI, H. “A unified approach to motion control of mobile manipulators”, *The International Journal of Robotics Research*, v. 17, n. 2, pp. 107–118, 1998.
- SICILIANO, B., SLOTINE, J.-J. “A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems”, *Advanced Robotics*, pp. 1211–1216, 1991.
- SICILIANO, B., SCIAVICCO, L., VILLANI, L., et al.. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. ISBN: 1846286417, 9781846286414.
- SILVA, F. F. A., ADORNO, B. V. “Whole-body Control of a Mobile Manipulator Using Feedback Linearization and Dual Quaternion Algebra”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, pp. 1–14, 2018.
- SUCAN, I. A., MOLL, M., KAVRAKI, L. E. “The open motion planning library”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, v. 19, n. 4, pp. 72–82, 2012.
- THRUN, S., FOX, D., BURGARD, W., et al.. “Robust Monte Carlo localization for mobile robots”, *Artificial intelligence*, v. 128, n. 1, pp. 99–141, 2001.

- ULRICH, S., SASIADEK, J. “Trajectory tracking control of flexible-joint space manipulators”, *Canadian Aeronautics and Space Journal*, v. 58, n. 1, pp. 47–59, 2012.
- VARGAS, L. V., LEITE, A. C., COSTA, R. R. “Overcoming kinematic singularities with the filtered inverse approach”, *IFAC Proceedings Volumes*, v. 47, n. 3, pp. 8496–8502, 2014.
- VAYERON PTY LTD. “Smart Idler Technology”. <http://vayeron.com.au/tech/>, 2017. Acessado em 04/06/2018.
- WHITNEY, D. E. “Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses”, *IEEE Transactions on man-machine systems*, v. 10, n. 2, pp. 47–53, 1969.
- YAMAMOTO, Y. *Control and coordination of locomotion and manipulation of a wheeled mobile manipulators*. Tese de Doutorado, Graduate School of Arts and Sciences, University of Pennsylvania, 1994.
- YAMAMOTO, Y., YUN, X. “Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator”. Em: *Decision and Control, 1992., Proceedings of the 31st IEEE Conference on*, pp. 2643–2648. IEEE, 1992.
- YANG, B. Y. “Fibre optic conveyor monitoring system”, 2014.
- YANG, W., ZHANG, X., MA, H. “An inspection robot using infrared thermography for belt conveyor”. Em: *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2016 13th International Conference on*, pp. 400–404. IEEE, 2016.
- YOKOGAWA. “Fiber Optic Sensor”. <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/field-instruments/fiber-optic-sensor/>, 2017. Acessado em 04/06/2018.

Apêndice A - Artigo - CBA 2018

Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Automática (CBA) de 2018 sob o título de “Modelagem e controle de um dispositivo robótico para inspeção de rolos de transportadores de correias”.

MODELAGEM E CONTROLE DE UM DISPOSITIVO ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO DE ROLOS DE TRANSPORTADORES DE CORREIAS

GABRIEL CARVALHO GARCIA^{*†}, MARCOS PAULO TORRE^{*†}, FILIPE ROCHA^{†‡}, JOÃO CARLOS MONTEIRO[‡], RAMON ROMANKEVICIUS COSTA[‡], FERNANDO LIZARRALDE[‡], ANDRÉ STANZANI FRANCA[§], FELIPE RIBEIRO DA FONSECA[§], GUSTAVO MEDEIROS FREITAS^{*}

**Instituto Tecnológico Vale
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

*†Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

*‡Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*

*§Vale S.A. - Departamento de Engenharia e Desenvolvimento
Vitória, Espírito Santo, Brasil*

Emails: gabriel.garcia@ufop.edu.br, marcos.torre@itv.org, filipe.rocha@itv.org, jcmonteiro@poli.ufrj.br, ramon@coep.ufrj.br, fernando@coep.ufrj.br, andre.franca@vale.com, felipe.ribeiro@vale.com, gustavo.medeiros.freitas@itv.org

Abstract— Belt conveyors (BCs) play an important role in the transportation of dry bulk material in different industries. Particularly, their use in mining processes is extensive and vital for the operation of this industry. Therefore, the inspection of its components, such as idlers rolls, is a fundamental task to guarantee the conveyor belt proper functioning. Aiming to present an effective solution to belt conveyors inspection, this paper proposes a robotic device composed by a mobile platform, a robotic arm and a set of sensors for inspection of idler rolls. The proposed system removes the operator from risk areas and provides more accurate information. Furthermore, implementation of the system does not require any modification of the existing BC structures. Based on the kinematic model of the mobile manipulator, we present a control strategy to command the robotic device considering its whole-body. We performed proof of concepts tests in real scenarios and the systems capabilities were confirmed in different operating conditions.

Keywords— Mining robotics, Mobile manipulators, Trajectory control, Service robots

Resumo— Os transportadores de correia (TCs) desempenham um papel importante no transporte de materiais em diferentes indústrias. Particularmente, a sua utilização em processos de mineração é extensa e vital para a operação desta indústria. Dessa forma, a inspeção dos componentes de transportadores de correia, como os rolos, é uma tarefa fundamental para garantir o correto funcionamento do equipamento. Visando apresentar uma solução efetiva para inspeção de transportadores de correias, este artigo propõe um dispositivo robótico composto por uma plataforma móvel, um braço manipulador e um conjunto de sensores para inspeção de rolos. O sistema proposto retira os operadores das áreas de risco e fornece informações mais precisas do estado do equipamento. Além disso, a implementação do sistema não exige nenhuma modificação da estrutura existente dos TCs. Baseado no modelo cinemático do manipulador móvel, é apresentada uma estratégia de controle para comandar o robô considerando seu corpo completo. Testes para prova de conceitos foram realizados em situações reais e as capacidades do sistema foram confirmadas em diferentes condições de operação.

Palavras-chave— Robôs para mineração, Manipuladores móveis, Controle de trajetória, Robôs de serviço

1 Introdução

Transportadores de correias (TCs) são um dos meios mais utilizados para transporte em larga escala de materiais a granel como minérios, carvão, cereais, aparas de madeira, areia, cascalho e rochas. A sua aplicação em processos de mineração é extensa, sendo que podem ser encontradas em todas as etapas da mineração, por exemplo, na extração da mina, nas etapas de beneficiamento na usina e no transporte entre pátios e navios no porto. Para exemplificar, a Vale, empresa multinacional no segmento de mineração, possui mais de 2.000 TCs, totalizando 1.000 km de extensão e aproximadamente 1,6 milhões de rolos.

Pelo seu extensivo uso, a correta manutenção

dos TCs se torna vital para o funcionamento pleno das indústrias das quais ela faz parte. Os rolos, por exemplo, são componentes importantes na estrutura de um transportador de correia, sendo encontrados em grandes quantidades ao longo de um mesmo trecho de um TC, sem que existam técnicas eficientes para seu monitoramento. Em um levantamento interno da Vale, foi apontado que entre 2014 e 2016, apenas nos portos de Ponta da Madeira e Tubarão, houveram mais de R\$ 2,7 milhões em perdas materiais causadas exclusivamente por incêndios gerados por super aquecimento de rolos defeituosos. Devido a essa importância e pelo papel fundamental desempenhado no processo produtivo, se faz necessário a realização de uma rotina de inspeção e manutenção cons-

tante nos componentes constituintes dos transportadores de correia.

Atualmente, essa inspeção acontece periodicamente de forma sensitiva, com operadores verificando os principais componentes dos transportadores de correias, utilizando a audição, visão e olfato para buscar falhas nos rolos. Esse método depende da experiência dos inspetores, de sua acuidade visual e auditiva e expõe os mesmos a várias adversidades naturais encontradas nos ambientes onde os TCs são normalmente instalados, como chuva, poeira, forte exposição ao sol, risco de acidentes com partes móveis, alto nível de ruído e necessidade de se percorrer longas distâncias. Diante desses problemas, que estão presentes mesmo nos casos mais simples de inspeção, deve-se buscar tecnologias que possam auxiliar nessa atividade, visando à elevação dos níveis de disponibilidade física e à preservação da saúde e segurança dos trabalhadores que executam as inspeções.

Na literatura são propostas diferentes soluções para o problema, que podem ser divididas em dois grupos se baseando no tipo de abordagem utilizada: o primeiro inclui as propostas com utilização de peças e sensores fixos ao longo dos TCs (Lodewijks et al., 2007; Yang, 2014); enquanto que o outro grupo apresenta as soluções que utilizam plataformas móveis com sensores acoplados e que se movimentam ao longo dos TCs (Lodewijks, 2004; Yang et al., 2016; Nascimento et al., 2017). Apesar de existir uma série de abordagens diferentes na literatura, é possível observar que não existe um sistema que se mostre como solução absoluta. Outro ponto a se notar é que resultados de testes em campo são escassos nos trabalhos avaliados, colocando em cheque o real funcionamento dos sistemas em aplicações nos severos ambientes dos TC.

Neste trabalho é proposto um dispositivo robótico para inspeção de rolos de TCs, composto por uma plataforma móvel, um braço manipulador, e um conjunto de sensores para a inspeção de rolos de correias transportadoras. Este tipo de robô é conhecido como manipulador móvel e foi inicialmente descrito para aplicações em ambientes perigosos e insalubres, (Clark, 1961). Em (Yamamoto and Yun, 1992) é proposta a utilização de métodos de controle de manipuladores móveis buscando coordenar a manipulação e a locomoção de forma integrada. Com o mesmo objetivo, em (Seraji, 1993) é proposta a utilização de uma matriz Jacobiana aumentada para o controle de *rovers* embarcados com braços robóticos. Em (Salazar-Sangucho and Adorno, 2014) é utilizada álgebra de quatérnios duais para modelar a cinemática de um manipulador móvel.

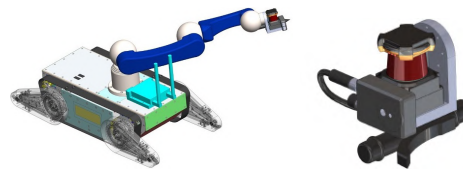
Para controlar o dispositivo proposto, foi desenvolvida uma estratégia de controle cinemático baseada em sua matriz jacobiana considerando seu corpo completo. A estratégia de controle foi va-

lidada por simulações, e testes preliminares confirmaram as funcionalidades do sistema diante de diferentes condições de operação.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é apresentado o sistema robótico, enquanto que na Seção 3 é descrito o procedimento de inspeção proposto. Na Seção 4 é apresentado o modelo cinemático direto e diferencial, uma estratégia de controle para o comando de corpo completo, e resultados em simulação. Na Seção 5 estão descritos os testes preliminares em campo, e na Seção 6 são discutidos os resultados e trabalhos futuros.

2 Dispositivo robótico proposto

Para permitir que o sistema utilize as mesmas estruturas laterais (*decks*) usadas pelos operadores durante a inspeção, é necessário que o robô possua boa capacidade de mobilidade. Sendo assim, o dispositivo robótico proposto é composto por uma plataforma móvel capaz de se locomover em diferentes terrenos, incluindo pavimento, terra, lama, grades metálicas e pisos cobertos com pelotas. O robô também deve ser capaz de superar obstáculos e subir e descer escadas com diferentes inclinações. São embarcados na plataforma móvel um braço robótico com 6 graus de liberdade, além de dispositivos de instrumentação, incluindo GPS e sensor inercial (IMU), *scanner laser*, câmera térmica e RGB, microfone e ponteira de toque onde será acoplado um sensor de vibração.



(a) Plataforma robótica. (b) Arranjo de sensores.

Figura 1: Esquema representativo da plataforma robótica e arranjo de sensores propostos.

2.1 Plataforma móvel

Visando atender os requisitos de locomoção suapracitados, é proposta uma plataforma (Figura 1-a) baseada em robôs do tipo EOD (*Explosive Ordnance Disposal*), utilizados por militares para auxílio no desarmamento de artefatos explosivos. A plataforma se locomove por meio de esteiras laterais, acionadas individualmente por dois motores distintos, que segundo (Kang et al., 2003), fornecem mobilidade superior para plataformas robóticas que navegam em terrenos irregulares, quando comparados à plataformas que utilizam rodas. Esse mecanismo de locomoção permite que o robô se movimente para frente e para trás, em torno de seu próprio eixo e faça curvas.

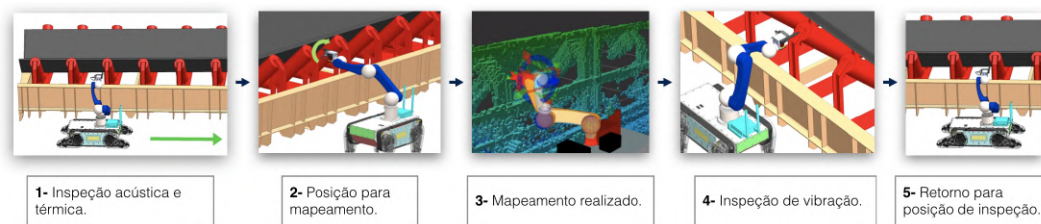


Figura 2: Fluxo proposto para inspeção de rolos.

Dois pares de braços de alavanca rotacionais, posicionados nas extremidades do robô, são utilizados para transpor obstáculos e variar a altura da plataforma. Cada conjunto de alavancas é acionado individualmente, cuja rotação é efetuada por dois motores distintos. Esses conjuntos também são cobertos por esteiras, com acionamento solidário ao sistema de esteiras lateral.

2.2 Sensores e atuadores embarcados

Durante as operações de inspeção, o robô se locomove ao longo dos TCs, gravando os respectivos ruídos, medindo a temperatura dos rolos e tocando mancais e eixos de rolos visando medir vibrações nas estruturas inspecionadas.

O manipulador robótico de seis graus de liberdade embarcado na plataforma é responsável por carregar todos os sensores utilizados na inspeção e também por garantir o correto posicionamento dos mesmos.

O planejamento de trajetória do braço manipulador é realizado com base no mapa gerado por um *laser scanner* planar (LIDAR), que combinado com o movimento de rotação do punho do braço robótico, é capaz de realizar um mapeamento em nuvem de pontos tridimensional do ambiente.

A medição de temperatura se dá por meio de uma câmera térmica posicionada de modo que capture imagens de todos os rolos apoiados em um determinado cavalete. Como a plataforma percorre toda a extensão do transportador de correia, todos os rolos terão sua temperatura medida.

A medição de som é realizada com um microfone, para que esse sinal acústico seja comparado com padrões sonoros que possam indicar situações de rolos defeituosos.

A inspeção vibratória é efetuada por uma ponteira de toque, que contém um sensor de vibração em seu interior. Essa inspeção é viabilizada pelo movimento do braço robótico, que terá sua trajetória planejada de modo que a ponteira encoste fisicamente no cavalete, mancais ou eixos de rolos a serem avaliados.

Os sensores estão posicionados em um arranjo mecânico (Figura 1(b)) instalado no punho do manipulador robótico. Essa estrutura mantém os sensores tal que o braço robótico é capaz de fa-

cilmente posicioná-los para aquisição de dados em um ponto designado.

3 Inspeção de rolos

O principal problema enfrentado na inspeção de componentes de TCs, incluindo a correia, as polias e os rolos, é que eles estão em constante movimento. E como os rolos e as polias apenas podem ser avaliados enquanto estão rodando, é necessário que a medição realizada esteja focada em grandezas acústicas, de vibração e térmicas.

Para o monitoramento acústico e térmico, soluções como a câmera térmica e o microfone permitem que as medições sejam feitas sem necessidade de tocar as peças. Porém, para analisar a vibração do sistema é interessante que exista contato entre o sensor e a peça a ser estudada. Dada a importância de um funcionamento pleno do TC durante a inspeção, essa ação se torna crítica.

Levando em consideração as dificuldades impostas ao sistema, é proposto o seguinte fluxo, ilustrado na Figura 2, para a inspeção dos rolos:

1 - A plataforma se locomoverá ao lado do TC. Enquanto se movimenta, o braço se mantém posicionado de forma a conseguir capturar a imagem dos rolos e gravar o áudio do ruído emitido de forma efetiva.

2 - Enquanto é realizada a captura das imagens e do som, as mesmas são analisadas por um especialista, em caso de teleoperação; ou por um sistema de processamento de sinais e imagem, para o caso de inspeção autônoma. Quando é detectado algum tipo de irregularidade como sinal acústico fora do padrão esperado ou temperatura acima do normal nos rolos, o robô é parado próximo ao ponto de interesse para realizar uma inspeção mais apurada.

3 - Durante essa segunda inspeção, aplicada a um rolo em específico, é necessária a realização do toque do sensor de vibração em alguns pontos da estrutura para analisar de forma mais completa a situação do rolo. Para realizar esse toque de forma segura, o braço se posiciona em frente à área de interesse e então o sensor *laser* planar é girado de forma a construir um mapa tridimensional que representa o espaço de trabalho para o braço robótico, constituído por uma seção do TC.

4 - Para o caso de um sistema teleoperado, o especialista seleciona os pontos utilizando uma interface que apresenta um mapa tridimensional e a imagem da câmera RGB, enquanto que para o sistema autônomo, seria utilizado uma câmera de profundidade em conjunto com processamento de imagens e nuvem de pontos para encontrar a localização espacial dos pontos a serem tocados. Uma vez que esses pontos estão selecionados, é realizado o toque do sensor utilizando um algoritmo de planejamento de trajetória com desvio de obstáculos para que não ocorra colisão com alguma parte do TC.

5 - Por fim, com os dados de temperatura, sinal acústico e vibração, o especialista ou um sistema para processamento dessas informações é capaz de diagnosticar a situação do rolo, e notificar diretamente no sistema da empresa se é necessário algum tipo de manutenção. Já realizada a inspeção o braço volta para a posição de inspeção ao longo da correia, calculando uma trajetória que evite o contato com qualquer obstáculo.

4 Controle e modelagem cinemática

O dispositivo robótico proposto é composto por uma base móvel e um manipulador, conjunto esse que é conhecido como um manipulador móvel. Ele deve realizar uma missão como se segue: mover ao longo do TC com o efetuador em uma orientação fixa, parar, tocar uma parte específica da estrutura, retornar a posição de monitoramento anterior e voltar a se mover. Nesta seção é apresentada a análise cinemática do sistema robótico proposto.

A base móvel é um veículo traicionado por esteiras com arquitetura *skid-steer*. Para simplificar o controle, a plataforma foi modelada como um robô móvel de tração diferencial, ignorando os efeitos de escorregamento e os braços de alavanca. Dessa forma, é possível representar a plataforma móvel como duas juntas prismáticas, que representam o deslocamento nos eixos x e y , e uma junta de rotação que caracteriza a guinada. O manipulador é composto por seis juntas de rotação. Na Figura 3 é apresentado o esquemático do manipulador móvel simplificado.

4.1 Cinemática direta

A cinemática direta fornece um mapeamento entre a pose das juntas e do efetuador $x = (p_{0p}, R_{0p})$, onde $p_{0p} \in \mathbb{R}^3$ dá a posição e $R_{0p} \in SO(3)$ é a matriz de rotação que representa a orientação do sistema de coordenadas do efetuador O_p com respeito ao sistema de coordenadas inercial O_0 .

O sistema robótico simplificado (Figura 3) possui nove graus de liberdade considerando o corpo completo da plataforma. A posição do efetuador é obtida pela Equação (1):

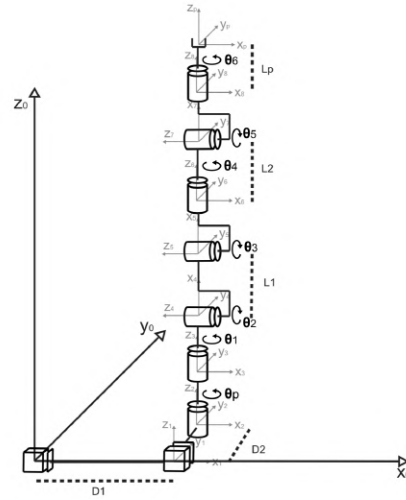


Figura 3: Esquemático do manipulador móvel simplificado.

$$(\vec{p}_{0p})_0 = \overbrace{(\vec{p}_{01})_0 + (\vec{p}_{12})_0 + (\vec{p}_{23})_0}^{\text{Plataforma móvel}} + \overbrace{(\vec{p}_{34})_0 + \dots + (\vec{p}_{8p})_0}^{\text{Manipulador}} \quad (1)$$

Da equação (1), a posição \vec{p}_{0p} é dada por:

$$(\vec{p}_{0p})_0 = D_1x + D_2y + R_{04}L_1y + R_{06}L_2z + R_{08}L_pz, \quad (2)$$

onde $x = [1, 0, 0]^T$, $y = [0, 1, 0]^T$, $z = [0, 0, 1]^T$. Perceba que $R_{0p} = R_{01}R_{12} \dots R_{78}R_{8p}$; a mesma representação é válida para obter R_{04} , R_{06} e R_{08} na Equação (2).

4.2 Cinemática diferencial

A cinemática diferencial relaciona as velocidades linear e angular das juntas às velocidades do efetuador, por meio do mapeamento:

$$\dot{x} = J(\theta)\dot{\theta}, \quad (3)$$

onde $J(\theta)$ é a matriz Jacobiana geométrica. A pose derivada $\dot{x} \in \mathbb{R}^6$ corresponde a velocidade linear \dot{p} e angular ω do efetuador em relação as velocidades das juntas $\dot{\theta}$.

A matriz Jacobiana $J_s(\theta_s) \in \mathbb{R}^{6 \times 9}$ que representa o manipulador móvel simplificado é definida como:

$$J_s(\theta_s) = \begin{bmatrix} (\vec{x}_0)_0 & (\vec{y}_1)_0 & (\vec{z}_2)_0 \times (\vec{p}_{2p})_0 & \dots & (\vec{z}_8)_0 \times (\vec{p}_{8p})_0 \\ 0 & 0 & (\vec{z}_2)_0 & \dots & (\vec{z}_8)_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde $\dot{\theta}_s$ representa as velocidades das juntas:

$$\dot{\theta}_s = [\dot{d}_1, \dot{d}_2, \dot{\theta}_p, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6]^T. \quad (5)$$

O sistema real, na verdade, possui oito graus efetivos de liberdade, composto pelas duas esteiras e pelas seis juntas de rotação do braço, o que leva a:

$$\dot{\theta} = [\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6]^T, \quad (6)$$

LINK e MATLAB. A simulação consiste em seguir uma trajetória que representa uma rotina de inspeção de um rolo: o robô inicia em uma configuração aleatória e se posiciona na configuração de monitoramento no segundo 140; em seguida, ele se move ao longo do TC no eixo x a 3,3 cm/s com orientação e posição em y e z fixas, entre 140s e 200s; então, o robô para e toca um rolo movendo o efetuador ao longo do eixo y a 1,6 cm/s com orientação e posição fixas no eixo x e z entre os segundos 200 e 250; por fim, o robô volta a posição de monitoramento e segue movendo-se ao longo do TC (250 a 300s). É importante notar que o sistema será utilizado a baixas velocidades, o que exige a necessidade da utilização de outras técnicas de controle como controle dinâmico.

Os movimentos do robô obtidos na simulação estão ilustrados na Figura 5, onde a linha preta representa a trajetória desejada. O erro entre a trajetória desejada e a executada, iniciando da posição inicial de monitoramento (140s), pode ser visto na Figura 6. Pode-se observar que o erro de orientação é menor que 0,1 graus e o erro de posição nunca excede 0,5 milímetros. Considerando que a tarefa mais crítica é a de tocar o eixo do rolo que possui 2 cm de diâmetro, o erro apresentado pode ser considerado aceitável. Na Figura 7 são apresentadas as velocidades das juntas durante a missão; é perceptível que o controle de corpo completo utiliza todas as juntas para realizar a tarefa de seguimento de trajetória.

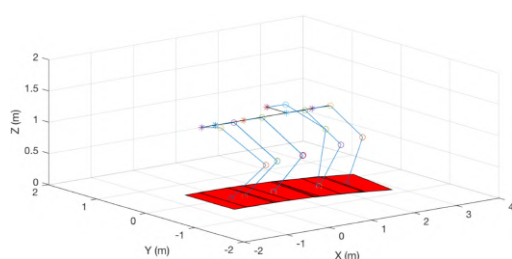


Figura 5: Simulação do sistema realizando uma rotina de inspeção.

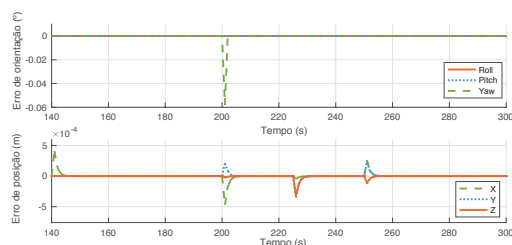


Figura 6: Erro obtido durante missão simulada.

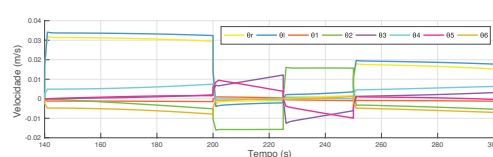


Figura 7: Velocidade das juntas para missão simulada.

5 Implementação e testes

Buscando conhecer as dificuldades enfrentadas no campo pelos inspetores e realizar um teste de conceito para verificar a funcionalidade do dispositivo proposto, foi montado um protótipo formado pelos seguintes componentes:

Plataforma móvel - Foi utilizado o robô descrito na Seção 2. As dimensões da plataforma são: 48 cm de largura, 73 cm de comprimento, 25 cm de altura e 45 kg de peso.

Braço Robótico - O braço robótico utilizado foi o LWA 4P da fabricante SCHUNK, dada a sua praticidade de uso e possibilidade de embarcar na plataforma móvel;

Câmera Térmica e RGB - A FLIR AX8 é um dispositivo que possui uma câmera RGB e uma térmica no mesmo invólucro, com grau de proteção IP-67;

Lidar - O UTM-30LX, fabricado pela Hokuyo, é um *laser scan* planar com leitura de 270°;

Microfone - Foi utilizado um microfone convencional com leitura entre 20 a 20 kHz;

IMU + GPS - O Xsens Mti-G-710 é robusto e preciso. Possui sensores de inércia, acelerômetro, giroscópio e GPS em uma só unidade;

Ponteira de toque - Utilizada para simular o sensor de vibração.

Uma série de testes foram realizados em campo, expondo o robô a várias adversidades como: chuva, vento, poeira e alta insolação. Os testes foram realizados de maneira teleoperada seguindo o *workflow* proposto na seção 3. Foram realizados oito horas de testes em TCs de cinco ambientes diferentes, na sua maioria em funcionamento, no porto de Tubarão em Vitória, Brasil, durante quatro dias.

Devido a restrições de segurança dentro da área operacional, a estratégia cinemática de corpo completo para controlar o robô não pôde ser testada em campo. Dessa forma, foi utilizado um sistema para teleoperação implantado no *Robot Operating System* (ROS) (Quigley et al., 2009) para comandar o robô. A plataforma móvel foi controlada com a utilização de um joystick, enquanto que o manipulador foi controlado pelo *MoveIt!* (Chitta et al., 2012), um pacote de ROS. O *MoveIt!* utiliza o *Rapidly-Exploring Random Trees* (RRT) proposto em (LaValle and Kuffner Jr, 2001) em conjunto com o *Octomap* criado a



Figura 8: Plataforma móvel atravessando um trilho de trem, locomovendo-se em uma pilha de pelotas e escalando um lance de escadas.

partir da leitura realizada pelo *Lidar* para encontrar uma trajetória livre de colisões. Dessa forma, foi possível realizar o toque da ponteira de vibração e o posicionamento da plataforma sensorial nos pontos desejados.

Uma imagem composta de um modelo simplório da plataforma robótica ao lado de um mapa tridimensional de um trecho do TC gerado pelo *Octomap* durante operação em campo é mostrada na Figura 9. A medida que o braço robótico gira e o *laser* mapeia a superfície do TC, o modelo tridimensional é gerado na interface do *MoveIt!*, permitindo o posicionamento do manipulador robótico de maneira interativa nos pontos de interesse de inspeção.

Durante os testes o robô se mostrou eficiente em diversas situações como se locomover de forma bastante estável no barro, grama, pilhas de pelotas, e em grades metálicas (mesmo molhadas); subir e descer escadas de concreto e de grades de diferentes inclinações; ultrapassar obstáculos encontrados nos locais das inspeções como tocos, trilhos, pedras e outros materiais (Figura 8).

A análise dos dados obtidos durante a locomoção do dispositivo se mostrou efetiva, sendo possível ver com clareza a imagem térmica dos pontos de interesse dos rolos. Na Figura 9 é apresentada a análise termográfica realizada em uma lateral do transportador, onde podem-se ver dois rolos: o da esquerda em falha e o da direita em condições normais. Analisando o gráfico do sinal sonoro (Figura 9) também é possível notar a diferença entre um rolo em condição normal e um que apresentava falhas que apresenta um ruído com maior amplitude.

Além disso, foi possível realizar o toque da ponteira diversas vezes, tanto no cavalete do rolo como no seu eixo de rolamento. Cabe destacar que o eixo possui apenas 2 cm de diâmetro, e que a habilidade de tocá-lo é um dos diferenciais do projeto frente a outras soluções móveis como a utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs). Também foram realizados alguns procedimentos de inspeção na parte interna do TC, para se aproximar do rolo inferior.

Considerando os resultados obtidos nos testes de conceito, é possível afirmar que o dispositivo proposto tem plena capacidade de operar nos am-

bientes que lhe serão destinados. Além disso, a sua capacidade de sensoriamento pôde ser testada e comprovada.

Os testes de conceito foram fundamentais para verificar as dificuldades que serão enfrentadas no ambiente operacional do robô e para levantar uma significativa quantidade de informação que irá auxiliar no desenvolvimento de uma nova versão do dispositivo. Os resultados obtidos indicam que o dispositivo possui capacidade de atuar no seu ambiente de operação. Também, suas capacidades sensíveis puderam ser validadas.

Os maiores problemas enfrentados durante os testes em campo estão relacionados a operação do manipulador. A trajetória gerada pelo algoritmo do RRT não garante um caminho em linha reta entre o ponto inicial e ponto de toque, gerando movimentos inesperados do efetuador durante a medição de vibração. Esse comportamento indesejado reforça a utilização da estratégia de controle de corpo completo proposta, que realiza trajetórias simples e diretas que otimizam o processo de inspeção.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou os desafios enfrentados na inspeção de rolos de transportadores de correias. Buscando solucionar esse problema, foi proposto a utilização de uma plataforma móvel acoplada de um braço robótico e um conjunto de sensores para realizar a inspeção de forma teleoperada ou autônoma.

O sistema proposto apresenta importantes vantagens comparados a inspeção convencional feita por operadores. A análise acústica e de vibração permite acompanhar a vida útil do rolos, o que possibilita a predição de falhas e a otimização das rotinas de manutenção. A inspeção de temperatura pode indicar um problema iminente como um incêndio e reportar a necessidade de um reparo urgente. Além disso, o sistema remove o operador de áreas de risco e sua implementação não requer nenhuma modificação ou instalação extra nas estruturas dos TCs.

Baseado no modelo cinemático do manipulador móvel, foi apresentada uma estratégia de controle e simulações onde o dispositivo robótico

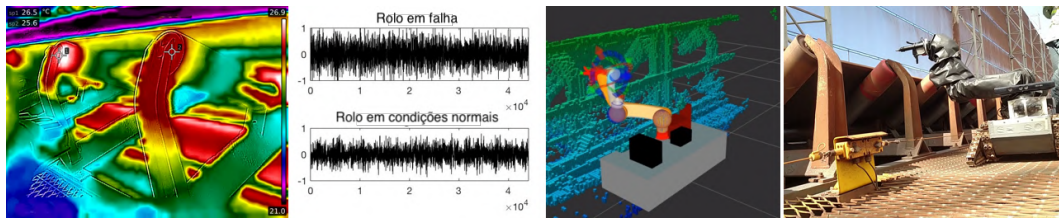


Figura 9: Dados obtidos durante um rotina de inspeção. A figura apresenta a imagem térmica e o gráfico da resposta acústica de um rolo; uma imagem da interface do *MoveIt!*, composta por um mapa tridimensional do TC; e a ponta de toque se aproximando ao eixo de um rolo.

é comandado considerando seu corpo completo. Testes de campo teleoperados permitiram verificar a aplicabilidade do dispositivo em diversas situações, assim como sua capacidade de realizar aquisição de dados e superar diferentes tipos de obstáculos encontrados no ambiente dos TCs.

O próximo passo desta pesquisa consiste na validação da estratégia de controle cinemático de corpo completo por meio de experimentos em campo. Para isso, deve ser considerado sua arquitetura *skid-steer* e os problemas de escorregamento associados a ela. Outro ponto a ser investigado na estratégia de controle é explorar a redundância cinemática do sistema para realização de tarefas secundárias, como desvio de obstáculos e otimização do consumo energético do robô. Estudos futuros também devem estar focados em algoritmos de processamento de sinais para detectar e classificar falhas automaticamente.

Referências

- Chitta, S., Sucas, I. and Cousins, S. (2012). MoveIt![ros topics], *IEEE Robotics & Automation Magazine* **19**(1): 18–19.
- Clark, J. W. (1961). Mobotry: The new art of remote handling, *IRE Transactions on Vehicular Communications* **10**(2): 12–24.
- Kang, S., Cho, C., Lee, J., Ryu, D., Park, C., Shin, K.-C. and Kim, M. (2003). Robhaz-dt2: Design and integration of passive double tracked mobile manipulator system for explosive ordnance disposal, *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, Vol. 3, IEEE, pp. 2624–2629.
- LaValle, S. M. and Kuffner Jr, J. J. (2001). Randomized kinodynamic planning, *The International Journal of Robotics Research* **20**(5): 378–400.
- Lodewijks, G. (2004). Strategies for automated maintenance of belt conveyor systems., *Bulk Solids Handling* **24**(1): 16–22.
- Lodewijks, G., Duinkerken, M., de la Cruz, A. L. and Veeke, H. (2007). The application of rfid technology in belt conveyor systems, *Proceedings of BeltCon* **14**: 1–17.
- Nakamura, Y. and Hanafusa, H. (1986). Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control, *Journal of dynamic systems, measurement, and control* **108**(3): 163–171.
- Nascimento, R., Carvalho, R., Delabrida, S., Bianchi, A. G. C., Oliveira, R. A. R. and Garcia, L. G. U. (2017). An integrated inspection system for belt conveyor rollers - advancing in an enterprise architecture, *Proceedings of the 19th International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 2: ICEIS,, INSTICC, SciTePress*, pp. 190–200.
- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R. and Ng, A. Y. (2009). Ros: an open-source robot operating system, *ICRA workshop on open source software*, Vol. 3, Kobe, p. 5.
- Salazar-Sangucho, F. R. and Adorno, B. V. (2014). Modelagem e controle de corpo completo usando quatérnios duais para um manipulador móvel, *Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte*, pp. 1544–1551.
- Seraji, H. (1993). An on-line approach to coordinated mobility and manipulation, *Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 28–35.
- Yamamoto, Y. and Yun, X. (1992). Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator, *Decision and Control, 1992., Proceedings of the 31st IEEE Conference on*, IEEE, pp. 2643–2648.
- Yang, B. Y. (2014). Fibre optic conveyor monitoring system, *MPhil Thesis, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland*.
- Yang, W., Zhang, X. and Ma, H. (2016). An inspection robot using infrared thermography for belt conveyor, *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2016 13th International Conference on*, IEEE, pp. 400–404.

Apêndice B - Patente

Patente depositada sob o título de “Dispositivo robótico e método para inspeção de componentes de um transportador de correia”.



**Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de
Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT**

Número do Processo: BR 10 2018 010213 3

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 2

Nome ou Razão Social: VALE S.A.

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 33592510000154

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Pessoa Jurídica

Endereço: Torre Oscar Niemeyer - Praia de Botafogo, nº 186, sala 701 a sala
1901 - Botafogo

Cidade: Rio de Janeiro

Estado: RJ

CEP: 22250-145

País: Brasil

Telefone: 031 39162845

Fax:

Email: claudia.silva.oliveira@vale.com

Depositante 2 de 2

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO — UFRJ

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 33663683000116

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Av. Pedro Calmon, 550 – prédio da Reitoria, 2ª andar, Cidade
Universitária

Cidade: Rio de Janeiro

Estado: RJ

CEP: 21941-901

País: BRASIL

Telefone:

Fax:

Email:

**PETICIONAMENTO
ELETRÔNICO**

Esta solicitação foi enviada pelo sistema Peticionamento Eletrônico em 18/05/2018 às 17:04, Petição 870180041941

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): DISPOSITIVO ROBÓTICO E MÉTODO PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES DE UM TRANSPORTADOR DE CORREIA

Resumo: A PRESENTE INVENÇÃO SE REFERE A UM DISPOSITIVO ROBÓTICO (1) PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES (8, 9, 10) DE UM TRANSPORTADOR DE CORREIA (11) COMPREENDENDO UMA PLATAFORMA MÓVEL (2) E UM BRAÇO ROBÓTICO (3) TENDO UMA PRIMEIRA EXTREMIDADE (4) ACOPLADA À PLATAFORMA MÓVEL (2) E UMA SEGUNDA EXTREMIDADE (5), EM QUE O BRAÇO ROBÓTICO (3) COMPREENDE UMA ESTRUTURA ARTICULADA CONFIGURADA PARA CONDUZIR A SEGUNDA EXTREMIDADE (5) A CONTATAR PELO MENOS UM DOS COMPONENTES (8, 9, 10) DO TRANSPORTADOR DE CORREIA (11) E EM QUE O DISPOSITIVO ROBÓTICO (1) COMPREENDE UM SENSOR DE VIBRAÇÕES (6), UMA CÂMERA (14), UM MICROFONE (15) E UM SCANNER A LASER (16) ACOPLADOS À SEGUNDA EXTREMIDADE (5) DO BRAÇO (3). A PRESENTE INVENÇÃO TAMBÉM REVELA UM MÉTODO PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES (8, 9, 10) DE UM TRANSPORTADOR DE CORREIA (11) UTILIZANDO UM DISPOSITIVO ROBÓTICO (1), COMPREENDENDO A ETAPA DE: OBTER DADOS DE TEMPERATURA E/OU DE RÚIDO DE PELO MENOS UM DOS COMPONENTES (8, 9, 10) DO TRANSPORTADOR DE CORREIA (11); E, CASO OS DADOS DE TEMPERATURA E/OU DE RÚIDO DE PELO MENOS UM DOS COMPONENTES (8, 9, 10) ESTEJAM FORA DE UMA FAIXA DE VALORES PRÉ-DETERMINADA, O MÉTODO COMPREENDE AINDA AS ETAPAS DE: CONDUZIR UMA SEGUNDA EXTREMIDADE (5) DE UM BRAÇO ROBÓTICO (3) DO DISPOSITIVO ROBÓTICO (1) PARA CONTATAR O PELO MENOS UM DOS COMPONENTES (8, 9, 10) DO TRANSPORTADOR DE CORREIA (11), EM QUE O BRAÇO ROBÓTICO (3) COMPREENDE UMA ESTRUTURA ARTICULADA; E OBTER DADOS DE VIBRAÇÃO DO PELO MENOS UM DOS COMPONENTES (8, 9, 10) ATRAVÉS DO SENSOR DE VIBRAÇÕES (6).

Figura a publicar: 2

“DISPOSITIVO ROBÓTICO E MÉTODO PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES DE UM TRANSPORTADOR DE CORREIA”

CAMPO TÉCNICO

[0001] A presente invenção está relacionada à inspeção de transportadores de correia. Mais especificamente, a presente invenção se trata de um dispositivo robótico e de um método para inspeção de componentes de um transportador de correia.

DESCRIÇÃO DO ESTADO DA TÉCNICA

[0002] Transportadores de correia são equipamentos presentes em diversos ramos industriais. Tais transportadores tipicamente possuem componentes girantes, como rolos e tambores, e componentes resistentes ao desgaste, como correias, raspadores e revestimentos de chutes. Os componentes dos transportadores de correia sofrem avarias ao longo de sua vida útil, em geral causadas por desalinhamento, fricção, abrasão, erosão, esforços inerentes à movimentação de material, e condições extremas do ambiente em que operam.

[0003] As avarias nos componentes girantes podem ser detectadas e monitoradas, por exemplo, através da medição de ruídos e vibrações nos eixos e mancais, e também pela medição de temperatura dos eixos, carcaças e rolamentos. Já as avarias dos componentes resistentes ao desgaste podem ser identificadas e monitoradas, por exemplo, por imagem, escaneamento a laser e ultrassom.

[0004] Geralmente, os transportadores de correia e seus componentes são inspecionados periodicamente por operadores que se locomovem através de acessos instalados ao longo das correias. Esta operação de inspeção depende substancialmente do conhecimento e da sensibilidade do operador, já que este deve detectar e reconhecer ruídos e vibrações que tipicamente indiquem algum comportamento anômalo. Em relação à medição de temperaturas, muitas vezes são utilizados instrumentos tais como pirômetros e câmeras térmicas.

[0005] Algumas características dos transportadores de correia

dificultam as operações de inspeção por operadores, por exemplo, as extensas dimensões das correias, a quantidade elevada de componentes a serem mensurados, bem como a existência de restrições de acesso em determinados componentes destes. Outro fator que afeta a qualidade de inspeção destes transportadores é o fato destas operações serem realizadas, em geral, a céu aberto, o que gera cansaço e redução cognitiva dos operadores, pois estes necessitam se deslocar por longas distâncias estando sujeitos a intempéries.

[0006] Nesse sentido, dispositivos robóticos para a inspeção de transportadores de correias são conhecidos na técnica. O documento WO2015/009467 revela um método para inspeção de correias transportadoras utilizando um veículo não tripulado se locomovendo de um lado da correia, carregando uma estrutura de sensores, incluindo câmeras RGB, térmica e infravermelha, mais instrumentos acústicos. O veículo não tripulado proposto pode ser do tipo aéreo ou terrestre, neste caso utilizando rodas ou esteiras. A estrutura de sensores pode ser instalada no veículo através de um mecanismo de *pan & tilt*, instalado diretamente no veículo, ou acoplado a um braço robótico. O veículo pode ser controlado de forma teleoperada ou autônoma, neste caso utilizando navegação baseada em GPS. No entanto, o veículo descrito por este documento da técnica anterior não explicita a utilização de um braço robótico articulado compreendendo sensores de vibrações em sua extremidade para inspecionar os componentes do transportador através de contato mecânico, inviabilizando a aquisição de dados vibracionais acurados do funcionamento do transportador de correias. Tal documento tampouco explicita como é o mecanismo de locomoção do veículo terrestre.

[0007] Além disso, certos componentes do transportador podem estar localizados em locais com obstrução visual com relação a posição do veículo não tripulado do documento WO2015/009467. Nestes casos, os sensores posicionados no veículo não seriam capazes de obter leituras precisas de tais componentes.

[0008] Nota-se que ambientes industriais são, muitas vezes, agressivos e geralmente possuem terreno acidentado com diversos obstáculos, como escadas, trilhos e desníveis. Assim, é de grande relevância que o veículo terrestre possua um sistema de locomoção eficiente para este tipo de terreno.

[0009] Dessa forma, surge a necessidade de um dispositivo robótico que seja capaz de mensurar vibrações de componentes de transportadores de correia por meio de contato mecânico entre sensores de vibração e tais componentes de transportadores, além de ser capaz de obter leituras precisas de componentes de transportadores quando estes estão localizados em locais de difícil acesso ou visualização.

[00010] Surge ainda necessidade de um dispositivo robótico que possua um sistema de locomoção versátil e eficiente, que o permita acessar todas as áreas operacionais da planta industrial.

OBJETIVOS DA INVENÇÃO

[00011] O objetivo da presente invenção é prover um dispositivo robótico que possa mensurar temperatura, ruídos e vibrações de componentes de um transportador de correia.

[00012] O objetivo da presente invenção é prover um dispositivo robótico capaz de obter medições precisas das condições de operação de componentes de transportadores quando estes estão localizados em locais de difícil acesso ou visualização.

[00013] Outro objetivo da presente invenção é prover um método para inspeção de componentes de um transportador de correia utilizando um dispositivo robótico que possa mensurar temperatura, ruídos e vibrações de tais componentes.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DA INVENÇÃO

[00014] A presente invenção revela um dispositivo robótico para inspeção de componentes de um transportador de correia compreendendo uma plataforma móvel e um braço robótico tendo uma primeira extremidade

acoplada à plataforma móvel e uma segunda extremidade. O braço robótico compreende uma estrutura articulada configurada para conduzir a sua segunda extremidade a contatar pelo menos um dos componentes do transportador de correia. O dispositivo robótico compreende um sensor de vibrações acoplado à segunda extremidade do braço de modo a possibilitar a medição da vibração dos componentes de um transportador de correia.

[00015] A presente invenção também revela um método para inspeção de componentes de um transportador de correia utilizando um dispositivo robótico, compreendendo a etapa de: obter dados de temperatura e/ou de ruído de pelo menos um dos componentes do transportador de correia; e, caso os dados de temperatura e/ou de ruído de pelo menos um dos componentes estejam fora de uma faixa de valores pré-determinada, o método compreende ainda as etapas de: conduzir uma segunda extremidade de um braço robótico do dispositivo robótico para contatar fisicamente pelo menos um dos componentes do transportador de correia, em que o braço robótico compreende uma estrutura articulada; e obter dados de vibração de pelo menos um dos componentes através do sensor de vibrações.

BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[00016] As figuras referentes à presente invenção são sumariamente descritas conforme mostrado a seguir:

Figura 1 – Dispositivo robótico realizando uma inspeção em componentes de um transportador de correia;

Figura 2 – Vista em perspectiva do dispositivo robótico para inspeção de componentes de um transportador de correia;

Figura 3 – Conjunto de sensores do dispositivo robótico para inspeção de componentes de um transportador de correia.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[00017] A descrição que se segue partirá de uma concretização preferencial da invenção, aplicada a um dispositivo robótico e a um método

para inspeção de componentes de um transportador de correia.

[00018] A presente invenção apresenta um dispositivo robótico para inspeção de componentes de um transportador de correia compreendendo uma plataforma móvel dotada de rodas e esteiras para a locomoção, e um braço robótico tendo uma primeira extremidade acoplada à plataforma móvel e uma segunda extremidade, em que o braço robótico compreende uma estrutura articulada configurada para conduzir a segunda extremidade a contatar pelo menos um dos componentes do transportador de correia e em que o dispositivo robótico compreende um sensor de vibrações acoplado à segunda extremidade do braço.

[00019] A Figura 1 ilustra esquematicamente como o dispositivo robótico 1 pode realizar operações de inspeção em transportadores de correia 11. O transportador de correia 11 preferencialmente compreende uma cinta sem fim 7, que é estendida entre dois tambores de acionamento (não mostrados), sendo um motriz e o outro de retorno, e uma estrutura interna incluindo perfis laminados e rolos justapostos, instalados em cavaletes 8, sobre os quais a cinta 7 desliza, de modo a possibilitar o traslado do minério posicionado sobre a correia.

[00020] Preferencialmente, cada cavalete 8 suporta três rolos, sendo dois destes rolos externos 9 e instalados de modo inclinado e um rolo interno 10 instalado paralelamente ao plano horizontal. Durante a operação do transportador de correia 11, os tambores de acionamentos são rotacionados de modo a movimentar a cinta 7, gerando conseqüentemente uma rotação dos rolos 9, 10, cujos eixos compreendem rolamentos que estão apoiados em suportes dos cavaletes 8.

[00021] A Figura 2 ilustra esquematicamente um dispositivo robótico para a inspeção de componentes de um transportador de correia.

[00022] A presente invenção revela um dispositivo robótico 1 compreendendo uma plataforma móvel 2 e um braço robótico 3 tendo uma

primeira extremidade 4 acoplada à plataforma móvel 2 e uma segunda extremidade 5. O braço robótico 3 do dispositivo 1 compreende uma estrutura articulada configurada capaz de se articular para conduzir a segunda extremidade 5 a alcançar ou contatar um ponto de interesse, tal como um dos componentes 8, 9, 10 do transportador de correia 11. O dispositivo robótico 1 ainda compreende um sensor de vibrações 6 acoplado à segunda extremidade 5 do braço 3.

[00023] Preferencialmente, a plataforma móvel 2 compreende rodas e esteiras 12, e braços de alavanca 13 para permitir que o dispositivo robótico 1 se locomova através de acessos do transportador de correia 11, bem como consiga ultrapassar obstáculos. Ainda, os braços de alavanca 13 podem ser acionados individualmente, assim permitindo que o dispositivo robótico 1 suba e desça escadas tipicamente presentes ao longo dos acessos. As rodas e esteiras 12 da plataforma móvel 2 permitem que o dispositivo robótico 1 também se locomova em diferentes terrenos, como pavimento, terra, lama, grades e chapas metálicas e pisos cobertos com pelotas. Alternativamente, a plataforma móvel 2 possui braços de alavanca 13 articulados dotados também de esteiras, otimizando a superação de obstáculos e a subida e descida de escadas. O dispositivo robótico 1 preferivelmente possui fonte de energia interna e sua comunicação com a base de comando é realizada de modo sem fio, não necessitando que o mesmo esteja conectado a cabos durante as inspeções.

[00024] Ademais, a estrutura articulada do braço robótico 3 preferivelmente compreende uma pluralidade de juntas 17 configuradas para definir uma posição e uma orientação do braço robótico 3 e dos sensores acoplados a este. Preferencialmente, o braço robótico 3 possui pelo menos seis graus de liberdade, de modo a definir a posição e a orientação do conjunto de sensores no ambiente tridimensional. Por exemplo, o braço robótico 3 compreende seis juntas 17 que podem apresentar redundâncias em determinados graus de liberdade.

[00025] A Figura 3 ilustra uma outra concretização preferencial da presente invenção, em que um conjunto de sensores é acoplado à segunda extremidade 5 do braço robótico 3.

[00026] Na concretização preferencial da Figura 3, o dispositivo robótico 1 ainda compreende uma ponteira de medição acoplada ao sensor de vibrações 6.

[00027] Alternativamente, o dispositivo robótico 1 compreende adicionalmente um ou mais dentre: pelo menos uma câmera 14, um microfone 15, encoders, um sistema de posicionamento global (GPS), um sensor inercial e câmeras de profundidade, de forma a permitir uma navegação semiautônoma ou autônoma deste dispositivo robótico 1. Estes sensores podem estar acoplados à plataforma móvel 2 ou acoplados ao longo do braço robótico 3, inclusive em sua segunda extremidade 5. Neste caso, através da movimentação do braço 3, é possível reposicionar e reorientar o conjunto de sensores utilizados para a navegação. Preferencialmente, há pelo menos uma câmera 14 de tipo RGB ou térmica.

[00028] De acordo com a concretização da Figura 3, o braço robótico 3 também é configurado de forma que pelo menos uma câmera 14 consiga fornecer imagens dos componentes do transportador de correia 11. Em uma situação onde não é necessária a medição da vibração dos componentes por meio do contato do sensor de vibração 6 com um dos componentes 8, 9, 10 do transportador de correia 11, o dispositivo robótico 1 pode operar em um modo sem contato com o transportador de correia 11. Neste caso, após alcançada uma configuração adequada de posição e orientação da plataforma móvel 2 e do braço robótico 3, o dispositivo robótico 1 se locomove ao longo do acesso obtendo dados de imagem, através da câmera RGB, temperatura, através da câmera térmica, e de ruído, através do microfone 15, dos componentes do transportador de correia 11. Estes dados podem ser processados em tempo real (durante a operação de inspeção) pelo computador de bordo do robô ou também

armazenados em mídia física na base de comando para pós-processamento.

[00029] A medição dos ruídos permite, por exemplo, acompanhar as condições de operação dos componentes girantes do transportador de correia 11 ao longo de sua vida útil. Os dados de temperatura obtidos pelo dispositivo robótico 1 podem ser utilizados para indicar a iminência de problemas como incêndios na correia do transportador 11. Em situações como esta, o dispositivo robótico 1 da presente invenção permite a tomada rápida de uma decisão para verificar e solucionar o problema.

[00030] Analogamente, as imagens capturadas pelas câmeras RGB ou pelo scanner a laser 16 podem ser utilizadas para identificar a integridade da superfície e condição de desgaste dos componentes do transportador de correia 11. Estas imagens permitem também analisar e monitorar a taxa de desgaste ao longo da vida útil destes componentes e otimizar o planejamento de manutenções preventivas.

[00031] Preferencialmente, todos os dados de inspeção obtidos através do dispositivo robótico 1 possuem também informação de geolocalização e *timestamp*, e podem ser utilizados para monitorar as condições operacionais de rolamentos, possibilitando assim a predição antecipada de falhas.

[00032] Preferivelmente, os sensores utilizados para a navegação do dispositivo robótico 1 obtêm informações do ambiente ao redor deste, em especial com relação a presença de áreas de acesso livre e de obstáculos dentro do espaço de trabalho dele. Estas informações podem ainda auxiliar no planejamento de trajetória da plataforma móvel 2 e braço robótico 3.

[00033] Os dados obtidos por este conjunto de sensores também podem ser utilizados para realizar a inspeção de correias transportadoras 7, em especial para verificar as condições operacionais das estruturas de sustentação das mesmas.

[00034] Em situações nas quais algum tipo de anomalia relacionada com os dados de temperatura ou ruído obtidos dos componentes do transportador de

correia 11, por exemplo dos rolos, é detectada, o dispositivo robótico 1 é capaz de realizar uma inspeção minuciosa desta região de interesse através de medições de vibrações via contato físico direto com a estrutura do transportador de correias.

[00035] De acordo com a presente invenção, essas medições de vibrações são realizadas através do contato físico direto do sensor localizado na segunda extremidade 5 de um braço robótico 3 do dispositivo robótico 1 com pelo menos um dos componentes do transportador de correia 11, por exemplo, em algum suporte ou estrutura, ou também pelo toque direto em um eixo do rolo.

[00036] Na concretização preferencial ilustrada na Figura 3, de modo a auxiliar a condução do braço robótico 3, o dispositivo robótico 1 também compreende um scanner a laser 16 acoplado à segunda extremidade 5 do braço 3. O scanner a laser 16 possui a função vantajosa de gerar uma nuvem de pontos tridimensional da região de interesse do transportador de correia 11.

[00037] Adicionalmente, a geração da nuvem de pontos tridimensional da região de interesse do transportador de correia 11 pode ser auxiliada por câmeras estéreo, de profundidade ou *Time of Flight* (ToF). Em seguida, um ponto específico da região de interesse a ser contactado é selecionado de forma manual ou automática. Por fim, a trajetória do braço robótico 3 é planejada de forma tal que a ponteira de medição acoplada ao sensor se aproxime na direção normal à superfície a ser medida, evitando colisões com obstáculos presentes no ambiente. Após o contato, a vibração da estrutura é medida através de um sensor de vibração 6 acoplado à ponteira. Os dados de vibração obtidos podem, por exemplo, ser utilizados para constatar um problema no transportador 11 e também servem de parâmetro para acompanhar o funcionamento de um determinado componente deste transportador ao longo da sua vida útil.

[00038] O dispositivo robótico 1 preferivelmente possui alto grau de proteção, incluindo resistência à poeira, jatos de água com alta pressão e

impactos, possibilitando a sua operação em ambientes hostis, incluindo a mineração. Este nível de proteção provém da característica dos componentes eletrônicos e mecânicos serem instalados no interior da carcaça do dispositivo robótico 1, que é construído em metais e polímeros hidrofóbicos, bem como utilizando vedações, *o-rings* e retentores. De modo similar, os componentes que não são incorporados à carcaça do dispositivo robótico também são construídos encapsulados em invólucros com as mesmas características construtivas daqueles componentes instalados no interior da carcaça.

[00039] A presente invenção também revela um método para inspeção de componentes de um transportador de correia utilizando um dispositivo robótico, compreendendo a etapa de: obter dados de temperatura e/ou de ruído de pelo menos um dos componentes do transportador de correia; e, caso os dados de temperatura (por exemplo, temperaturas maiores que 50°C podem indicar a existência de dano no rolo) e/ou de ruído (como padrões anormais de emissão sonora) de pelo menos um dos componentes estejam fora de uma faixa de valores pré-determinada, o método compreende ainda as etapas de: conduzir uma segunda extremidade de um braço robótico do dispositivo robótico para contatar fisicamente pelo menos um dos componentes do transportador de correia, em que o braço robótico compreende uma estrutura articulada; e obter dados de vibração de pelo menos um dos componentes através do sensor de vibrações.

[00040] Votando à Figura 1, esta ilustra a situação onde o dispositivo robótico 1 possivelmente identificou que os dados de temperatura e/ou de ruído de pelo menos um dos componentes estejam fora de uma faixa de valores pré-determinada, e é operado para realizar a etapa da detecção da vibração através do contato físico. Neste momento, o dispositivo robótico 1 se desloca até um acesso do transportador 11 e, em seguida, o braço robótico 3 é configurado para conduzir sua segunda extremidade 5 para contatar pelo menos um dos componentes 8, 9, 10 do transportador de correia 11, de modo a obter dados de

vibração.

[00041] De acordo com a concretização preferencial ilustrada na Figura 3, o dispositivo robótico compreende um scanner a laser 16 acoplado à segunda extremidade 5 do braço 3, e o processo inclui a etapa de gerar uma nuvem de pontos tridimensional da região de interesse por meio do scanner a laser. A informação do scanner auxilia na condução do braço robótico 3 para uma região de interesse a ser alcançada pelo sensor de vibração 6.

[00042] Preferencialmente, a etapa de condução do braço robótico 3 compreende acionar seletivamente a estrutura articulada do braço 3 do dispositivo robótico 1, a qual pode compreender uma pluralidade de juntas 17.

[00043] Preferencialmente a etapa de condução do braço robótico 3 compreende contatar fisicamente uma ponteira de medição acoplada ao sensor de vibrações 6 a pelo menos um dos componentes 8, 9, 10 do transportador de correia 11.

[00044] Durante a movimentação do dispositivo robótico 1 para posicionamento e condução do braço robótico 3, é preferível que o mesmo possua rodas e esteiras 12, as quais podem ser acionadas para posicionar a plataforma móvel 2 do dispositivo. Adicionalmente, é preferível que a plataforma móvel 2 do dispositivo robótico 1 seja dotada de braços de alavanca 13, os quais podem auxiliar a movimentação do dispositivo robótico 1 através de diferentes terrenos, como pavimento, terra, lama, grades e chapas metálicas e pisos cobertos com pelotas.

[00045] Assim, a presente invenção soluciona o problema técnico de mensurar vibrações em componentes de um transportador de correia. Para tal, a presente invenção utiliza um dispositivo robótico 1 tendo um braço robótico 3 com estrutura articulada que conduz a segunda extremidade 5 do braço 3 a contatar pelo menos um componente do transportador de correia 11, obtendo dados de vibração de pelo menos um componente através do sensor de vibrações 6 acoplado à segunda extremidade 5 do braço.

[00046] A presente invenção ainda é especialmente vantajosa uma vez que pode incluir diversos sensores adicionais, como câmeras RGB, scanner a laser, sensor inercial e câmeras de profundidade. Como o braço robótico 3 possui uma estrutura articulada, o dispositivo robótico torna-se capaz de movimentar seu braço robótico em um número determinado de posições, de modo a possibilitar um melhor posicionamento dos sensores acoplados ao longo do braço robótico. Tal configuração é capaz de permitir leituras com maior precisão e de componentes que podem estar localizados em locais de difícil acesso ou visualização.

[00047] Isso possibilita que o planejamento de manutenções preventivas dos componentes girantes do transportador de correia seja otimizado, evitando assim a necessidade de paradas não programadas das correias transportadoras. Reforça-se ainda o fato de que a presente invenção não está limitada às configurações/concretizações particulares acima descritas.

REIVINDICAÇÃO

1. Dispositivo robótico (1) para inspeção de componentes (8, 9, 10) de um transportador de correia (11), compreendendo:

uma plataforma móvel (2); e

um braço robótico (3) tendo uma primeira extremidade (4) acoplada à plataforma móvel (2) e uma segunda extremidade (5);

caracterizado pelo fato de que o braço robótico (3) compreende uma estrutura articulada configurada para conduzir a segunda extremidade (5) a contatar pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) do transportador de correia (11); e

em que o dispositivo robótico (1) compreende um sensor de vibrações (6) acoplado à segunda extremidade (5) do braço (3).

2. Dispositivo robótico (1), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente um scanner a laser (16) acoplado à segunda extremidade (5) do braço (3).

3. Dispositivo robótico (1), de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que o dispositivo robótico (1) compreende ainda uma ponteira de medição acoplada ao sensor de vibrações (6).

4. Dispositivo robótico (1), de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente um ou mais dentre: pelo menos uma câmera (14), um microfone (15), encoders, um sistema de posicionamento global (GPS), um sensor inercial e câmeras de profundidade.

5. Dispositivo robótico (1), de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma câmera (14) ou o microfone (15) estão acoplados à segunda extremidade (5) do braço (3).

6. Dispositivo robótico (1), de acordo com a reivindicação 4 ou 5, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma câmera (14) é de tipo RGB ou térmica.

7. Dispositivo robótico (1), de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo fato de que o braço (3) compreende seis juntas rotacionais (17).

8. Dispositivo robótico (1), de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizado pelo fato de que a plataforma móvel (2) compreende rodas e esteiras (12).

9. Dispositivo robótico (1), de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que a plataforma móvel (2) compreende adicionalmente braços de alavanca (13).

10. Método para inspeção de componentes (8, 9, 10) de um transportador de correia (11) utilizando um dispositivo robótico (1), como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 9, compreendendo a etapa de:

a) obter dados de temperatura e/ou de ruído de pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) do transportador de correia (11);

caracterizado pelo fato de, caso os dados de temperatura e/ou de ruído de pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) estejam fora de uma faixa de valores pré-determinada, o método compreende ainda as etapas de:

b) conduzir uma segunda extremidade (5) de um braço robótico (3) do dispositivo robótico (1) para contatar pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) do transportador de correia (11), em que o braço robótico (3) compreende uma estrutura articulada; e

c) obter dados de vibração de pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) através do sensor de vibrações (6).

11. Método, de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que a faixa de valores pré-determinada compreende valores de temperatura menores que 50 °C.

12. Método, de acordo com a reivindicação 10 ou 11, caracterizado pelo fato de que a etapa b) compreende:

gerar uma nuvem de pontos tridimensional da região de

interesse por meio de um scanner a laser (16) acoplado à segunda extremidade (5) do braço (3).

13. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 10 a 12, caracterizado pelo fato de que a etapa b) compreende contatar fisicamente uma ponteira de medição acoplada ao sensor de vibrações (6) a pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) do transportador de correia (11).

14. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 10 a 13, caracterizado pelo fato de que a etapa b) compreende acionar seletivamente a estrutura articulada do braço (3) do dispositivo robótico (1).

15. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 10 a 14, caracterizado pelo fato de que a etapa b) compreende acionar rodas e esteiras (12) de uma plataforma móvel (2) do dispositivo robótico (1).

16. Método, de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que a etapa b) compreende adicionalmente acionar braços de alavanca (13) da plataforma móvel (2) do dispositivo robótico (1).

RESUMO**“DISPOSITIVO ROBÓTICO E MÉTODO PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES DE UM TRANSPORTADOR DE CORREIA”**

A presente invenção se refere a um dispositivo robótico (1) para inspeção de componentes (8, 9, 10) de um transportador de correia (11) compreendendo uma plataforma móvel (2) e um braço robótico (3) tendo uma primeira extremidade (4) acoplada à plataforma móvel (2) e uma segunda extremidade (5), em que o braço robótico (3) compreende uma estrutura articulada configurada para conduzir a segunda extremidade (5) a contatar pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) do transportador de correia (11) e em que o dispositivo robótico (1) compreende um sensor de vibrações (6), uma câmera (14), um microfone (15) e um scanner a laser (16) acoplados à segunda extremidade (5) do braço (3). A presente invenção também revela um método para inspeção de componentes (8, 9, 10) de um transportador de correia (11) utilizando um dispositivo robótico (1), compreendendo a etapa de: obter dados de temperatura e/ou de ruído de pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) do transportador de correia (11); e, caso os dados de temperatura e/ou de ruído de pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) estejam fora de uma faixa de valores pré-determinada, o método compreende ainda as etapas de: conduzir uma segunda extremidade (5) de um braço robótico (3) do dispositivo robótico (1) para contatar o pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) do transportador de correia (11), em que o braço robótico (3) compreende uma estrutura articulada; e obter dados de vibração do pelo menos um dos componentes (8, 9, 10) através do sensor de vibrações (6).

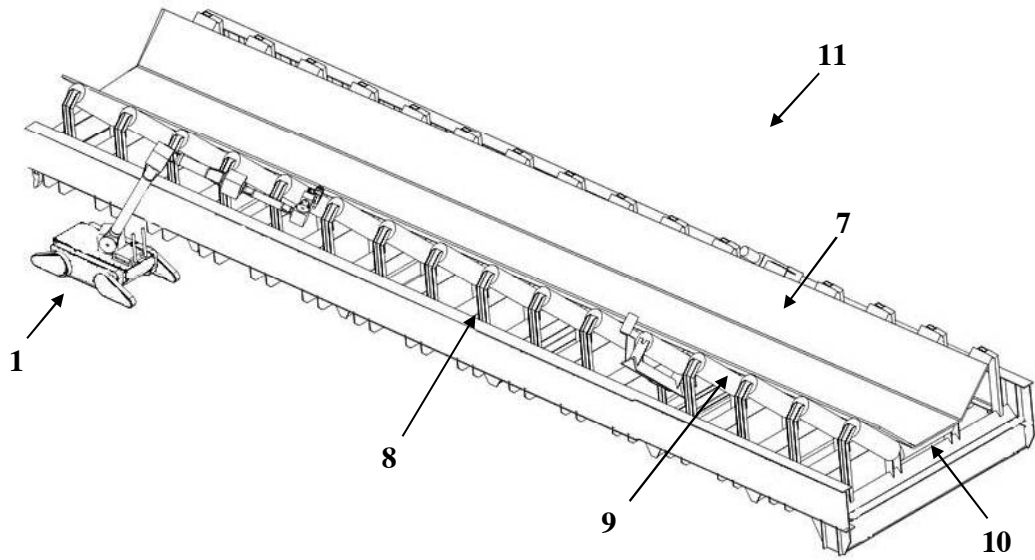


FIGURA 1

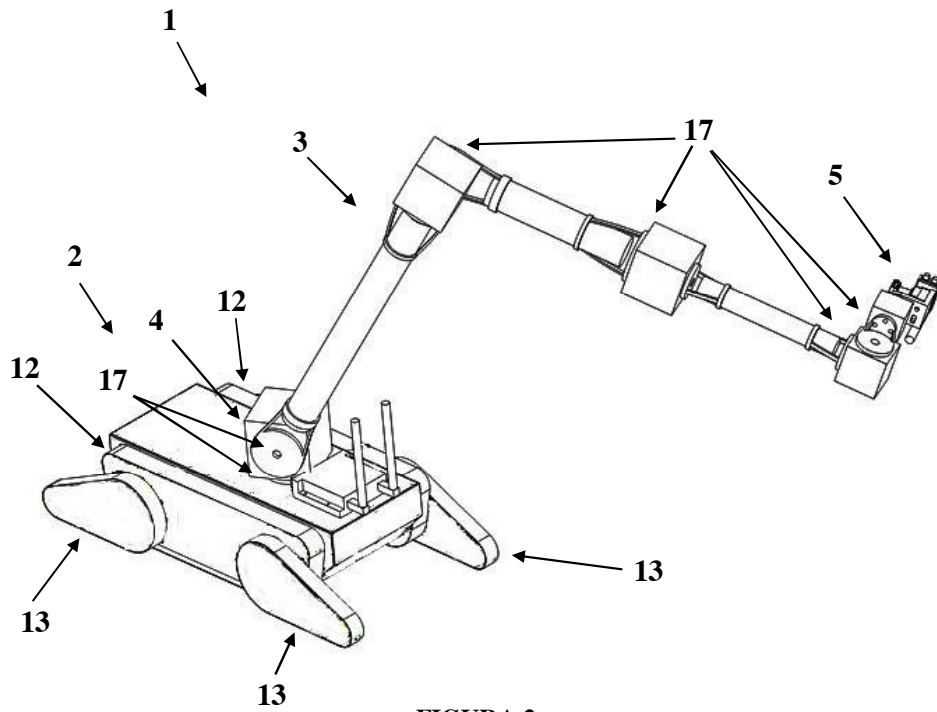


FIGURA 2

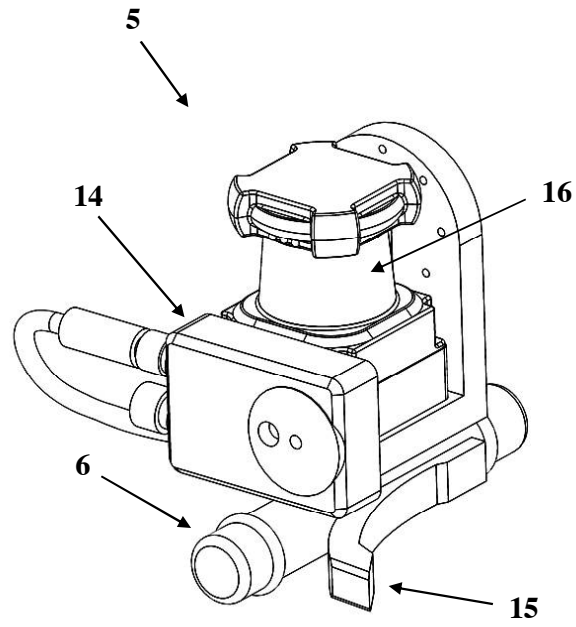


FIGURA 3

Apêndice C - Resumo expandido - ICRA 2018

Trabalho apresentado na *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* de 2018 na categoria *abstract-only* sob o título de “*A novel robotic inspection system for belt conveyor idlers*”.

A novel robotic inspection system for belt conveyor idlers

Gabriel Garcia^{1,2}, Marcos Torre^{1,2}, João C. Monteiro⁴, André Franca³, Felipe Ribeiro³ and Gustavo Freitas²

Abstract—Belt conveyors play an important role in the transportation of dry bulk material in different industries. The inspection of its components, such as idlers, is a fundamental task to guarantee the conveyor belt proper functioning. Traditionally, operators perform inspections based on sound, vision, and smell. This work proposes a robotic device, composed by a mobile platform, a robotic arm and a set of sensors for idlers inspection. The proposed system removes the operator from risk areas, provides more accurate information and does not require any modification of the existing BC structures. Proof of concept tests were performed in real scenarios to confirm the system's capabilities under different operating conditions.

I. INTRODUCTION

Belt conveyors (BCs) are widely used to transport large quantities of dry bulk material and their use in mining processes is extensive.

It is necessary to perform a constant inspection and maintenance on the components of belt conveyors, such as the idlers. Currently, this inspection happens periodically in a sensitive way, with operators checking the significant parts of the conveyor belts using hearing, sight, and smell to find defective idlers. This method depends on the inspectors' experience, their visual and auditory acuity, and exposes them to several adversities such as rain, exposure to sun, dust, the risk of accidents with moving parts, high noise level and displacement on foot over long distances.

The literature shows different approaches to the problem, such as the use of fixed [1] and mobile [2] sensors along the BC, but none of them present a viable solution that comprises all relevant variables for inspection - temperature, vibration, and the sound of idlers. This work proposes a novel robotic device for belt conveyors inspection.

II. PROPOSED ROBOTIC DEVICE

The robotic device is driven by side tracks and has two pairs of rotational lever arms, positioned at the ends of the robot. It is capable of moving in different terrains, including pavement, earth, mud, metal grids and floors covered with iron ore pellets. The robot is also able to overcome obstacles and go up and down stairs with different slopes, allowing the system to access the same lateral corridor used by the operators during inspection routines, without the installation of any supporting structure. The platform contains a 6 DoF robotic arm and instrumentation devices, including GPS and inertial sensor (IMU), laser scanner, thermal and RGB camera, microphone, and a touch tip with a vibration sensor.

*This work was supported by ITV, UFOP and FAPEMIG.

¹School of Mines, Federal University of Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil; ²Vale Institute of Technology (ITV), Ouro Preto, Brazil; ³Vale S.A. Engineering and Development Department, Vitória, Brazil; ⁴Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil; gabrcg@gmail.com; {marcos.torre, gustavo.medeiros.freitas}@itv.org; {andre.franca, felipe.ribeiro}@vale.com; jcmonteiro@poli.ufrj.br

During the inspection operations, as shown in Figure 1, the robot moves along conveyor belts, recording the respective sounds and measuring the temperature of the idlers. When the robot identifies a possible fault, it stops and constructs a three-dimensional map representing the environment around the robot, using a laser scanner (LIDAR) combined with the rotational movement applied to the robotic arm wrist. The three-dimensional map allows the definition of the contact points and also the calculation of the trajectory so that the vibration sensor can reach these points in a safe and precise way. The RRT algorithm is used to find an obstacle-free trajectory to move the arm to the desired pose.

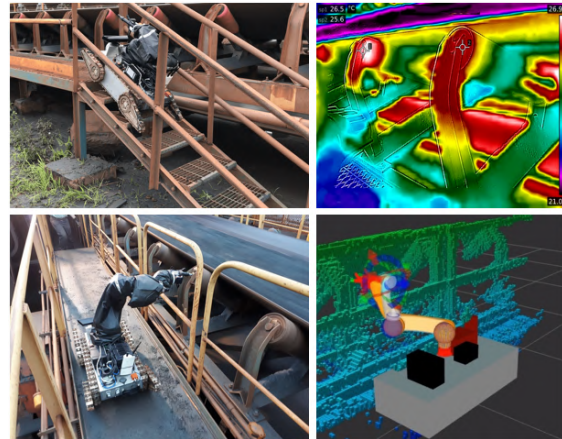


Fig. 1. Robotic platform during an inspection operation.

The device software was developed in the well-known Robot Operating System (ROS), using its packages and libraries such as MoveIt! and OMPL.

Tests were carried out at the port of Tubarão, which belongs to the mining company VALE, located in Vitória, Brazil. The robot was able to move in the operating environment and inspect different idler frames and roller shafts. The ability to physically reach the BCs components, the high payload and long battery life are the differentials of the design compared to other mobile solutions, such as the use of UAVs. The analysis of the data obtained during the locomotion, such as thermal images and sound captured by the microphone, allows identifying well-functioning and defective idlers.

REFERENCES

- [1] G. Lodewijks, M. Duinkerken, A. L. de la Cruz, and H. Veeke, "The application of rfid technology in belt conveyor systems," *Proceedings of BeltCon*, vol. 14, pp. 1–17, 2007.
- [2] R. Nascimento, R. Carvalho, S. Delabrida, A. G. Bianchi, R. A. R. Oliveira, and L. G. U. Garcia, "An integrated inspection system for belt conveyor rollers,"

Apêndice D - Relatório técnico

Relatório técnico publicado sob o título “Estado da arte, teste de conceito e estudo técnico do dispositivo robótico para a inspeção de rolos de correias transportadoras”.

PROD. TEC. ITV. MI- N0005 / 2018
DOI:10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2018.5.Rocha

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV MI

ESTADO DA ARTE, TESTE DE CONCEITO E ESTUDO TÉCNICO DO DISPOSITIVO ROBÓTICO PARA A INSPEÇÃO DE ROLOS DE CORREIAS TRANSPORTADORAS

Relatório Parcial do projeto Dispositivo Robótico Para a Inspeção de Rolos de Correias
Transportadoras

Autores ITV:

Filipe A. S. Rocha
Gustavo M. Freitas
Marcos Paulo Torre
Gabriel C. Garcia

Autores parceiros:

Fernando Cesar Lizzaralde
Ramon Romankevicius Costa
João Carlos Espiúca Monteiro

Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil

maio/2018

Título: Estado da arte, teste de conceito e estudo técnico do dispositivo robótico para a inspeção de rolos de correias transportadoras	
PROD. TEC. ITV. MI- N005 / 2018	Versão
Classificação: () Confidential (X) Restricto () Internal use () Publico	01

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R 672

Rocha, Filipe A. S.

Estado da arte, teste de conceito e estudo técnico do dispositivo robótico para a inspeção de rolos de correias transportadoras. / Filipe A. S. Rocha ... [et al.] – Ouro Preto, MG: Instituto Tecnológico Vale. 2018

34 p. :il.

1. Correias transportadoras. 2. Inspeção de rolos. 3. Robótica móvel. I Título.

CDD 23 ed. 629.8933

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves – CRB 2 - 525

SUMARIO EXECUTIVO

O projeto “Dispositivo Robótico Para a Inspeção de Rolos de Correias Transportadoras”, fruto de uma parceria entre o Departamento de Engenharia e Desenvolvimento do Porto de Tubarão (Vitória, Espírito Santo), o Instituto Tecnológico Vale - Mineração (Ouro Preto, MG) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, RJ), tem o objetivo de desenvolver uma plataforma robótica dotada de um braço manipulador a fim de realizar inspeções nos rolos de Transportadores de Correias (TC) através de análise de imagens térmicas, ruído sonoro, vibração mecânica, e escaneamento laser. O projeto conta atualmente com diversos pesquisadores e bolsistas de graduação e pós-graduação para realizar os desenvolvimentos necessários. Além disto, está disponível para uso deste projeto toda a infraestrutura do Laboratório de Controle e Robótica do ITV-MI e dos laboratórios do Grupo de Simulação e Controle em Automação e Robótica (GSCAR) da UFRJ.

A primeira entrega deste projeto consiste neste relatório técnico. É feito inicialmente o levantamento do estado da arte nas áreas de inspeção automatizada dos rolos de TC e plataformas robóticas móveis para este tipo de aplicação. Um teste de campo foi conduzido no Porto de Tubarão (Vitória, ES) com a plataforma robótica DIANE ¹ da UFRJ e um braço manipulador acoplado a diversos sensores. Os resultados deste teste demonstram a viabilidade técnica do presente projeto. Por fim, é apresentada a proposta de conceito do novo dispositivo robótico que será construído.

¹ Mais detalhes sobre esta plataforma robótica podem ser encontrados em (FREITAS, 2014).

RESUMO

Os Portos da Vale no Brasil, com mais de 400 mil rolos instalados e mais de 120 km de Transportadores de Correias (TCs), representam um grande desafio para inspeção. De forma geral, esta atividade ocorre manualmente com as equipes percorrendo os transportadores avaliando a temperatura (munidos de pirômetro, dispositivo de instrumentação sem contato), o ruído e a vibração dos rolos durante a operação. Em termos de material substituído, os rolos de correias transportadores somaram R\$ 22 milhões em 2015, atrás apenas do gasto com as próprias correias (R\$ 88 milhões); há por isto bastante valor em acompanhar a vida destes itens.

Atualmente, os TC são inspecionados periodicamente de forma sensitiva, com operadores verificando os principais componentes das correias transportadoras. Algumas características dos transportadores dificultam o processo de inspeção, incluindo grandes extensões, número elevado de componentes a serem analisados e o acesso restrito a estes.

Buscando apresentar uma solução eficaz para o problema, este projeto propõe um dispositivo robótico para inspecionar rolos de TC. O sistema desenvolvido é composto por uma plataforma móvel, um braço manipulador, e um conjunto de sensores para a inspeção de rolos de correias transportadoras.

Inicialmente, é levantado neste relatório o estado da arte nas áreas de inspeção automatizada dos rolos de TC e plataformas robóticas móveis. Um teste de campo foi conduzido no Porto de Tubarão (Vitória, ES) com a plataforma robótica DIANE da UFRJ e um braço manipulador acoplado a diversos sensores. Os resultados deste teste demonstram a viabilidade técnica do presente projeto. Por fim, é apresentada a proposta de conceito do novo dispositivo robótico que será construído.

ABSTRACT

With more than 400 thousand idler rollers installed and 120 km of conveyor belt, Vale's ports in Brazil represent a significant challenge for inspection. This drill generally occurs manually with the teams walking by the conveyors, evaluating the temperature (equipped with a pyrometer, non-contact instrumentation device), noise and vibration of the idlers during the operation. Regarding replaced material, idler rollers summed R\$ 22 million in 2015, staying behind only of the belt itself costs (R\$ 88 million).

Currently, operators have to inspect the CB main parts sensitively. Some characteristics of the conveyors make the inspection process difficult, including large extensions, a high number of components to be analyzed, and restricted access.

Seeking to present an efficient solution to the problem, this project proposes a robot for conveyor belt idlers inspection. The robotic system consists of a mobile platform, a manipulator arm, and a set of sensors.

Initially, this report presents the state of the art in the automated inspection of conveyor belt idlers and mobile robotic platforms areas. A field test was performed at the Tubarão Port (Vitória, Brazil) with the UFRJ's DIANE robot and a manipulator arm coupled to several sensors. The results show the technical feasibility of this project. Finally, we present the concepts of the new robotic device that is going to be developed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Pátio com a vista lateral de um TC (à esquerda) e detalhamento dos intems inspecionáveis (à direita).	7
Figura 2:	Resumo de gastos materiais e indisponibilidades devido a incêndios na Vale.	8
Figura 3:	Inspeção de correrias utilizando fibra óptica.	9
Figura 4:	a) FlipBot (SEO et al., 2013). b) robô com mecanismo "roda-esteira"(GAO et al., 2017)	12
Figura 5:	Diferentes robôs com esteiras sobre braços atuados: a) iRobot 719 Kobra (IROBOT, 2014), b) Foxiris, c) Argonaut.	13
Figura 6:	Integração entre a plataforma móvel, braço manipulador e sensores. .	15
Figura 7:	Ilustração da plataforma robótica com o braço acoplado (a) e da unidade de instrumentação que é acoplada ao punho do manipulador (b). Adaptado de (GARCIA et al., 2018).	16
Figura 8:	Mapeamento tridimensional do TC através do laser plantar (à esquerda) e braço manipulador realizando o toque no rolo para inspecionar melhor a peça (à direita).	19
Figura 9:	Transposição de obstáculos com a plataforma robótica.	20
Figura 10:	Etapas da inspeção dos rolos de TC. Adaptado de (GARCIA et al., 2018)	21
Figura 11:	Plataforma móvel realizando inspeção visual e acústica (à esquerda) e imagem da câmera térmica detectando a irradiação dos rolos (à direita).	23
Figura 12:	Esboço conceitual da nova plataforma para a inspeção dos rolos de TCs.	25
Figura 13:	a) Conceito do braço de alavanca com esteira e roda. b) Detalhamento do <i>switch</i> mecânico acoplamento/desacoplamento da tração nas esteiras do braço.	26
Figura 14:	Projeto da nova plataforma realizando a subida e descida de escadas.	27

LISTRA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

TC Transportadores de Correia

DOFS Distributed Optical Fiber Sensor

OTDR Optical Time Domain Reflectometry

IMU Inertial Measurement Unit

CG Centro de Gravidade

ROS Robot Operating System

OMPL Open Motion Planning Library

URDF Robotic Arm's Unified Robot Description Format

CEL Centro de Engenharia Logística

SUMÁRIO

1	Introdução	7
2	Descrição do Estado da Arte	10
2.1	Inspeção automatizada dos rolos de TCs	10
2.2	Plataforma robótica móvel terrestre	12
3	Teste de Conceito	15
3.1	Equipamentos utilizados	15
3.2	Implementação e integração	17
3.3	Análise preliminar de mobilidade	20
3.4	Inspeção dos TC	22
4	Projeto da Nova Plataforma Móvel	24
5	Conclusões	28
	REFERÊNCIAS	29

1 Introdução

Em processos da cadeia de mineração que envolvem mina, usina de beneficiamento, pelotização e porto, é extenso o uso de Transportadores de Correia (TC) para a movimentação de grandes quantidades de minério (Figura 1). Apenas na Vale, conforme dados coletados com a área de Engenharia Portuária, estão presentes mais de 2.000 TCs, totalizando 1.000 km de extensão e aproximadamente 1,6 milhões de rolos (NASCIMENTO et al., 2017b).

Figura 1 – Pátio com a vista lateral de um TC (à esquerda) e detalhamento dos itens inspecionáveis (à direita).



Fonte: (NASCIMENTO, 2017).

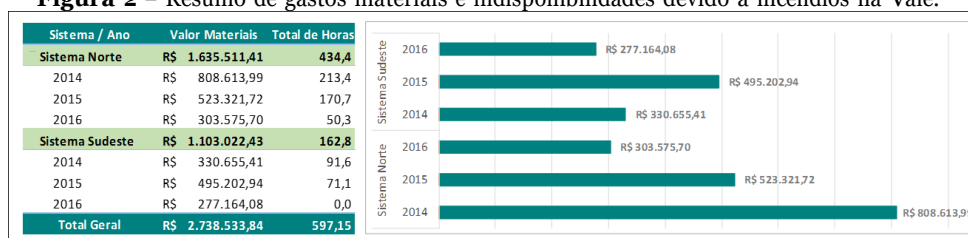
Alguns dos componentes do TC não representam desafios significativos de inspeção por já existirem tecnologias de monitoramento de condições consolidadas, caso do sistema de acionamento, ou por estarem agrupados em uma pequena região, caso dos raspadores e sistema de esticamento (LODEWIJKS et al., 2016). Porém, outros estão fisicamente espalhados ao longo da estrutura, em grande quantidade, sem técnicas eficientes para o monitoramento dos mesmos. É o caso dos rolos, que podem ser classificados como de impacto, quando posicionados na região de transferência (chutes), de carga, que suportam o material ao longo do leito do TC, e de retorno que apoiam a parte inferior da correia.

Falhas nos rolos geram impactos operacionais significativos, com prejuízos materiais elevados e impactos na produção, especialmente pelo potencial de causar incêndios no caso de superaquecimento. Dados extraídos de sistemas internos da Vale (Figura 2) mostram que, entre 2014 e 2016, apenas nos portos de Ponta da Madeira (Sistema Norte) e Tubarão (Sistema Sudeste), foram mais de R\$ 2,7 milhões em perdas materiais por conta de incêndios causados por falhas nos rolos, totalizando 600 horas de parada.

Para prevenir situações como essa, são executadas atividades de inspeção nos principais componentes que formam os TCs, incluindo os rolos. Porém, mesmo em condições ideais e de fácil acesso aos componentes, como as mostradas na Figura 1, as inspeções estão sujeitas aos principais problemas a seguir:

Necessidade de percorrer a pé grandes extensões e verificar um alto número de ativos (LODEWIJKS, 2004). Por exemplo, a inspeção de um TC de 150 metros significa para o

Figura 2 – Resumo de gastos materiais e indisponibilidades devido a incêndios na Vale.



Fonte: (Nascimento, 2017).

inspetor caminhar por 300 metros (ambos os lados do TC) e verificar aproximadamente 500 rolos entre carga, retorno, impacto e guias, além de estruturas metálicas e demais componentes inspecionáveis;

Grande dependência da experiência do inspetor e de sua acuidade visual e auditiva, já que a inspeção é basicamente sensitiva, com observação de ruídos emitidos pelo rolamento dos rolos e avaliação visual da superfície em busca de avarias e travamentos;

O monitoramento de condições, como a medição de vibração e registro de temperatura com uso de termografia, não é prático para se aplicar em todas as inspeções dado o grande volume de componentes, o tempo gasto na execução das medições e a dificuldade de se obter as medidas dos pontos de interesse (YANG; ZHANG; MA, 2016).

Diante desses problemas, que estão presentes mesmo nos casos mais simples de inspeção, deve-se buscar tecnologias que possam auxiliar nessa atividade, visando à elevação dos níveis de disponibilidade física e à preservação da saúde e segurança dos trabalhadores que executam as inspeções.

Uma alternativa possível é o uso de sensores que permitam o monitoramento de condições dos ativos, usando os principais indícios observados na inspeção sensitiva, como ruídos, temperatura e vibração. Porém, desconsiderando-se custos, uma desvantagem clara é que a instalação de sensores pode gerar necessidades adicionais de manutenção, problema que é potencializado pelo número de TCs e grande quantidade de componentes em cada um deles.

Outra possibilidade de inspeção de correias consiste na instalação de fibra óptica ao longo das correias transportadoras, conforme ilustrado na Figura 3 (YANG, 2014). Essa tecnologia possibilitaria a identificação de vibrações na estrutura de correias, e também o aumento da temperatura dos rolos, com uma precisão aproximada de 3 a 10 m de distância com respeito ao foco do problema. Uma vantagem seria o monitoramento contínuo das correias e rolos. Ainda assim, a tecnologia está associada a um complexo processamento de sinais que deve ser feito de forma exclusiva para cada correia e instalação da fibra óptica.

Nesse contexto, outra opção que pode ser avaliada é a substituição da presença dos inspetores em campo por veículos aéreos não tripulados (VANTs), que tenham a capacidade

Figura 3 – Inspeção de correias utilizando fibra óptica.



Fonte: (YANG, 2014).

de realizar a inspeção de forma autônoma ou por meio de algum tipo de operação remota. Os veículos aéreos estão sendo cada vez mais utilizados nas mais diversas aplicações. Os preços de tais dispositivos estão sofrendo constantes reduções. Além disso, esta tecnologia não precisa da instalação de nenhuma estrutura externa. Os pontos mais questionáveis desta tecnologia estão ligados à segurança operacional, autonomia (duração das baterias), e capacidade de transporte de carga (sensores embarcados). Além disso, os VANTS normalmente armazenam dados coletados em campo, que são posteriormente analisados.

Considerando as tecnologias já disponíveis no mercado, este projeto propõe a utilização de um dispositivo robótico terrestre, capaz de se locomover em diferentes terrenos e pisos, ultrapassar obstáculos e subir e descer escadas. Além disso, o robô possuirá um manipulador, onde serão acoplados diferentes sensores, como câmera RGB e térmica, microfone, sensor de vibração através de toque. Por se tratar de um robô terrestre, este possui grande autonomia, além da capacidade de transportar mais carga, permitindo embarcar diferentes sensores na plataforma. Devido a grande capacidade computacional embarcada, o robô será capaz de fazer o processamento de dados em tempo real, permitindo a identificação de erros durante o processo de inspeção. O braço robótico da plataforma permite realizar a inspeção das correias por meio de toque, mesmo com o transportador em movimento, que por questões de segurança não pode ser realizada por operadores da Vale devido ao risco de acidentes com partes móveis.

2 Descrição do Estado da Arte

De acordo com os objetivos do projeto, pode-se destacar duas áreas principais de desenvolvimento. A primeira trata da inspeção, relacionando quais sensores serão utilizados e quais técnicas serão aplicadas afim de avaliar a saúde dos rolos a partir desses dados. A segunda área consiste no desenvolvimento da plataforma robótica móvel acoplada a um braço manipulador que irá transportar os sensores. Sendo assim, este capítulo faz o levantamento do estado da arte para essas duas linhas do projeto.

2.1 Inspeção automatizada dos rolos de TCs

Existem diferentes técnicas de inspeção preditiva de TCs de acordo com a grandeza que se deseja medir, como temperatura, vibração e sinais acústicos. Nesse caso, o maior desafio são os rolos, já que a instalação de sensores individuais nos componentes pode ser economicamente inviável dados os custos relativos à instalação e à manutenção de um grande número de sensores.

Ainda assim, Lodewijks et al. (2016) propõe o uso de rolos inteligentes, com sensores de temperatura embarcados, RFID para identificação e uma rede de sensores sem fio ZigBee (ALLIANCE, 2018) para transmissão de dados. Dessa forma, o tempo que um sinal demora entre o rolo e as bases fornece a posição dele ao longo do TC, ao mesmo tempo que é possível obter a temperatura de forma periódica com precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$. Esse sistema está em testes laboratoriais, e existem soluções comerciais conhecidas como Smart Idler (VAYERON, 2018) (INGENUITY, 2016), com pedido de patente em análise (NORRIS; MOUTZOURIS, 2014). Não há detalhes de custos, que atualmente podem ser proibitivos no cenário de TCs da Vale. Lembrando que perdas materiais com incêndios nos portos Norte e Sul foram de R\$ 2,7 milhões e existem em torno de 580 mil rolos nesses portos, para que seja viável adoção dessa solução, o custo por sensor teria que ser inferior a R\$ 4,66.

Tendo em mente esse tipo de restrição, Hu et al. (2011) propõem o uso de sensores distribuídos com fibra ótica ou Distributed Optical Fiber Sensor (DOFS) (ROGERS, 1988) para realizar medições de temperatura dos rolos de um TC. Nos experimentos em uma mina de carvão, foi possível detectar elevações de temperaturas em diferentes pontos ao longo de uma fibra de 6 km com incerteza de medição de $\pm 2^\circ\text{C}$, sendo detalhado também um sistema que alerta sobre elevações de temperatura que possam danificar a correia, que entra em combustão a aproximadamente 150°C . O sistema proposto também é capaz de autodiagnóstico, indicando rompimentos e falhas na fibra usada. Alguns exemplos de soluções comerciais com essa tecnologia são descritas por Yokogawa (2017) e Sensing (2017).

O DOFS proposto por Hu et al. (2011) tem resolução espacial na ordem de 3 m, o que

é suficiente para a medição de temperatura de rolos de retorno e de carga. A tecnologia em que se baseia, Optical Time Domain Reflectometry (OTDR), com as melhorias propostas por Beller (1997), pode chegar à precisão de 1 m. Porém, as mesas de impacto - região de absorção da força provinda do carregamento do material na correia - possuem rolos espaçados a cada 30 cm. Uma solução para situações dessa natureza foi descrita por Wang et al. (2016), que descreve um sistema OTDR de resolução ultra alta, que eleva a precisão de medição para 1,3 cm em fibras de 15 km, podendo chegar a 620 μ m em 100 m de fibra.

Em relação à visão computacional, Yang, Zhang e Ma (2016) propõem um robô móvel que se desloca sobre a estrutura do TC e realiza a captura de imagens em infravermelho dos rolos, motores, polias e outros componentes mecânicos. Os autores propõem um método de processamento de imagens em infravermelho que combina diferentes técnicas de reconhecimento de padrões e processamento de sinais para identificar os componentes e sua temperatura nas imagens obtidas. A partir disso, é proposto um prognóstico de falha, comparando a temperatura obtida com faixas de referência em diferentes níveis para cada tipo de componente reconhecido.

A vibração também é um indicativo de falhas nos rolos, mas a medição dela pode exigir o uso de muitos sensores, problema já contextualizado. Assim, Li et al. (2013) propõem o uso de Wavelet Packet Decomposition (WPD) (COIFMAN; WICKERHAUSER, 1992) para decompor os sinais de vibração e determinar a energia de cada faixa de frequência como atributo (feature) de interesse, além do Support Vector Machine (SVM) (CORTES; VAPNIK, 1995) para classificar os diferentes tipos de falha, de acordo com os sinais decompostos capturados por um número limitado de sensores, que é a grande vantagem do sistema usado. Outro método para análise de vibração em rolamentos, que explora conceitos de deep learning para extração das features do sinal de interesse, é proposto por Junbo et al. (2015).

Outra forma de inspeção de correias consiste no monitoramento acústico. Este método possui vantagens em relação a análise térmica por haver a possibilidade de detectar falhas nos rolos ainda em estágio inicial; comumente, a temperatura dos rolos se eleva repentinamente quando já estão em fase avançada de avaria. Entezami et al. (2014) propõem essa técnica para avaliar os rolamentos nos rodeiros de locomotivas e vagões (material rodante), posicionando microfones individuais e em arranjo ao lado da via permanente. O princípio adotado é que o rolamento emite frequências características de acordo com tipos específicos de defeitos e sua constituição física, conforme detalhado por Scheffer e Girdhar (2004). As soluções de Smart Idler, previamente descritas, também adotam o monitoramento acústico como princípio de detecção de falhas.

Visto que a instalação de sensores para monitoramento dos rolos pode não ser prática, uma alternativa que se mostra relevante é o uso de ROVs e VANTs dotados de sensores para a realização de inspeções dos rolos. Yong W. Gong e Guoan (2014) detêm reivindica

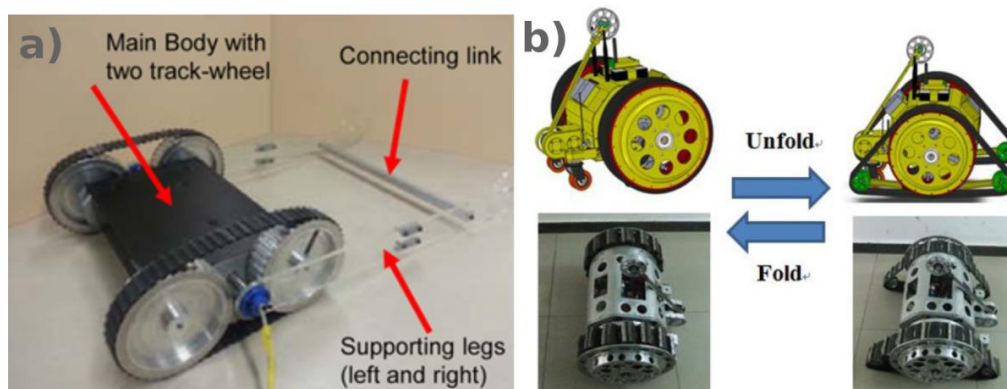
a realização de inspeção com um VANT multi-rotor, com sistema de navegação autônoma, que identifica as rotas e zonas de inspeção por meio de adesivos refletivos instalados no corpo do TC e em outras estruturas, permitindo orientação vertical e horizontal da rota. O VANT realiza a inspeção com uso de câmera de alta-resolução, câmera infravermelha, para obter temperatura, sensor de RFID, para identificação do rolo, e sensores para leitura da concentração de gases, dado o objetivo para uso em minas subterrâneas de carvão, onde existe grande risco de explosão por conta de gases. Os dados captados são transmitidos em tempo real para estações terrestres, dotadas de capacidade para realizar o processamento de sinais e retransmitir a informação.

2.2 Plataforma robótica móvel terrestre

O ambiente industrial minerário é altamente agressivo do ponto de vista da robótica. A maioria dos dispositivos na literatura são desenvolvidos para operarem em ambientes controlados como laboratórios, residências, e outros tipos de áreas *indoor*. Sendo assim, estes geralmente não possuem o grau de proteção ou robustez adequados para suportarem longos períodos de operação na mineração.

Especificamente para a inspeção dos rolos de TCs, o dispositivo robótico projetado deve ser robusto e à prova d'água e poeira, afim de poder operar sob chuva ou outras condições adversas. Vários tipos de obstáculos também devem ser transponíveis, como escadas e trilhos de trem. Além disto, devido ao grande número de rolos, a plataforma robótica deve possuir boas autonomia energética e velocidade de translação, afim de realizar as inspeções completas em curtos períodos de tempo.

Figura 4 – a) FlipBot. b) robô com mecanismo “roda-esteira”.



Fonte: a) (SEO et al., 2013); b) (GAO et al., 2017).

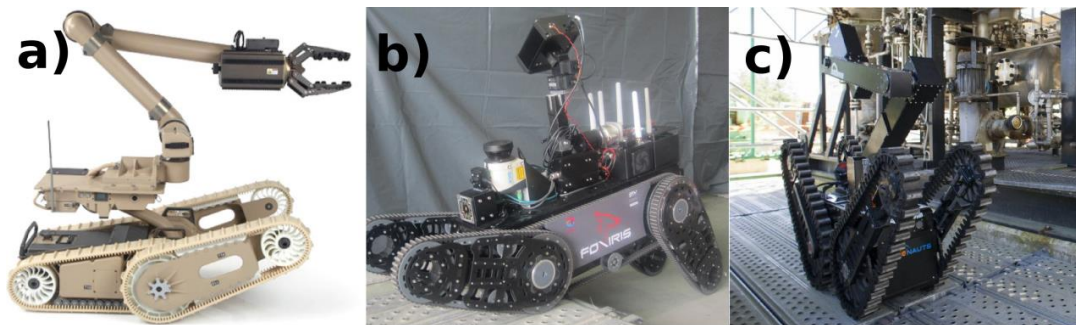
Analisando a literatura, diversos dispositivos robóticos concebidos visando a transposição de obstáculos podem ser encontrados.

O dispositivo móvel apresentado por King, Shackelord Jr e Hakl (1989) é concebido visando a transposição de escadas e possui um braço manipulador acoplado. O robô conta

com seis rodas comuns para sua locomoção, sendo os dois pares traseiros ligados entre si através de uma haste rotacional. Como graus de liberdade ativos existem apenas a tração das rodas dianteiras e a haste para rotacionar os pares de rodas traseiros.

Seo et al. (2013) e Rudakevych e Grande (2013) apresentam conceitos similares de uma plataforma robótica móvel dotada de esteiras e um braço de alavanca simples (Figura 4-a). A função deste braço é a de rotacionar 360° entorno do robô durante a transposição de obstáculos, impulsionando a plataforma para cima. Porém, esta mesma característica impede que cargas sejam acopladas, já que impediria a rotação do braço.

Figura 5 – Diferentes robôs com esteiras sobre braços atuados: a) iRobot 719 Kobra, b) Foxiris, c) Argonaut.



Fonte: a) (IROBOT, 2014); b) Arquivo público da internet; c) Arquivo público da internet.

Gao et al. (2017) apresentam um pequeno robô com modo de locomoção transformável. O mecanismo de atuação se comporta como uma roda, podendo porém ser desdobrado afim de assumir as características de uma esteira (Figura 4-b). Este mecanismo proporciona altas mobilidade e versatilidade ao conjunto. Entretanto, esta arquitetura não é concebida visando o transporte de grandes cargas, como um braço manipulador.

Uma vertente de robôs *all terrain* (apropriados para locomoção em diversos tipos de terreno) consiste na utilização de esteiras de tração montadas sobre braços de alavanca atuados. Aliando as vantagens da utilização de esteiras e pernas como mecanismos de locomoção, esta montagem torna o dispositivo mais versátil se comparado a robôs com esteiras simples (NIE; PACHECO; SPENKO, 2013).

A capacidade de reconfigurar as esteiras através dos braços proporciona a estes dispositivos a capacidade de transpor diferentes tipos de obstáculos e terrenos, além de permitir que o mesmo possa controlar ativamente sua estabilidade (ENDO; WATANABE; NAGATANI, 2017). Este artifício auxilia em manter o conjunto equilibrado caso haja carga acoplada (como um braço manipulador), dificultando eventuais capotamentos.

Diversas variações deste tipo de modo de locomoção podem ser encontradas na literatura. As mais comuns são a utilização de um (Figura 5-a) ou dois (Figura 5-b) braços de alavanca

com esteiras nas extremidades do corpo do robô; outra abordagem está na montagem de duas semi esteiras sobre braços centradas (Figura 5-c). A maior quantidade de braços faz com que a plataforma se torne mais versátil; a contrapartida está na maior complexidade de montagem e menor autonomia (NIE; PACHECO; SPENKO, 2013).

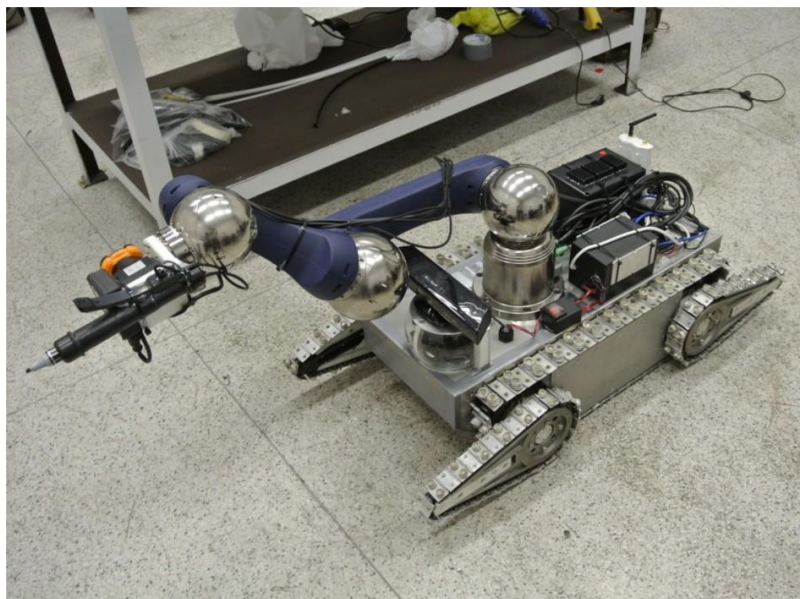
3 Teste de Conceito

Afim de avaliar a viabilidade técnica do projeto proposto, foi montado um sistema robótico baseado em uma plataforma móvel com um braço manipulador e diversos elementos de instrumentação acoplados. Testes preliminares em laboratório e de campo foram conduzidos entre julho e agosto de 2017 no Porto de Tubarão (Vitória-ES). Este capítulo apresenta os equipamentos utilizados, bem como os resultados obtidos nestes ensaios.

3.1 Equipamentos utilizados

A plataforma móvel utilizada é o robô para a neutralização de artefatos explosivos DIANE, da UFRJ (FREITAS, 2014). Suas operações rotineiras envolvem missões de até uma hora de duração que podem ser realizadas à baixas velocidades de translação, sendo por vezes necessário manipular objetos de até 10 kg, transpor obstáculos (principalmente escadas) e passar por acessos estreitos.

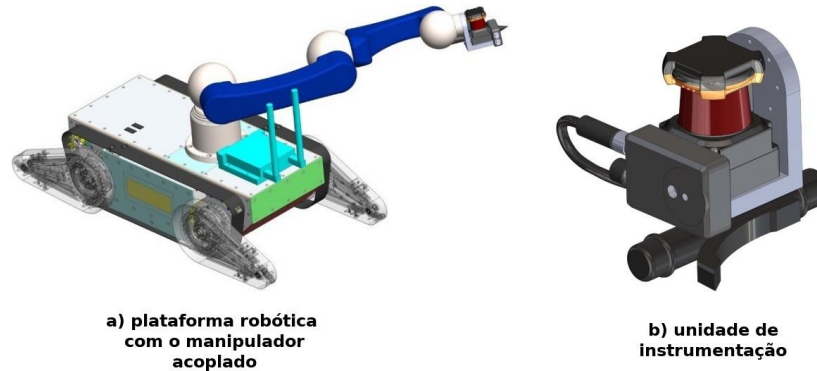
Figura 6 – Integração entre a plataforma móvel, braço manipulador e sensores.



Fonte: do próprio autor.

Sendo assim, seu projeto original contempla o uso de esteiras laterais e quatro braços atuados também dotados de esteiras ativas. Este modo de locomoção proporciona alta capacidade de transposição de obstáculos à plataforma, afetando negativamente porém a eficiência energética e a velocidade de translação. Para permitir que objetos pesados sejam carregados, a estrutura da plataforma teve seu peso superdimensionado afim de gerar lastro. Esta característica aumenta a estabilidade, porém também diminui a eficiência energética do robô.

Figura 7 – Ilustração da plataforma robótica com o braço acoplado (a) e da unidade de instrumentação que é acoplada ao punho do manipulador (b). Adaptado de (GARCIA et al., 2018).



Fonte: do próprio autor.

Sobre o DIANE foi acoplado um braço manipulador Schunk Powerball Arm LWA 4P (SCHUNK, 2017), pesando 15 kg e com capacidade de elevar cargas de até 7,5 kg (Figura 7-a). O braço possui seis Graus de Liberdade (GDL) proporcionados por seis juntas rotacionais, caracterizando assim um manipulador antropomórfico. Apesar de necessitar que um controle mais complexo seja implementado, esta arquitetura permite ao punho do braço assumir diversas configurações de posição e orientação (conhecidos conjuntamente como pose do efetuador).

Manipuladores robóticos deste tipo são basicamente constituídos de elos rígidos unidos por motores que executam a função das juntas rotacionais. Para operar, é necessário que módulos de potência forneçam energia para os motores e módulos de controle enviem comandos a estes afim de realizar as tarefas necessárias. Outra vantagem do manipulador utilizado é a inserção destes módulos de potência no interior das juntas, não requisitando de um módulo externo que ocuparia mais espaço para ser transportado. Outra característica importante é a possibilidade de controlar o braço via rede CAN. Desta maneira, códigos de comando podem ser implementados em um computador embarcado de pequenas dimensões, enviando as informações para o braço através de um conversor USB/CAN. Estas características tornam o Schunk Powerball Arm um manipulador robótico adequado a ser embarcado em uma plataforma móvel.

Por fim, uma unidade de instrumentação (Figura 7-b) com diversos equipamentos foi instalada como efetuador no punho do manipulador. Estes estão listados a seguir:

- **Câmera térmica e RGB - FLIR AX8:** Este componente possui pequenas dimensões, fator de proteção IP-67, e câmeras RGB e térmica. Estas características permitem que o equipamento seja adequado para a obtenção de imagens térmicas em ambiente industrial.
- **Laser - Hokuyo UTM-30LX:** Laser planar de precisão milimétrica e área útil de

270°. É possível rotacionar o laser afim de obter a leitura tridimensional do entorno do equipamento, sendo este muito utilizado em aplicações na robótica atual.

- **Sensor inercial - Xsens Mti-G-710:** Instalado diretamente na carcaça do robô, este é caracterizado como uma Inertial Measurement Unit (IMU), possuindo diversos sensores inerciais embutidos como acelerômetro, GPS, giroscópio e barômetro. É um equipamento de alta qualidade, pequenas dimensões e baixo consumo energético. Seu encapsulamento com fator de proteção IP-67 também o torna adequado para operações em ambiente industrial.
- **Microfone:** Foi utilizado um microfone convencional com faixa de leitura dos 20 Hz aos 20 kHz.
- **Ponteira de toque:** Não estando ainda disponível o equipamento para realizar a leitura da vibração mecânica da estrutura, um equipamento foi concebido afim de simular suas características. O mesmo é baseado em uma base fixada à unidade de instrumentação, ligado a uma ponteira de toque complacente através de uma mola. Na aplicação futura, um sensor capaz de obter leituras de vibração mecânica (como acelerômetros) será instalado em uma estrutura similar a esta utilizada.

3.2 Implementação e integração

O robô DIANE foi disponibilizado para os testes como uma plataforma robótica finalizada, já possuindo códigos de comando implementados. Foram necessárias apenas pequenas adaptações de *software* para permitir a integração da mesma com o braço e os demais equipamentos.

Por sua vez, não havia ainda disponível uma solução de *software* que permitisse operar o manipulador afim de realizar o toque de seu efetuador em uma estrutura qualquer baseado na leitura do laser planar. A resolução implementada para este problema pode ser resumida na obtenção de um mapa tridimensional por meio do laser planar e posteriormente no cálculo da trajetória do braço para realizar o toque.

Por possuir apenas um feixe de laser, o sensor Hokuyo é capaz de fornecer diretamente apenas a leitura de distâncias em um plano circular no entorno de seu eixo. Afim de obter uma nuvem de pontos tridimensional de todo o ambiente, uma técnica muito utilizada consiste em rotacionar o laser para obter vários planos em revolução. Com estes dados, é possível gerar um mapa tridimensional do entorno utilizando a técnica Octomap (HORNUNG et al., 2013).

Esta técnica necessita que a posição dos pontos gerados pelo laser sejam referenciados com respeito a um sistema de coordenadas referencial. Convenientemente, este é considerado como o sistema de coordenadas do corpo do robô. Estando o Hokuyo fixado ao punho do

braço manipulador, é necessário se obter a pose do sistema de coordenadas do punho com respeito ao robô. Isto pode ser obtido através do uso da cinemática direta, que permite obter a pose de um sistema de coordenadas a partir das variáveis das juntas sequenciais que ligam o sistema de coordenadas inicial até o desejado. Mais detalhes dessa técnica podem ser encontrados em (SPONG et al., 2006).

Uma vez gerado o mapa tridimensional do estado do robô+manipulador e de seu entorno, é necessário calcular a trajetória que o braço deverá executar para realizar o toque na estrutura. Para isto, foi utilizado o pacote MoveIt! (CHITTA; SUCAN; COUSINS, 2012) do Robot Operating System (ROS) (QUIGLEY et al., 2009).

O ROS é um sistema operacional moderno voltado para a programação de robôs, proporcionando como vantagens a possibilidade de reutilização de código, modularidade dos programas (chamados de nós), fácil comunicação entre módulos, entre outras características. Este sistema é largamente utilizado pelas comunidades científica e industrial atuais para a programação de dispositivos robóticos.

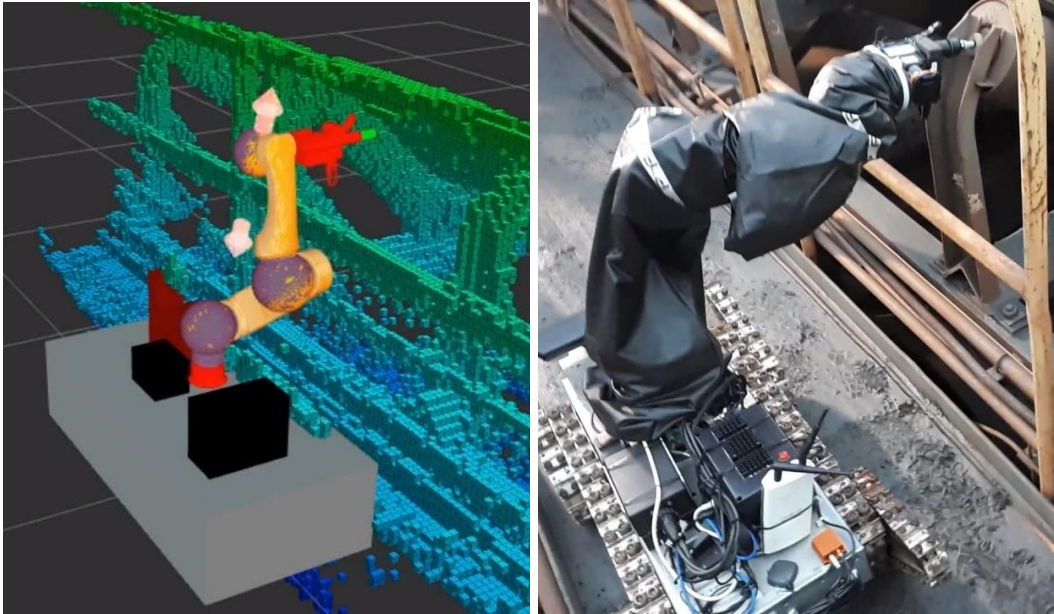
O MoveIt! é um pacote que incorpora diversos algoritmos para o planejamento de movimento, geração de trajetórias e monitoramento de ambiente, permitindo que estas técnicas sejam intuitivamente aplicadas a robôs fixos (manipuladores) e móveis. Foi então utilizada a biblioteca Open Motion Planning Library (OMPL) (PAN; CHITTA; MANOCHA, 2012) fornecida pelo MoveIt!, em conjunto com o Octomap gerado e o Robotic Arm's Unified Robot Description Format (URDF) do conjunto robô+manipulador para gerar a representação de espaço de estados. Com isto, um algoritmo RRT (SUCAN; MOLL; KAVRAKI, 2012) é utilizado para calcular a trajetória do braço até o ponto de toque, evitando obstáculos existentes. A execução do movimento calculado por este método pelo braço é efetivo, sendo possível tocar pontos desejados no mapa tridimensional com boa precisão. A Figura 8 ilustra o mapa construído, bem como a realização do toque pelo manipulador.

Uma vez prontos os códigos da plataforma e do braço, a integração dos equipamentos foi feita no laboratório do Centro de Engenharia Logística (CEL) do Porto de Tubarão. É possível visualizar na Figura 6 a plataforma robótica DIANE com o manipulador Schunk Powerball Arm e a unidade de instrumentação acoplados.

O robô DIANE também possui seus códigos de comando programados em ROS. Isso facilita a integração do *software* da plataforma com o manipulador.

Dois computadores são embarcados no conjunto. O primeiro é instalado na carcaça do DIANE, tendo como objetivo fazer o comando dos atuadores da plataforma, bem como obter e transmitir para a base as imagens das câmeras utilizadas para a teleoperação. O segundo computador é instalado sobre a plataforma dentro de um *case* de proteção, possuindo a tarefa de obter a leitura dos sensores, realizar o mapeamento e todo o controle

Figura 8 – Mapeamento tridimensional do TC através do laser plantar (à esquerda) e braço manipulador realizando o toque no rolo para inspecionar melhor a peça (à direita).



Fonte: do próprio autor.

do braço manipulador. Ambos estes computadores são dispositivos de dimensões reduzidas e alto poder de processamento, sendo adequados a serem embarcados em dispositivos móveis com fonte limitada de energia.

Em questão de comando, a plataforma móvel e o manipulador são acionados separadamente. O robô é atualmente teleoperado, sendo que uma primeira base de controle exibe as imagens das câmeras embarcadas no DIANE e permite que comandos através de um *joystick* sejam enviados para o acionamento da plataforma. O controle do braço é realizado em uma segunda base de comando através das técnicas e *softwares* descritos nesta seção.

A comunicação do robô com a base de comando foi realizada via *wireless* utilizando um rádio Ubiquiti Rocket M900 embarcado na plataforma com duas antenas omnidirecionais. Sendo visado a utilização apenas em curtas distâncias para os testes preliminares, a base de comando recebeu os sinais do robô através das próprias placas de rede *wireless* de seus computadores. Para aplicações à longa distância porém, é possível utilizar na base um segundo rádio Rocket M900 ligado a uma antena Ubiquiti Airmax Amy 9m16. A combinação destes rádios e antenas permite que uma comunicação de até 50km possa ser estabelecida em visada direta.

Como descrito no texto, os principais equipamentos da unidade de instrumentação possuem fator de proteção IP-67. O robô DIANE possui proteção contra respingos de água, podendo ser operado sob chuva ou sobre poças de lama. O braço manipulador, por sua vez, não é projeto para aplicações *outdoor*; por isto, um tecido impermeável foi adaptado

para envolver o braço de maneira a proteger este contra eventuais intempéries, mas sem atrapalhar seus movimentos.

Figura 9 – Transposição de obstáculos com a plataforma robótica.



Fonte: do próprio autor.

3.3 Análise preliminar de mobilidade

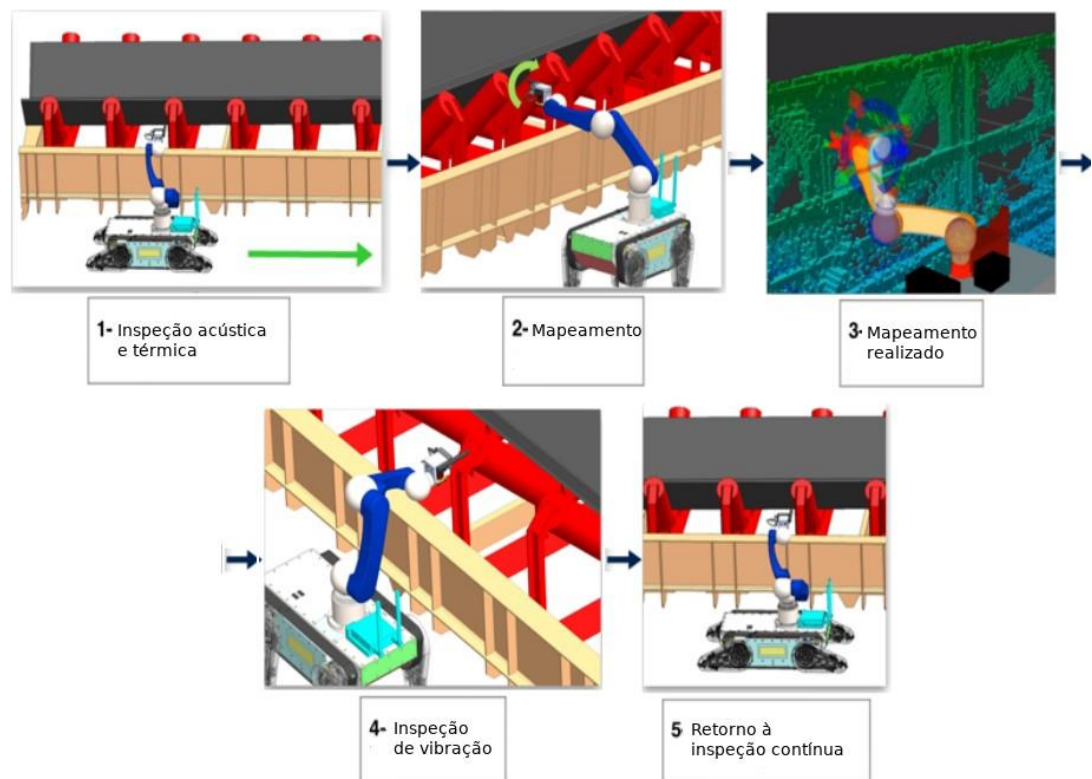
A primeira parte dos testes de campo visou avaliar a mobilidade do robô na região onde as inspeções acontecem. Foi requisitado ao dispositivo transpor diversos obstáculos, como escadas, trilhos de trem, trechos lamacentos e terrenos não estruturados (Figura 9).

Os braços de alavanca do robô são dotados de esteiras ativas e podem rotacionar 360°. Esta composição é muito eficiente para várias situações, principalmente em subir e descer escadas. Os braços se levantam para alcançar e puxar o dispositivo para o primeiro degrau; à medida que a escadaria é percorrida, estes se reconfiguram afim de permitir uma transposição e finalização do movimento suave, sem solavancos.

A disponibilidade de braços nos dois lados do robô é uma vantagem, pois permite que obstáculos sejam transpostos em ambos os sentidos de direção. Sendo assim, não há a necessidade de manobrar o robô em uma plataforma estreita afim que este desça uma escada previamente transposta; a descida pode ser realizada de ré. Além disto, as mesmas podem ser rotacionadas para baixo, elevando a altura do conjunto afim de que peças mais altas do TC possam ser inspecionadas.

No geral, a plataforma móvel se mostrou versátil, conseguindo transpor todos os terrenos propostos. Mesmo com uma carga acoplada em sua parte superior (elevando a altura do centro de gravidade), este modo de locomoção conseguiu passar por situações 'ingremes sem perder a estabilidade

Figura 10 – Etapas da inspeção dos rolos de TC.



Fonte: Adaptado de (GARCIA et al., 2018).

Em alguns dos dias de testes houveram precipitações, criando assim trechos lamacentos. Apesar de conseguir se locomover nestas regiões, foi constatado que houve grande acúmulo de sujeira em peças mecânicas externas e nas esteiras. No longo prazo, esta exposição pode causar avarias na estrutura do dispositivo.

A passarela de passagem do agente de inspeção ao lado dos TC geralmente possui um chão em grade (visualizável na imagem da esquerda da Figura 11). Após os testes, notou-se que a interação com esta estrutura foi danoso às esteiras, sendo que diversas placas e frisos sofreram deformações ou quebras.

O robô DIANE possui velocidade de translação de 0,3 m/s sobre terreno plano e pavimentado, permitindo que sejam inspecionados continuamente aproximadamente 1 km de TC em uma hora; adicionando os tempos de parada e de locomoção da base até às correias, este tempo aumenta consideravelmente. Esta velocidade desenvolvida é considerada muito baixa para aplicação visada, já que a inspeção de algumas centenas de metros de TC levaria horas.

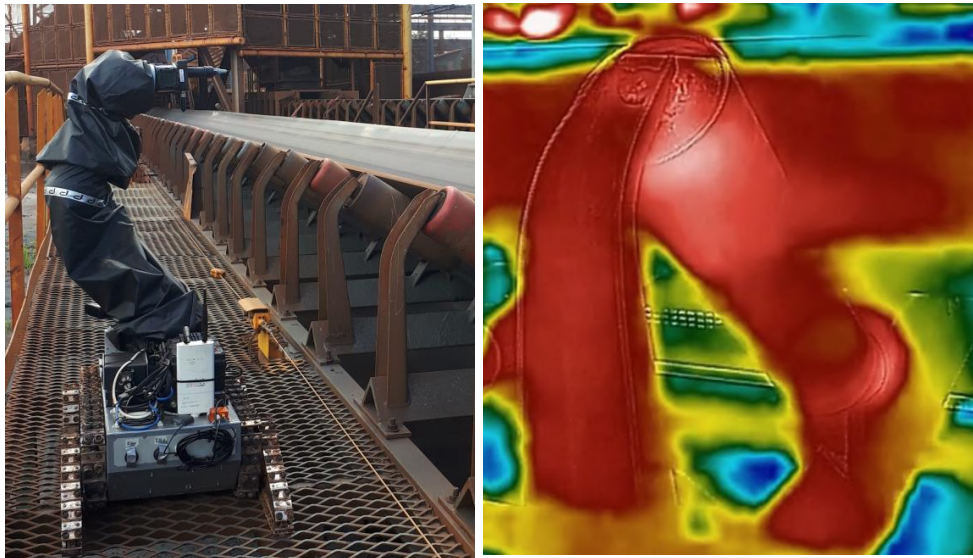
3.4 Inspeção dos TC

Como segunda fase dos testes, o dispositivo foi conduzido a realizar a inspeção de seções dos TC. Esta ação foi realizada de modo tele-operado, sendo que os comandos para a plataforma móvel e para o braço eram fornecidos por operadores através de uma base remota. A inspeção pode ser clarificada em cinco etapas.

1. O robô é disposto sobre a passarela de inspeção, localizada ao lado do TC (Figura 11). Nesta etapa, a plataforma móvel deve se locomover linearmente ao longo da correia com uma velocidade constante, mantendo o braço em uma posição de forma que permita à câmera térmica filmar os rolos à medida que a extensão vai sendo percorrida. Além dos dados térmicos, também são coletadas informações acústicas através dos microfones.
2. Os dados coletados pela câmera térmica e pelo microfone são enviados em tempo de execução para a base de comando, sendo que um especialista analisa continuamente as informações apresentadas. São procuradas anomalias, como sinais sonoros fora do padrão de funcionamento regular ou temperaturas acima de 60°C. Caso algo do tipo seja encontrado, a plataforma interrompe o deslocamento ao lado do rolo anômalo para realizar uma inspeção individual mais detalhada.
3. Para realizar inspeção mais detalhada, é necessário tocar a estrutura com a ponteira da unidade de instrumentação. Para isto, o braço é rotacionado afim de permitir que o laser planar gere o mapa tridimensional da estrutura visada (procedimento exposto na Seção 3.2). O movimento de rotação do punho deve ser executada de maneira segura, evitando contatos não desejados com o TC.
4. O especialista utiliza o mapa tridimensional e imagens da câmera RGB para escolher o ponto da estrutura que deseja tocar afim de obter os dados de vibração. O algoritmo de planejamento de trajetória com evasão de obstáculos é então executado para permitir que o manipulador toque a estrutura sem esbarrar em nenhuma parte do TC ou qualquer outro eventual obstáculo.
5. Após realizar o toque, é disponibilizado para o especialista as informações de vibração mecânica, além das imagens térmicas e do sinal acústico. Este é capaz então de fazer um diagnóstico detalhado da situação do rolo em questão, indicando ações que devem ser tomadas afim de reparar ou substituir a peça danificada. O sensor IMU permite obter através de uma antena GPS a localização do rolo não sadio com precisão de menos de 1 m, auxiliando na posterior identificação do rolo pela equipe de manutenção. O autor em (NASCIMENTO et al., 2017a) inclusive demonstra a viabilidade em integrar um sistema de monitoramento de TC com *softwares*

empresarias de gestão. Tendo terminado o toque, o braço retorna para a configuração de inspeção contínua e o movimento da plataforma é retomado.

Figura 11 – Plataforma móvel realizando inspeção visual e acústica (à esquerda) e imagem da câmera térmica detectando a irradiação dos rolos (à direita).



Fonte: do próprio autor.

Cabe ressaltar que a ação de toque na estrutura com o TC em funcionamento não poderia ser realizada por um operador humano, devido a sua alta periculosidade; entretanto, esta ação é altamente necessária para se obter informações sobre a situação do rolo que não poderiam ser coletadas com a correia parada. Sensores como acelerômetros possuem alta precisão e permitem que padrões de uma avaria em formação sejam detectadas. Isto aumenta a predição de falhas no TC, diminuindo as chances de haver uma parada emergencial devido a um rolo já comprometido.

Por fim, o conjunto da plataforma móvel com esteiras + braço manipulador se mostrou adequado e promissor para realizar a inspeção estrutural de TC. Durante os testes conduzidos, foi possível locomover o robô por diversos tipos de terrenos e obstáculos, sendo também provado factível a realização da inspeção contínua e toque do braço manipulador na estrutura afim de obter dados mais detalhados da mesma.

Como visto, porém, algumas características da plataforma móvel atual não são ideais para a execução rotineira da inspeção de TC. O próximo capítulo irá tratar destes pontos e apresentar as propostas de solução atualmente em discussão.

4 Projeto da Nova Plataforma Móvel

Como exposto no Capítulo 3, a plataforma robótica utilizada nos testes de conceitos, o robô DIANE da UFRJ, foi projetado para um outro tipo de aplicação: a neutralização de artefatos explosivos. Para esta atividade, é requisitado que o robô percorra apenas curtas distâncias, priorizando a capacidade de levantar carga e de subir/descer escadas em ambiente estruturado. Por isto, algumas de suas características de operação não são otimizadas para a inspeção de TC em ambiente industrial da mineração.

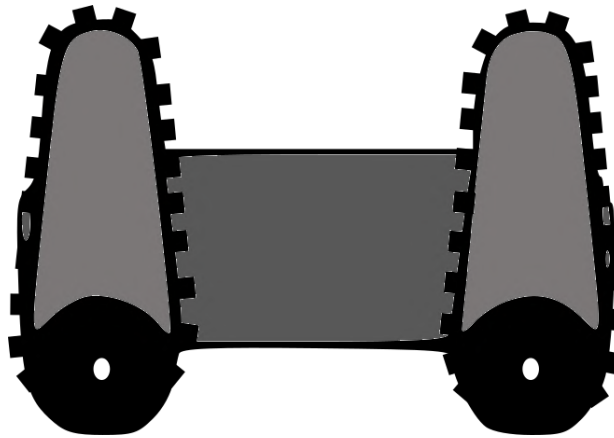
A velocidade de translação da plataforma (em torno de 0,3 m/s) é considerada abaixo da desejada para a finalidade em questão. Tendo em vista o exemplo citado no Capítulo 1, sobre a inspeção de 300 m de correia, o robô levaria cerca de 17 minutos para percorrer continuamente esta extensão, enquanto um operador levaria cerca de apenas 4 minutos (considerando uma pessoa se locomovendo a 5 km/h). Adicionando à inspeção os tempos de deslocamento da base até o TC, inspeção individual dos rolos, manobras e transposição de obstáculos, este tempo sobe ainda mais. Logo, é desejável que a nova plataforma robótica possua velocidade de translação pelo menos 3 vezes maior para realizar inspeções em um tempo próximo do praticado atualmente.

Outro ponto limitante está na eficiência energética do dispositivo. O robô consome atualmente em média 6 A para se locomover em terreno plano. Em situações de transposição de obstáculos, subindo escada, ou transportando carga (como no caso de um manipulador com unidade de instrumentação), este consumo tende a aumentar. Além de outros fatores, esta baixa eficiência energética é devida ao uso de esteiras como modo de locomoção; o alto consumo energético é uma característica intrínseca deste tipo de mecanismo. Além do mais, o DIANE foi projetado com restrição de peso mínimo, sendo que algumas peças foram superdimensionadas para atingir este objetivo. Este sobrepeso também é um fator de impacto no consumo energético.

Foi também notado durante os testes de conceito a alta exposição de certos componentes mecânicos do sistema de locomoção ao ambiente. As esteiras são feitas de pequenas chapas de alumínio soldadas sobre uma corrente similar a utilizada em motocicletas; este conjunto é tracionado através de engrenagens dentadas que são atuadas diretamente pelos motores localizados no interior da carcaça. Em algumas partes do robô, as guias da corrente de transmissão são feitas de polímeros, sendo suscetíveis à entrada de poeiras. Considerando o ambiente industrial onde serão realizadas as inspeções, com relevante quantidade de finos no ar e detritos pelo terreno (além de lama, pelotas de ferro, e outras eventualidades), há grande probabilidade destes componentes se deteriorarem no longo prazo por causa do acúmulo de sujeira, ou repentinamente devido a eventual entrada de um corpo sólido nas engrenagens.

Portanto, baseando-se no robô DIANE e considerando os requisitos para a inspeção de

Figura 12 – Esboço conceitual da nova plataforma para a inspeção dos rolos de TCs.



Fonte: do próprio autor.

TC, bem como o estado da técnica (como visto no Capítulo 2), é proposto o conceito de uma nova plataforma móvel, ilustrada na Figura 12.

Neste novo desenho, o robô possui quatro rodas comuns acopladas a braços independentemente acionados com esteiras. A montagem é feita de maneira que as esteiras apenas tocam o solo quando os braços estão abaixados; em caso contrário, as rodas se tornam os mecanismos de locomoção principais.

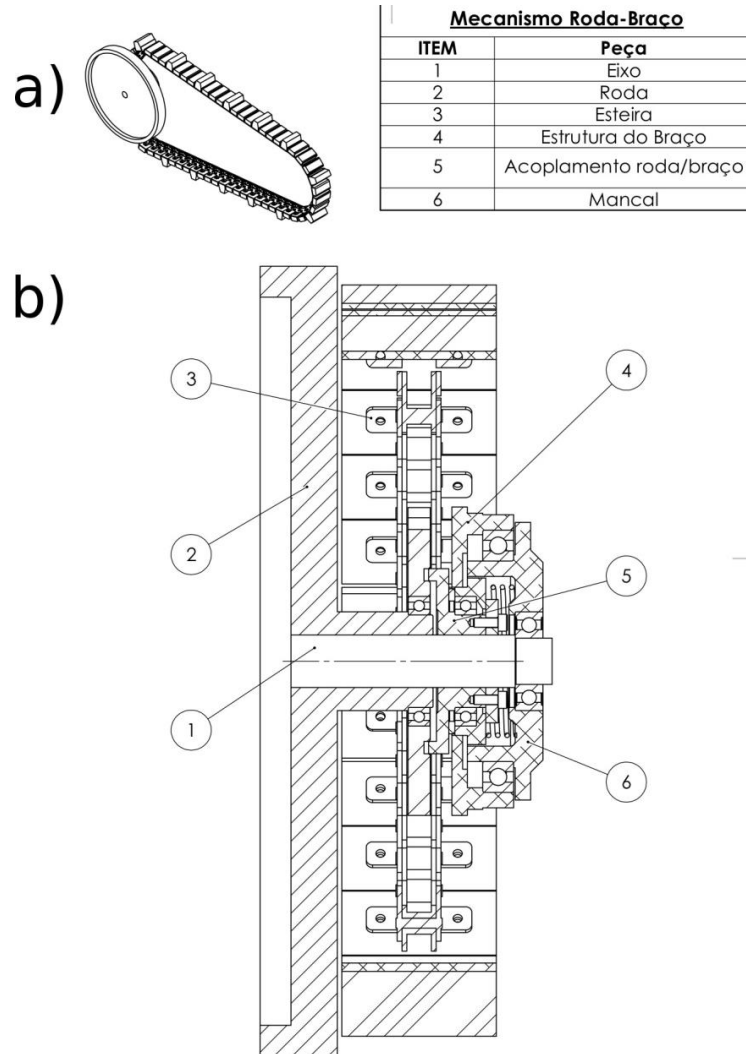
Em qualquer uma das duas situações, assume-se que o robô se comporta como um dispositivo *Skid-steering* (KOZŁOWSKI; PAZDERSKI, 2004). Mesmo não possuindo rodas esterçáveis, esta arquitetura permite que o veículo realize curvas explorando o derrapamento lateral dos mecanismos de locomoção (ROCHA; FREITAS; MAGALHÃES, 2018).

Durante a inspeção contínua dos rolos, o dispositivo tem que executar deslocamentos retilíneos na maior parte do tempo, realizando apenas pequenas correções na trajetória quando necessário. Nesta situação, os braços podem ser levantados e, por meio de um *switch* mecânico proposto (Figura 13), a tração das esteiras é desacoplada. Este *switch* é projetado para ser um elemento passivo, fazendo o desacoplamento apenas quando os braços se encontram na posição vertical, denominada posição de repouso. Assim, a energia necessária para realizar o deslocamento da plataforma será requisitada apenas pelas rodas, diminuindo a demanda das baterias.

As esteiras dos braços se tornam atuadas ao sair da posição de repouso, podendo auxiliar na realização de manobras, subir/descer escadas (Figura 3), transpor obstáculos, entre outros movimentos. Nota-se também a possibilidade de orientar os braços sentido para baixo, elevando a altura do robô e permitindo que elementos de maior altura do TC possam ser inspecionados.

Podendo cada um dos quatro braços ser acionado independentemente, é possível utiliza-

Figura 13 – a) Conceito do braço de alavanca com esteira e roda. b) Detalhamento do *switch* mecânico acoplamento/desacoplamento da tração nas esteiras do braço.

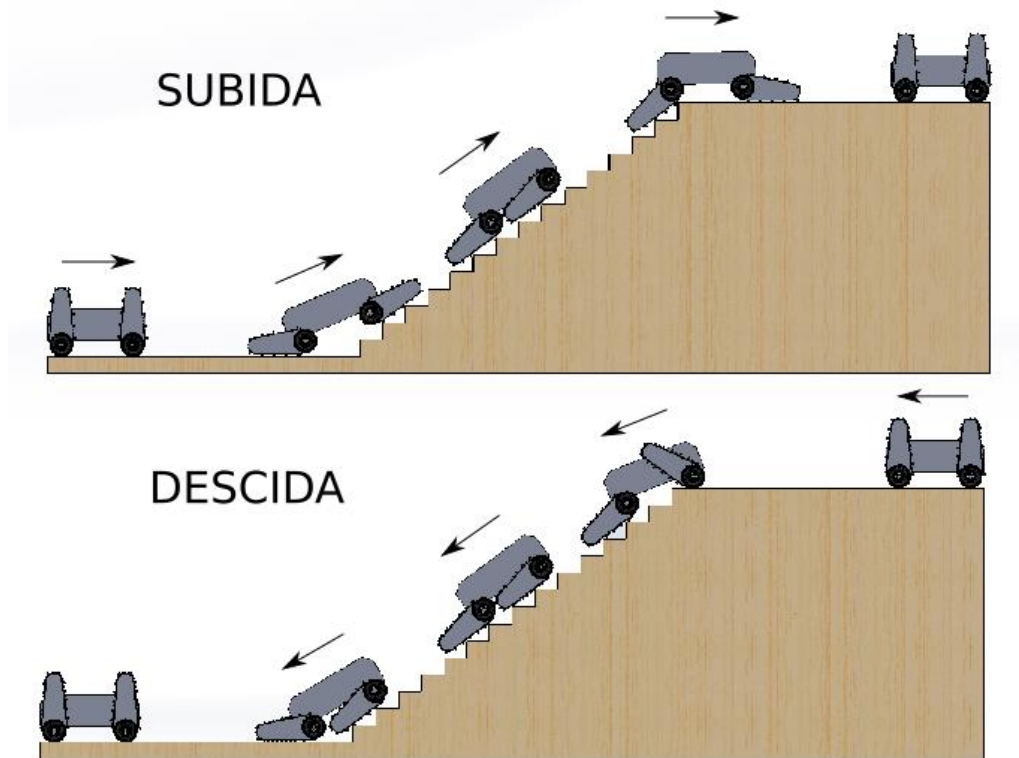


Fonte: do próprio autor.

los para controlar ativamente os ângulos de *roll* e *pitch* da plataforma robótica. Além disto, o braço manipulador que será fixado sobre a plataforma pode se reconfigurar com o objetivo de deslocar o Centro de Gravidade (CG) do conjunto. Estas duas estratégias podem ser utilizadas em conjunto para controlar ativamente a estabilidade do robô, diminuindo as chances de um tombamento. Existem na literatura pesquisas indicando a viabilidade da implantação de tal conceito (FREITAS, 2014).

É visado também a internalização do maior número possível de elementos mecânicos e o encapsulamento dos que necessariamente se localizam no exterior da carcaça. A transmissão de torque a partir da engrenagem dentada é realizada no DIANE pelas próprias esteiras. Com a eliminação da esteira central no novo projeto, a transmissão poderá ser realizada

Figura 14 – Projeto da nova plataforma realizando a subida e descida de escadas.



Fonte: do próprio autor.

internamente à carcaça do dispositivo. Além disto, estão sendo implementados retentores e outras peças de proteção nas partes sensíveis exteriores do robô.

Finalmente, cabe ressaltar que esta proposta de conceito da nova plataforma robótica se encontra em fase inicial.. Estão sendo realizados estudos e desenhos mecânicos preliminares a fim de analisar a viabilidade técnica da mesma. Desta forma, a solução apresentada aqui possui caráter provisório, podendo ainda passar por modificações de alguns de seus conceitos.

5 Conclusões

Este relatório parcial contempla as atividades realizadas até o momento no projeto Dispositivo Robótico Para Inspeção de Rolos de Correias Transportadoras.

Além da introdução descrevendo a relevância do tema, é apresentado o estudo do estado da arte na inspeção de rolos de correias transportadoras. Dois levantamentos são feitos, sendo o primeiro tratando das técnicas atuais de inspeção disponíveis e o segundo sobre as plataformas robóticas móveis voltadas para a versatilidade na transposição de diferentes terrenos.

São apresentados então os resultados obtidos em um teste de conceito realizado no Porto de Tubarão. Foi utilizado com o plataforma móvel o robô DIANE da UFRJ, sendo acoplado sobre este um braço manipulador Schunk PowerBall Arm LWA 4P. O dispositivo robótico se mostrou adequado para realizar todas as tarefas propostas em campo, conseguindo transpor obstáculos como escadas, realizar mapeamento termográfico e acústico dos rolos, além de tocar a estrutura através de uma ponteira para simular a captura de informações vibracionais. Estes resultados são promissores, mostrando a viabilidade técnica do presente projeto.

O teste de campo também foi útil em apresentar as limitações da plataforma robótica utilizada para operar no setor industrial da mineração. Considerando isto, é apresentado por fim o conceito da nova plataforma robótica otimizado para operar nestes ambientes.

É importante que o novo dispositivo robótico consiga aliar capacidade de transpor obstáculos, eficiência energética, velocidade de translação e robustez. Dentre outras características, é proposto a utilização de rodas em conjunto com braços dotados de esteiras, de forma que os mesmos sejam utilizados apenas na transposição de obstáculos. Um *switch* mecânico permite que a tração das esteiras sejam desativadas em certas situações. Esta arquitetura possibilita ao robô consumir menos energia enquanto realiza as inspeções, já que poderá acionar apenas as rodas para se locomover.

Cabe ressaltar que esta proposta ainda está em estágio inicial, sendo que constantes melhorias estão sendo constantemente incorporadas ao novo conceito. Além disto, projetos mecânicos afim de avaliar a viabilidade técnica do desenho proposto estão em fase de estudos.

Como próximos passos do desenvolvimento, serão finalizados os desenhos mecânicos e elétricos da nova plataforma. Simulações computacionais serão realizadas afim de comprovar a eficiência da arquitetura proposta. Simultaneamente, serão definidos os equipamentos e componentes necessários a serem adquiridos para dar início à montagem da nova plataforma robótica.

REFERÊNCIAS

- ZIGBEE ALLIANCE. **What is Zigbee?** 2018. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/what-is-zigbee/>>. Acesso em: 01 maio 2018.
- BELLER, J. **Optical time domain reflectometer (OTDR) with improved dynamic range and linearity**. US n. PI 5621518A. 10 out. 1995, 15 abr. 1997.
- CHITTA, S.; SUCAN, I.; COUSINS, S. MoveIt! [ROS Topics]. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v. 19, n. 1, p. 18–19, mar. 2012.
- COIFMAN, R. R.; WICKERHAUSER, M. V. Entropy-based algorithms for best basis selection. **IEEE Transactions on information theory**, v. 38, n. 2, p. 713–718, mar. 1992.
- CORTES, C.; VAPNIK, V. Support-vector networks. **Machine learning**, v. 20, n. 3, p. 273–297, set. 1995.
- ENDO, D.; WATANABE, A.; NAGATANI, K. Stair Climbing Control for 4-DOF Tracked Vehicle Based on Internal Sensors. **Journal of Robotics**, v. 2017, out. 2017. ISSN 1687-9600. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/jr/2017/3624589/>>.
- ENTEZAMI, M. et al. Acoustic analysis techniques for condition monitoring of roller bearings. In: CONFERÊNCIA IET SOBRE MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES FERROVIÁRIAS, 6., 2014, Birmingham, UK. **Resumos...** Birmingham, UK: IET, 2014.
- FREITAS, G. M. **Reconfiguração de robôs móveis com articulação ativa navegando em terrenos irregulares**. 2014. 230 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- GAO, X. et al. Dynamics and stability analysis on stairs climbing of wheel–track mobile robot. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 14, n. 4, jul. 2017. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1729881417720783>>
- GARCIA, G.; et al. Modeling and control of a novel robotic device for inspection of belt conveyor idler rolls. 2018.
- HORNUNG, A. et al. OctoMap: an efficient probabilistic 3d mapping framework based on octrees. **Autonomous Robots**, v. 34, n. 3, p. 189–206, abr. 2013.
- HU, C. et al. Applications study of distributed optical fiber sensor system in coal mine. In: Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2011, Wuhan. **Resumos...** Wuhan, China: IEEE, 2011.
- INGENUITY. **Smart-Idler™**. 2016. Disponível em: <http://www.ingenuitydesign.com.au/portfolio-posts/smart-idler/>. Acesso em: 01 maio 2018.
- IROBOT. **iRobot 710 Kobra**. 2014. Disponível em: <https://www.army-technology.com/projects/irobot-710-kobra-multi-mission-robot/>. Acesso em: 05 fev. 2018.
- JUNBO, T. et al. Fault diagnosis method study in roller bearing based on wavelet transform and stacked auto-encoder. In: Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 27., 2015, Qingdao. **Resumos...** Qingdao: IEEE, 2015.
- KING, E. G. et al. **Stair climbing robot**. US n. PI 4993912A1989. 22 dez. 1989, 19 fev. 1991. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US4993912A/en>.

KOZŁOWSKI, K.; PAZDERSKI, D. Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot. **International Journal of Applied Mathematics and Computer Science**, v. 14, n. 4, p. 477–496, 2004. Disponível em:

<https://pdfs.semanticscholar.org/1398/c5f864e155d5641aaf2101ee62bc0dbccef8.pdf>.

LI, W. et al. Design of online monitoring and fault diagnosis system for belt conveyors based on wavelet packet decomposition and support vector machine. **Advances in Mechanical Engineering**, UK; London, England, v. 5, jan. 2015.

LODEWIJKS, G. Strategies for automated maintenance of belt conveyor systems. **Bulk Solids Handling**, v. 24, n. 1, p. 16–22, jan. 2004.

LODEWIJKS, G. et al. An application of the iot in belt conveyor systems. In: International Conference on Internet and Distributed Computing Systems, 9., 2016, Wuhan. **Resumos...** Wuhan: Springer, 2016. p. 340–351.

NASCIMENTO, R. et al. An integrated inspection system for belt conveyor rollers. In: International Conference on Enterprise Information Systems, 19., 2017. **Resumos...** 2017.

NASCIMENTO, R. S. et al. **Inspecção autônoma de transportadoras de correia - Plataforma integrada com uso de VANTs**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto; Instituto Tecnológico Vale - Mineração, 2017.

NIE, C.; PACHECO, X.; SPENKO, M. Robots on the Move: versatility and complexity in mobile robot locomotion. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v. 20, n. 4, p. 72–82, dez. 2013. ISSN 1070-9932. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/6582554/>>

NORRIS, R. D.; MOUTZOURIS, P. An idler, a method for monitoring a plurality of idlers, and a conveyor system. **Bulk Solids Handling**, 2014.

PAN, J.; CHITTA, S.; MANOCHA, D. Fcl: A general purpose library for collision and proximity queries. In: International Conference Robotics and Automation, 2012, Saint Paul. **Resumos...** Saint Paul: IEEE, 2012. p. 3859–3866.

QUIGLEY, M. et al. Ros: an open-source robot operating system. **ICRA workshop on open source software**. 2009. v. 3, n. 3/2, p. 5.

ROCHA, F. A. S.; FREITAS, G. M.; MAGALHÃES, P. H. V. **Análise de Mobilidade de um Dispositivo Robótico Para Inspecção Remota de Cavidades**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto; Instituto Tecnológico Vale - Mineração, 2018.

ROGERS, A. J. Distributed optical-fibre sensors for the measurement of pressure, strain and temperature. **Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers**, v. 58, n. 5, p. S113–S122, jul./ago., 1988.

RUDAKEYCH, P. E. **Mobile robotic vehicle**. US n. PI US8353373B2, 26 abr. 2012, 15 jan. 2013. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US9180920B2/en>.

SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. [S.l.]: Elsevier, 2004. 272 p.

SCHUNK. **Powerball Lightweight Arm LWA4P**. 2017. Disponível em: <http://www.schunk-modular-robotics.com/en/home/products/powerball-lightweight-arm-lwa-4p.html>. Acesso em:

05 jan. 2018.

APSENSING. **Fire Detection**. 2017. Disponível em:
<<https://www.apsensing.com/application/fire-detection/>>. Acesso em: 01 maio 2018.

SEO, B. et al. FlipBot: a new field robotic platform for fast stair climbing. **International Journal of Precision Engineering And Manufacturing**, v. 14, n. 11, p. 1909–1914, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12541-013-0259-8.pdf>.

SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. **Robot modeling and control**. New York: Wiley, 2006. v. 3.

SUCAN, I. A.; MOLL, M.; KAVRAKI, L. E. The open motion planning library. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v. 19, n. 4, p. 72–82, 2012.

VAYERON. **Smart Idler Technology**. 2018. Disponível em:
<<http://vayeron.com.au/tech/>>. Acesso em: 01 maio 2018.

WANG, S. et al. Ultra-high-resolution OTDR based on linear optical sampling. In: OptoElectronics and Communications Conference (OECC), 21., Niigata, 2016. **Resumos...** Niigata: IEEE, 2016.

YANG, B. Y. **Fibre optic conveyor monitoring system**. 2014. 108 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Escola de Engenharia Mecânica e Mineira, Universidade de Queensland, 2014.

YANG, W.; ZHANG, X.; MA, H. An inspection robot using infrared thermography for belt conveyor. In: International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 13. Xi'an, 2016. **Resumos...** Xi'an: IEEE, 2016. p. 400–404.

YOKOGAWA. **Fiber Optic Sensor**. 2017. Disponível em:
<<https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/field-instruments/fiber-optic-sensor/>>. Acesso em: 01 maio 2018.

YONG W. GONG, M. Z. S. R.; GUOAN, G. **Belt conveyor automatic inspection system and method based on multi-rotor unmanned aerial vehicle**. 2014. CN n.PI 103869819B. 18 jun. 2014, 17 ago. 2016.