



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

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS E DE SERVIÇO
EM PROCESSOS DE MINERAÇÃO**

Marcos Paulo Torre

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2019**

Marcos Paulo Torre

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS E DE SERVIÇO
EM PROCESSOS DE MINERAÇÃO**

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. Marcone Jamilson Freitas
Souza, D.Sc.

Ouro Preto
2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T689d Torre, Marcos Paulo .
Desenvolvimento e Aplicação de Robôs Industriais e de Serviço em Processos de Mineração. [manuscrito] / Marcos Paulo Torre. - 2019.
171 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas.

Coorientador: Prof. Dr. Marcone Jamilson Freitas Souza.

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. Robôs Industriais. 2. Robôs de Serviço. 3. Minas e recursos minerais . I.

Freitas, Gustavo Medeiros. II. Souza, Marcone Jamilson Freitas. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB: 1716

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

Desenvolvimento e Aplicação de Robôs Industriais e de Serviço em Processos
de Mineração

Marcos Paulo Torre

Dissertação defendida e aprovada em 02 de setembro de 2019 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



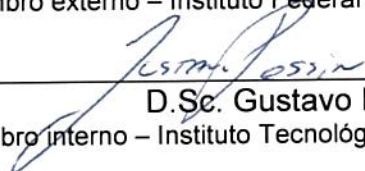
D.Sc. Gustavo Medeiros Freitas
Orientador – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)



D.Sc. José Alberto Naves Cocota Júnior
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Cristiano Lúcio Cardoso Rodrigues
Membro externo – Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)



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

*“Os que se encantam com a
prática sem a ciência são como os
timoneiros que entram no navio
sem timão nem bússola, nunca
tendo certeza do seu destino.”
(Leonardo da Vinci)*

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.)

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS E DE SERVIÇO EM PROCESSOS DE MINERAÇÃO

Marcos Paulo Torre

Setembro/2019

Orientadores: Gustavo Medeiros Freitas

Marcone Jamilson Freitas Souza

A mineração é uma atividade tradicional no Brasil e apresenta um enorme potencial para aplicação de sistemas robóticos, apesar de poucos casos práticos e de sucesso serem percebidos atualmente. Nos últimos anos, nota-se uma evolução no grau de automação de processos, aplicações de robótica e sistemas autônomos no setor, motivada pela abrangência do escopo de atuação e pelo alto número de tarefas complexas, repetitivas, ergonomicamente desfavoráveis e insalubres encontradas nos mais variados processos. O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento e aplicações práticas de robôs industriais e de serviço em processos de mineração. Foram abordados três casos de estudo específicos, voltados para a utilização de um braço manipulador em um laboratório de análises de amostras de minério de ferro e o uso de plataformas móveis em atividades de inspeção de equipamentos e espaços confinados. Testes de campo foram realizados para validação dos sistemas, resultando em uma aplicação real e dois protótipos funcionais, com foco em produtividade e boas condições de trabalho.

Palavras-chave: Robôs Industriais, Robôs de Serviço, Mineração.

Macrotema: Robótica; **Linha de Pesquisa:** Controle e Robótica; **Tema:** Desenvolvimento e aplicação de robôs industriais e de serviço em processos de mineração; **Área Relacionada da Vale:** Laboratórios Físicos, Espeleologia e Inspeção de Equipamentos.

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.)

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF INDUSTRIAL AND SERVICE ROBOTS IN MINING PROCESSES

Marcos Paulo Torre

September/2019

Advisors: Gustavo Medeiros Freitas

Marcone Jamilson Freitas Souza

Mining is a traditional activity in Brazil and has a huge potential for robotic systems application, although few practical and successful cases are currently perceived. Over recent years, there has been an evolution in the level of process automation, robotics applications and autonomous systems in the mining sector, motivated by the high number of complex, repetitive, ergonomically unfavorable and unhealthy tasks found in the most varied processes. The goal of this research is the development and practical applications of industrial and service robots in mining processes. Three specific case studies were addressed, focused on the use of a robotic arm in an iron ore sample analysis laboratory and the use of mobile platforms in equipment and confined space inspection activities. Field tests were performed to validate the systems, resulting in a real application and two functional prototypes, focusing on productivity and good working conditions.

Keywords: Industrial Robots, Service Robots, Mining.

Macrotheme: Robotics; **Research Line:** Control and Robotics; **Theme:** Development and application of industrial and service robots in mining processes; **Related Area of Vale:**Physical Laboratories, Speleology and Equipment Inspection.

Lista de Siglas e Abreviaturas

CBA Congresso Brasileiro de Automática

EOD *Explosive Ordnance Disposal*

HFFS *Hybrid Flexible Flowshop*

HFS *Hybrid Flowshop*

IGS *Iterated Greedy Search*

ILS *Iterated Local Search*

MILP *Mixed Integer Linear Programming*

ROS *Robot Operating System*

SBAI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente

TC Transportador de Correia

TST *Total Setup Time*

VND *Variable Neighborhood Descent*

Sumário

1	Introdução	9
1.1	Motivação	10
1.1.1	Robô manipulador aplicado ao processo de manipulação de amostras de minério	11
1.1.2	Robôs de serviço aplicados à processos de inspeção	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivos Gerais	13
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Organização do trabalho	15
2	INTEGRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DA CÉLULA ROBÓTICA DO LABORATÓRIO FÍSICO DE VARGEM GRANDE	16
3	DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO DE CÉLULAS ROBÓTICAS INDUSTRIAIS COM FOCO NA INDÚSTRIA 4.0	59
4	DISPOSITIVO DE MONITORAMENTO REMOTO DE CAVIDADES - ESPELEOROBÔ	68
5	ESPELEOROBÔ - INSPEÇÃO DA TUBULAÇÃO DE REJEITOS DA USINA DE SALOBO	77
6	MODELAGEM E CONTROLE DE UM DISPOSITIVO ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO DE ROLOS DE TRANSPORTADORES DE CORREIAS	111
7	ESTADO DA ARTE, TESTE DE CONCEITO E ESTUDO TÉCNICO DO DISPOSITIVO ROBÓTICO PARA A INSPEÇÃO DE ROLOS DE CORREIAS TRANSPORTADORAS	120
8	Conclusão	154
8.1	Contribuições da dissertação	155
8.1.1	Integração entre ROS e Equipamentos Industriais	155

8.1.2	Automação da célula de preparação de amostras de minério	155
8.1.3	Capacitação de funcionários Vale	155
8.1.4	Provas de conceito e validação de plataformas robóticas	155
8.1.5	Publicações e apresentações	156
8.2	Sugestão de trabalhos futuros	157
Referências Bibliográficas		159
Apêndices		163
.1	Sequenciamento de tarefas	164
.2	Caracterização do problema	168
.2.1	Sistema de otimização	170

1. Introdução

Na era da globalização, as indústrias de manufatura enfrentam dinâmicas crescentes de inovação, encurtando ciclos de vida e uma diversificação contínua da gama de produtos. Ao mesmo tempo, estas estão sob a pressão da escassez e alto custo de trabalhadores qualificados. Frente a esse cenário, a automação baseada em robôs representa a melhor solução para produtividade e flexibilidade (PAN *et al.*, 2010).

Na indústria da mineração, setor produtivo tradicional no Brasil, esta realidade não é diferente. Apesar do enorme potencial, o emprego de dispositivos robóticos especializados em atividades que envolvam mineração ainda resulta em poucas aplicações práticas e de sucesso. Isso se deve ao fato de que as condições de operação oferecem aos equipamentos grandes dificuldades e riscos - tais como: temperaturas elevadas; excesso de umidade e poeira; solo irregular; exposição à riscos de queda e desabamento - que elevam os gastos de desenvolvimento, execução e manutenção (COTA *et al.*, 2017).

Um estudo realizado por Mesquita *et al.* (2016), com o objetivo de investigar e identificar oportunidades de desenvolvimento e inovação no setor de mineração, mostra que os principais direcionadores estratégicos do negócio são a sobreoferta mundial, a pressão por maior sustentabilidade e a difusão de novas tecnologias. Movimentos estruturais e conjunturais adversos promoverão um importante desafio para a dinâmica setor, principalmente no que se refere ao desenvolvimento e à adoção de novas tecnologias.

Frente a esse cenário, nos últimos anos, nota-se uma evolução na automação de processos, aplicações de robótica e sistemas autônomos no setor da mineração. Robôs industriais e de serviço vêm sendo cada vez mais aplicados nos processos auxiliares de análise, manutenção e inspeção, com foco em aumento de produtividade, redução de riscos ergonômicos e de segurança oferecidos aos operadores. Sistemas de teleoperação de escavadeiras (YUSOF *et al.*, 2015) e até mesmo envolvendo operações autônomas de caminhões fora de estrada (HENDERSON e SPENCER, 2016) já são uma realidade.

Outro campo da robótica largamente explorado, não apenas na indústria da mineração, é relativo à inspeção em ambientes de difícil acesso e/ou inabitáveis por humanos. Algumas aplicações clássicas compreendem inspeções subaquáticas na indústria de óleo e gás (SHUKLA e KARKI, 2016), no interior de tubulações (KWON e YI, 2012), nas estruturas de Obras de Arte Especiais (OH *et al.*, 2009), entre outras.

Quando se deseja robotizar um determinado processo, é extremamente importante que haja um desenho detalhado de todas as tarefas inerentes à atividade, e que sejam identificadas todas as características que possam despadronizar uma determinada etapa. O desafio se torna muito maior quando o processo assume fluxos não mapeados, podendo, inclusive, inviabilizar a aplicação.

Com todas as tarefas mapeadas, a escolha da classe do robô para a aplicação é de igual importância. Dentre os diversos tipos existentes, cada um deles possui características

específicas que os fazem enquadrar em diferentes atividades. Dessa forma, a Seção 1.1 visa descrever a motivação da priorização dos processos utilizados como objeto de estudo dessa dissertação, bem como justificar a escolha do tipo robô para cada cenário.

1.1. Motivação

A principal motivação deste trabalho é a gama de oportunidades e abrangência do escopo de atuação de sistemas robóticos devido ao alto número de tarefas complexas, repetitivas, ergonomicamente desfavoráveis e insalubres que constituem o setor da mineração. Três processos (Figura 1.1 diferentes serão abordados, sendo eles a preparação de amostras de minério de ferro, inspeção em espaços confinados e inspeção de componentes em equipamentos de mineração.

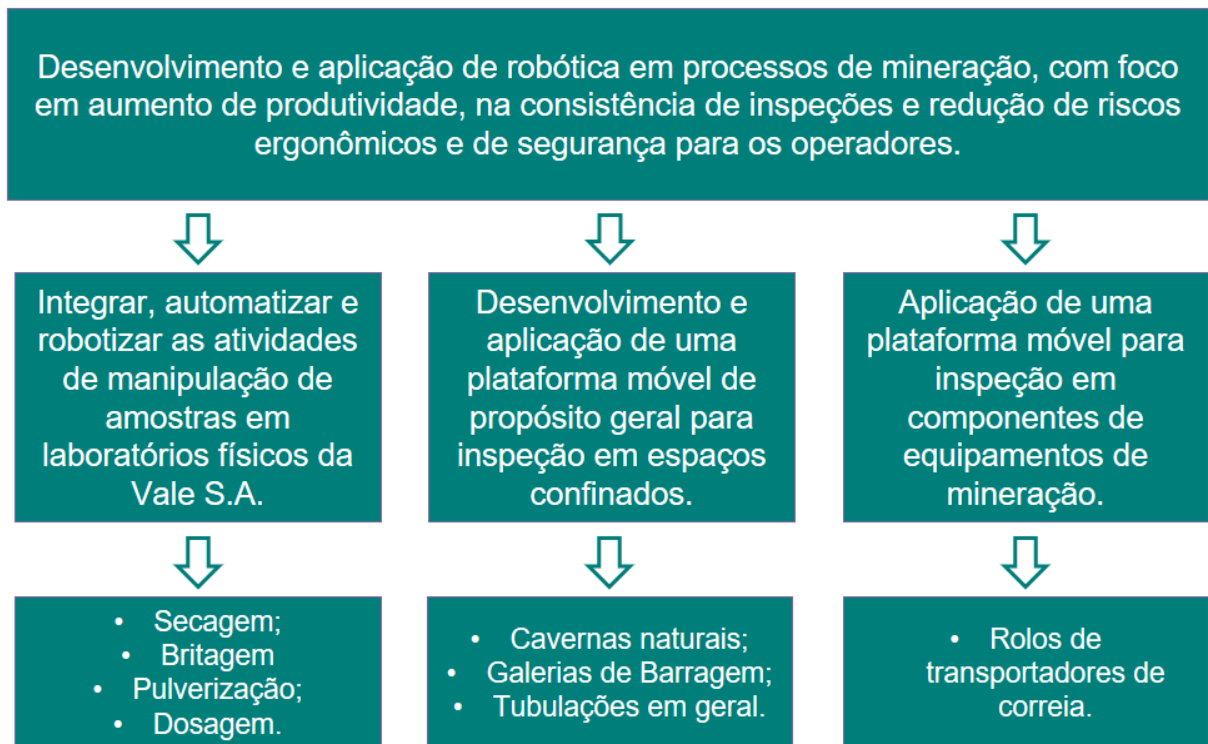


Figura 1.1: Processos de mineração utilizados como tema

No processo de preparação de amostras de minério, o foco será no desenvolvimento de um sistema de integração para vários equipamentos que constituem a atividade, bem como a robotização das etapas de manipulação utilizando um robô industrial. Os principais ganhos são em ergonomia e produtividade, diminuindo a movimentação de cargas pesadas e o tempo de transferência entre as máquinas.

Para inspeção de espaços confinados, foi desenvolvido um robô móvel teleoperado, de propósito geral, capaz de se locomover em diversos tipos de terreno e ambientes. O dispositivo funciona como um porta sensores, e pode tirar operadores do risco oferecido por locais

perigosos e insalubres. O estudo de caso abordado foi a aplicação em inspeções no interior de tubulações e cavernas naturais.

Outro robô móvel teleoperado foi aplicado com foco na qualidade de inspeção em componentes de equipamentos de mineração que exigem análises baseadas na sensibilidade humana e deslocamentos em longa distância. Testes de campo foram realizados para submeter o dispositivo à realidade dos inspetores, visando vencer os desafios de mobilidade e aquisição de dados para extração de informações relevantes. O equipamento alvo desse desenvolvimento foi o transportador de correia, cuja estrutura pode conter milhares de rolos e assumir distâncias superiores à 10km.

1.1.1. Robô manipulador aplicado ao processo de manipulação de amostras de minério

Segundo a Associação das Indústrias de Robótica, um robô industrial corresponde a um manipulador reprogramável, multifuncional, projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais em movimentos variáveis programados para a realização de uma variedade de tarefas (BOMFIM, 2013).

A Vale já utiliza alguns robôs industriais em suas operações, que visam padronizar e aumentar a eficiência dos processos, assim como reduzir custos e riscos para seus empregados. Os sistemas robóticos estão sendo atualmente empregados na montagem, manutenção e limpeza de equipamentos de mineração, além da manipulação de amostras durante ensaios laboratoriais.

A preparação e análise de amostras de minério de ferro são processos extremamente importantes para obtenção das características físico-químicas dos materiais presentes nas diferentes etapas de extração e processamento mineral. Os resultados das análises podem indicar a viabilidade econômica de uma mina, fornecer informações para o controle de processos nas etapas de beneficiamento, bem como aprovisionar indicadores para o controle de qualidade do produto oferecido pela empresa.

O processo de preparação das amostras de minério é constituído de várias etapas. A primeira etapa é amostragem, que segundo Goes *et al.* (1991), consiste na retirada de quantidades moduladas de material de um todo que se deseja amostrar, de forma que essa quantidade seja representativa. Em seguida, a amostra é submetida a vários processos que envolvem secagem, redução de granulometria e dosagem, até a obtenção da amostra final, com massa e distribuição granulométrica adequadas para a realização de análises químicas.

Cada etapa de preparação das amostras é geralmente realizada por equipamentos específicos, o que exige manipulação e distribuição de alíquotas entre as máquinas. Esse procedimento, quando realizado de forma manual, oferece riscos ergonômicos ao operador, além de depender fortemente do fator humano para cumprimento dos prazos de entrega das análises.

O estudo de caso dessa seção é o processo de preparação de amostras de minério de ferro do Laboratório Físico de Vargem Grande, da empresa Vale S.A., que recebe amostras de cinco

tipos de produtos para processamento, sendo eles hematitinha, granulado, *sinter feed*, *pellet feed* e pelotas. Essas amostras podem ser destinadas a dois tipos de análises diferentes: química ou de umidade.

No caso da análise de umidade, as amostras são mantidas em uma estufa por um período pré-estabelecido, de acordo com o tipo de produto, até se obter uma massa constante para determinar o teor de umidade. Ao final do procedimento, a amostra é destinada para a esteira de descarte. A umidade do material é calculada levando em consideração a massa inicial e final da amostra.

A análise química também exige que a amostra esteja seca, e adicionalmente requer algumas transformações físicas para adequações da massa e distribuição granulométrica. Logo, o procedimento inicial de secagem também é realizado, e posteriormente a amostra segue para processamento nos equipamentos de cominuição e dosagem do laboratório.

Devido as características do processo, a automação das etapas de preparação das amostras é extremamente importante para redução do trabalho manual, aumento de performance dos laboratórios, eliminação de erros de amostragem e padronização de tarefas. Dessa forma, são necessários equipamentos capazes de realizar os estágios de forma automática e que todo sistema funcione em sincronia.

As etapas de distribuição de amostras entre os equipamentos demandam uma interligação física entre os mesmos. A utilização de manipuladores robóticos industriais é uma alternativa viável para realização dessa tarefa, devido a possibilidade de reprogramação sem necessidade de alterações de layout, desde que os equipamentos estejam dispostos na área de trabalho do robô.

1.1.2. Robôs de serviço aplicados à processos de inspeção

Os robôs de serviço são equipamentos eletromecânicos reprogramáveis, capazes de efetuar tarefas úteis para seres humanos (KAWAMURA *et al.*, 1996). Dessa forma, estes podem ser aplicados em tarefas normalmente maçantes, repetitivas, perigosas ou em ambientes insalubres.

A indústria da mineração apresenta muitos desafios, em especial quando são atrelados à inspeção de espaços confinados. Estes cenários podem ser encontrados desde a fase de prospecção até a disposição de rejeitos nas barragens. Da mesma forma, a inspeção em massa de componentes de equipamentos de mineração também causa transtornos ao negócio, pois sua efetividade depende fortemente do sentido humano e da experiência dos inspetores.

A presença de cavernas naturais é algo comum em áreas de lavra de minério de ferro. A ciência que estuda a formação e constituição dessas cavernas e grutas é chamada de Espeleologia.

De acordo com de Oliveira (2011), o novo regramento jurídico para a espeleologia no Brasil direcionou grandes esforços da indústria mineral para a prospecção espeleológica e es-

tudos de relevância, visando atender a legislação em vigor e diminuir os riscos e impactos econômicos das suas atividades.

As cavernas naturais podem apresentar grandes variações em sua geometria, tipo de terreno e condições ambientais, com a presença de animais selvagens e peçonhentos e oferecer riscos de desabamento. Por este motivo, o uso de robôs móveis teleoperados, portando sensores adequados, é uma saída para mitigar os riscos previamente mencionados.

Entretanto, os desafios de mobilidade oferecidos pelas cavernas naturais exigem diferentes estratégias para que uma inspeção completa possa ser realizada. Terrenos desnivelados, com presença de rochas, ásperos ou não compactados demandam a intercambialidade de sistemas de locomoção. A comunicação de dados no interior de cavernas também é um gargalo e merece atenção especial.

A inspeção das condições internas de diferentes tipos de tubulação, dependendo das suas dimensões, também se torna um desafio. Por este motivo, este trabalho aborda um robô teleoperado, com sistemas de locomoção intercambiáveis e capaz de portar diferentes tipos de sensores, com o objetivo de inspecionar espaços confinados. Os casos estudados abrangem cavernas naturais, galerias de barragem e tubulações de disposição de rejeitos.

Na mesma linha de pesquisa, foi dado um foco especial à inspeção de rolos de transportadores de correia, equipamentos largamente utilizados para transporte de materiais em operações de mina, usina e portuárias. Os rolos são componentes extremamente importantes na estrutura de um TC e, caso não sejam inspecionados de forma efetiva, podem causar paradas indesejadas e até mesmo danos irreversíveis ao ativo.

Outra característica desafiadora é o grande número de rolos por seção do transportador, que pode assumir distâncias de até 10km, com rolos espaçados a cada 1,5 metro. Um rolamento defeituoso pode causar o sobreaquecimento do rolo e provocar incêndios no tapete de borracha responsável pela condução do material.

Neste sentido, foi proposto o uso de um robô composto por plataforma móvel mais um braço manipulador, teleoperado, capaz de vencer os desafios de locomoção oferecidos pelo ambiente industrial e adquirir dados de temperatura, vibração e ruído desses rolos.

1.2. Objetivos

Esta seção descreve os objetivos gerais e específicos da dissertação.

1.2.1. Objetivos Gerais

De forma geral, o objetivo desta dissertação é o desenvolvimento e aplicação de robótica em processos de mineração, com foco em aumento de produtividade, aumento na consistência de inspeções e redução de riscos ergonômicos e de segurança para os operadores.

Espera-se que o produto de um mestrado profissional contribua de alguma forma com o

setor produtivo nacional e atenda demandas do mercado de trabalho. Nessa temática, também é objetivo dessa dissertação promover a aproximação da academia com o setor industrial, mostrando que, quando alinhados, podem gerar produtos que agregam valor ao negócio e, acima de tudo, melhoram a vida das pessoas.

1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos serão divididos em três áreas de pesquisa distintas.

Em relação à automatização da Célula de Preparação de Amostras de Vargem Grande, o objetivo do projeto é estudar, desenvolver e aplicar ferramentas para integrar e automatizar a manipulação para análises de umidade, bem como as etapas de preparação para análises químicas. Para atingir o resultado desejado, o planejamento a ser seguido contempla: - identificação das características individuais de cada equipamento, incluindo o funcionamento, elementos de comando, controle e protocolos de comunicação; - implementação de integração básica entre os equipamentos, possibilitando a troca de informações e sincronismo de tarefas; estudo do processo de preparação de amostras de minério de ferro para análises químicas e de umidade, identificando as receitas de processamento de acordo com a família do produto; - desenvolvimento de lógicas de controle para automação completa das bateladas de preparação de amostras.

Outro assunto abordado nesta dissertação é a aplicação de uma plataforma móvel para processos de inspeção em espaços confinados, que foi direcionada para cavernas naturais, galerias de barragens e estrutura interna de tubulações de rejeito. Especificamente, foram estudados e propostos: novos sistemas de locomoção, com foco na melhoria da mobilidade do dispositivo; adaptações elétricas, eletrônicas e de *software*, visando maior robustez do hardware e melhorias na interface com o usuário; testes de comunicação no interior de cavernas, com o objetivo de identificar melhores combinações de antenas e rádios para maximizar o alcance do robô.

Na mesma linha de pesquisa das plataformas móveis, o objetivo específico do robô de inspeção de componentes de equipamentos de mineração é aferir, com maior precisão, as condições dos rolos que compõem a estrutura de transportadores de correia. Da mesma forma, o ambiente industrial apresenta obstáculos que devem ser vencidos pelo dispositivo. Logo, o protótipo foi submetido às situações adversas para sua validação, incluindo: - teste de um dispositivo robótico do tipo EOD, escolhido em motivo de suas características construtivas, nas tarefas de transposição de trilhos ferroviários, locomoção em terrenos lamacentos, com presença de pelotas, que exigem subida de escadas e locomoção em passarelas de correias transportadoras; - aquisição de dados utilizando câmeras térmicas, microfones, lasers planares, sensores de vibração e algoritmos de mapeamento dos rolos que compõem o TC.

1.3. Organização do trabalho

Esta dissertação foi escrita como uma coletânea de artigos e relatórios técnicos. Para o processo de robotização da célula de preparação e análise de amostras de minério, o autor da dissertação é o primeiro autor dos documentos. Em relação aos sistemas robóticos de inspeção, o autor desta dissertação contribuiu de forma direta e ativa nas fases de concepção da demanda, desenvolvimento e aplicação dos dispositivos, sendo primeiro autor ou co-autor dos artigos e relatórios aqui documentados.

Nos Capítulos 2 e 3 são apresentados os procedimentos e resultados de campo de um trabalho de integração de equipamentos realizada na célula robótica de Vargem Grande. As dificuldades identificadas devido à despadronização de protocolos dos controladores das máquinas envolvidas na tarefa despertaram o interesse no estudo e proposta de um sistema padronizado para integração de células robóticas, cujos resultados são mostrados por meio de um artigo publicado em congresso nacional (CBA 2018).

O Capítulo 4 aborda um artigo publicado em congresso nacional (SBAI 2017) com o objetivo de introduzir a plataforma robótica de propósito geral desenvolvida para inspeção em espaços confinados, e uma aplicação prática envolvendo a inspeção do interior de uma tubulação de rejeitos é apresentada no Capítulo 5.

Os Capítulos 6 e 7 correspondem a um artigo publicado em congresso nacional (CBA 2018) e relatório técnico, abordando a aplicação de um robô de inspeção de rolos de correia transportadora, com o objetivo de aumento na qualidade de inspeção e diminuição do tempo e distância de deslocamento dos operadores ao longo dos equipamentos.

A conclusão da dissertação é apresentada no Capítulo 8, resumindo as contribuições da pesquisa e propondo trabalhos futuros que possam contribuir com a melhoria da automação dos processos aqui abordados.

2. INTEGRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DA CÉLULA ROBÓTICA DO LABORATÓRIO FÍSICO DE VARGEM GRANDE

PROD. TEC. ITV. MI- N004 / 2017

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV MI

INTEGRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DA CÉLULA ROBÓTICA DO LABORATÓRIO FÍSICO DE VARGEM GRANDE

Relatório parcial do projeto de integração dos equipamentos de automação na célula robótica do Laboratório Físico do complexo de Vargem Grande

Autores:

Marcos Paulo Torre
Sander Soares Queiroz
Gustavo Medeiros Freitas

Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil

Dezembro/2017

Título: INTEGRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DA CÉLULA ROBÓTICA DO LABORATÓRIO FÍSICO DE VARGEM GRANDE	
PROD. TEC. ITV. MI- N004 / 2017	Versão 03
Classificação: () Confidencial () Restrita (X) Uso interno () Publico	

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)

000	Marcos Paulo Torre Sander Soares Queiroz Gustavo Medeiros Freitas
	Título: INTEGRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DA CÉLULA ROBÓTICA DO LABORATÓRIO FÍSICO DE VARGEM GRANDE Ouro Preto Minas Gerais, Brasil Dezembro/2017
	Keywords: 1. Integração. 2. Robótica. 3. Laboratórios Físicos.
	000

RESUMO EXECUTIVO

Este documento descreve os procedimentos e métodos adotados para integração de equipamentos que compõem uma célula robótica da empresa Vale S.A, localizada no laboratório físico do complexo de Vargem Grande, para preparação de amostras de minério de ferro. Como cada etapa do processo é realizada por equipamentos específicos, que utilizam controladores distintos, é necessário que ocorra a integração entre eles para que haja troca de dados e sincronismo de tarefas. Logo, foram definidas e utilizadas técnicas para integração de uma esteira de distribuição, dois moinhos pulverizadores e um manipulador industrial. O resultado final foi atingido através da realização de treinamentos, nos quais as atividades práticas se estenderam para aplicações de campo, de acordo com as necessidades reais da área operacional. No final, as alterações realizadas viabilizaram a operação conjunta dos equipamentos, além de gerar economia para a empresa tanto em treinamentos quanto em contratação de serviços.

RESUMO

Este documento apresenta as etapas adotadas para integração de diversos equipamentos utilizados para preparação de amostras de minério de ferro, presentes no laboratório de análises físicas de Vargem Grande, localizado em Nova Lima, Minas Gerais. Os equipamentos foram adquiridos separadamente e de forma gradual, sendo que as mudanças no cenário da mineração impossibilitaram a contratação de serviços para integração dos mesmos. A ausência de integração entre os equipamentos impossibilitava o sincronismo das tarefas, sendo necessário a presença de operadores para iniciar as etapas do processo manualmente. Na primeira etapa do projeto, os equipamentos envolvidos são um robô ABB IRB 4600 e dois moinhos pulverizadores Herzog, além de uma esteira de distribuição, utilizada para o transporte de amostras até a célula. Cada moinho pulverizador é controlado por um PLC Siemens, da família S7-300, que dependendo de seu modelo e versão, podem possuir interface para redes de campo como Profibus DP, MPI e Profinet. O Robô ABB IRB 4600 é comandado pelo controlador IRC5, e pode ser conectado a redes Profibus DP e DeviceNet. A programação do robô foi realizada através do software RobotStudio, fornecido pela fabricante ABB. Os controladores Siemens foram programados através do software Simatic Manager. No final, foi possível automatizar completamente um processo de pulverização, além de aumentar a capacidade de processamento de amostras, com a operação simultânea de dois moinhos pulverizadores.

ABSTRACT

This document presents the steps adopted for integration of several equipment used for the preparation of iron ore samples, in the physical laboratory of Vargem Grande, located in Nova Lima, Minas Gerais. The gradual assembly of the robotic cell combined with the separate acquisition of each equipment and the change of scenario in the mining business have resulted in the lack of integration between them. Thus, the operators had been starting the process steps manually, since there was no synchronism of tasks between the equipment. The first stage of the project aims to integrate an IRB 4600 robot, two Herzog pulverizing mills and a distribution belt, used to transport samples to the robotic cell. Each pulverizing mill has a Siemens S7-300 PLC for control, which depending on its model and version may have interfaces for field networks such as Profibus DP, MPI and Profinet. The ABB IRB 4600 Robot is controlled by the IRC5 controller and can be connected to Profibus DP and DeviceNet networks. The robot programming is done using the RobotStudio software, which is provided by ABB. Siemens controllers are programmed using the Simatic Manager software. In the end, it was possible to completely automate a pulverizing process and increase the sample processing capacity, with the simultaneous operation of two pulverizing mills.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Célula Robótica de Vargem Grande.	10
Figura 2:	Britador de Mandíbulas Herzog HP-CS/A.	11
Figura 3:	Moinho Pulverizador Herzog HP-M1500.	12
Figura 4:	Unidade dosadora Herzog HP-SCD.	13
Figura 5:	Manipulador Industrial IRB-4600 (ROBOTICS, 2017).	14
Figura 6:	Layout do laboratório de análises físicas.	15
Figura 7:	Fluxo de amostras no laboratório de análises físicas.	15
Figura 8:	Funcionários sendo capacitados em Operação Básica e Programação I.	17
Figura 9:	Funcionários sendo capacitados em Operação Avançada e Programação II.	18
Figura 10:	Funcionários sendo capacitados em programação da família de controladores Siemens S7-300.	19
Figura 11:	Movimento com zona definida (ABB CORPORATION, 2010).	22
Figura 12:	Seleção do modo de movimento pelo FlexPendant.	23
Figura 13:	Adicionar instrução pelo FlexPendant.	24
Figura 14:	Adicionar controlador pela rede.	24
Figura 15:	Configuração de I/O pelo RobotStudio.	25
Figura 16:	Exemplo de código no editor do RobotStudio.	26
Figura 17:	Simbolos em Ladder utilizado por alguns fabricantes de CLP (FRANCHI; CAMARGO, 2008).	27
Figura 18:	Estrutura típica de um degrau em <i>Ladder</i> (FRANCHI; CAMARGO, 2008).	28
Figura 19:	Estrutura do protocolo Profibus DP (XU; FANG, 2004).	29
Figura 20:	Comunicação em <i>Global Data</i> (SIMATIC, 2017).	29
Figura 21:	Serviços para leitura e escrita de dados (SIMATIC, 2017).	30
Figura 22:	Configuração da comunicação entre o Robô e o CLP do Pulverizador 1	31
Figura 23:	Configuração geral de comunicação	32
Figura 24:	Configuração da comunicação entre o Pulverizador 1 e o CLP Intermediário	32
Figura 25:	Configuração da comunicação entre o Pulverizador 2 e o CLP Intermediário	33
Figura 26:	Sinais compartilhados entre o Pulverizador 2 e o Braço Robótico . . .	34
Figura 27:	Lógica de <i>Watchdog</i>	35
Figura 28:	Inserção da amostra na entrada da célula.	36
Figura 29:	Coleta do copo na esteira.	37
Figura 30:	Posicionamento do copo no pulverizador.	37

Figura 31: Posicionamento do copo no pulverizador.	38
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Folha de Dados do britador HP-CS/A	12
Tabela 2:	Folha de Dados do britador HP-M1500	13
Tabela 3:	Folha de Dados da unidade dosadora HP-SCD	14
Tabela 4:	Características da rede Profinet pelo meio físico (SIMATIC, 2017). .	30
Tabela 5:	Tabela geral de comunicação	33

LISTRA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CLP Controlador Lógico Programável

STL *Statement List*

LIMS *Laboratory Information Management System*

ID *Identification*

RFID *Radio-Frequency Identification*

MPI *Multi-Point Interface*

ISO *International Organization for Standardization*

OSI *Open System Interconnection*

IHM Interface Homem-Máquina

GD *Global Data*

SFB *System Function Block*

FB *Function Block*

GLOSSARIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Características dos equipamentos envolvidos	10
1.1.1	Esteira de distribuição	10
1.1.2	Britador de Mandíbulas	11
1.1.3	Moinho Pulverizador	11
1.1.4	Unidade Dosadora	12
1.1.5	Manipulador Industrial ABB IRB 4600	13
1.2	Automação do Laboratório de Vargem Grande	14
1.2.1	Processamento das amostras	15
1.3	Treinamentos Ministrados pelo ITV MI	16
1.3.1	IRC5 - Treinamento de Operação Básica e Programação I	17
1.3.2	IRC5 - Treinamento de Operação Avançada e Pro- gramação II	18
1.3.3	Treinamento de Siemens S7 300 - Programação I . . .	18
2	OBJETIVO	20
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	21
3.1	Programação do Robô ABB IRB 4600	21
3.2	Programação dos Controladores (CLPs)	26
3.2.1	Programação em <i>Ladder</i>	26
3.2.1.1	Contato normalmente aberto	26
3.2.1.2	Contato normalmente fechado	27
3.2.1.3	Instrução bobina	27
3.2.2	Diagrama de contatos em <i>Ladder</i>	27
3.2.3	Rede Profibus DP	28
3.2.4	Multi-Point Interface (MPI)	28
3.2.4.1	Global Data Communication (GD)	29
3.2.5	Profinet - Industrial Ethernet	30
3.2.6	Primeira Etapa	30
3.2.7	Segunda Etapa	31

3.2.8 Terceira Etapa	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Com a intensa busca pela alta produtividade, em paralelo aos requisitos de saúde e segurança necessários para a execução de tarefas inerentes aos diversos ramos de atividade existentes na indústria, as empresas começam a perceber a necessidade aplicar o maior grau de automação possível em seus processos e garantir que a mão de obra esteja capacitada para acompanhar tal evolução.

Devido a capacidade de efetuar tarefas complexas e repetitivas, com alto grau de precisão, velocidade e repetibilidade, os robôs manipuladores se tornaram um importante aliado no caminho para a competitividade que todos os setores industriais visam atingir. As paradas de processo têm durações cada vez mais curtas, sendo a maioria delas já planejadas para manutenções preditivas ou preventivas. Além do mais, os robôs manipuladores podem ser aplicados em ambientes insalubres e em cenários de risco sem perda de desempenho, sendo uma importante ferramenta para evitar riscos à vida dos colaboradores.

A maioria dos robôs industriais utilizam softwares proprietários e controladores nativos, de arquitetura fechada, fazendo com que a integração com dispositivos de fabricantes diferentes se torne uma tarefa difícil.

Segundo Bartolomeu et al. (2005), um dos grandes desafios da robótica é justamente como integrar as informações vindas de todos estes algoritmos e sensores, de modo a gerar comandos e controlar os diferentes dispositivos de atuação do robô, garantindo que a tarefa seja executada de modo correto e sem colocar em risco tanto o robô quanto aqueles que o cercam.

Este relatório descreve as atividades realizadas na Célula Robótica do laboratório físico do Complexo de Vargem Grande (Figura 1), localizado em Nova Lima - MG. Na primeira etapa do projeto, tem-se por objetivo integrar uma esteira de distribuição, dois pulverizadores e um braço robótico. As amostras de minério devem ser submetidas a estes equipamentos para que as sejam feitas transformações físicas necessárias para a confecção de pastilhas fundidas. As pastilhas fundidas, posteriormente, são enviadas para a análise química, onde são retiradas informações importantes para o controle de qualidade do produto.

Os equipamentos foram adquiridos de forma separada, sendo que a montagem gradual da célula robótica aliada com as mudanças no cenário da indústria da mineração impossibilitaram a contratação de serviços para integração dos equipamentos. Isto é, cada um deles possui seu próprio Controlador Lógico Programável (CLP), sem comunicação com os demais. Para possibilitar troca de dados e sincronismo de tarefas, é necessário implementar a comunicação entre os controladores de cada equipamento.

A aquisição dos equipamentos também não contemplava a entrega dos programas



Figura 1 – Célula Robótica de Vargem Grande.

contendo as respectivas lógicas de funcionamento. Para contornar o problema, é necessário realizar o upload dos programas, conectando o computador diretamente aos CLPs. Este procedimento funciona, mas torna difícil a alteração da lógica de funcionamento, visto que programas obtidos por upload não apresentam comentários nas linhas. A linguagem de programação utilizada pelo fabricante, *Statement List* (STL), também torna trabalhosa a interpretação dos mesmos.

1.1 Características dos equipamentos envolvidos

Esta subseção descreve os principais equipamentos envolvidos na automação da célula robótica de Vargem Grande, apresentando algumas características técnicas e os sistemas de automação utilizados para comando e controle.

1.1.1 Esteira de distribuição

A esteira de distribuição é responsável pela alimentação e retorno das amostras dentro da célula robótica. O equipamento é composto por duas esteiras, sendo uma delas responsável por levar os copos metálicos com as amostras até o braço robótico e, a segunda, por trazer

os copos com as amostras já processadas pela célula até o operador. Existem sensores indutivos nas extremidades das duas esteiras, e assim que o copo é posicionado, a esteira se movimenta automaticamente.

O acionamento dos motores é realizado pelo controlador do braço robótico, através do recebimento dos sinais provenientes dos sensores de posição. O sistema de duas esteiras é utilizado para maximizar a capacidade de processamento de amostras, visto que não é necessário aguardar o trânsito de amostras em fluxos distintos.

1.1.2 Britador de Mandíbulas

O britador de mandíbulas HP-CS/A (Figura 2), fabricado pela empresa Herzog, possui uma estrutura de aço anti-pó com porta automática, além de conexão para um sistema de extração de pó externo. O equipamento também possui uma unidade automática de pesagem e manuseio das amostras, incluindo um divisor ajustável com duas saídas de alíquotas e saída separada de resíduos (HERZOG., 2017a).



Figura 2 – Britador de Mandíbulas Herzog HP-CS/A.

O processo de britagem é controlado através de um CLP Siemens S7-314 – 2DP, capaz de se comunicar através dos protocolos Profibus DP e MPI. O sistema de automação é acondicionado em um gabinete de controle com grau de proteção IP-65. A folha de dados do equipamento pode ser vista na Tabela 1.

1.1.3 Moinho Pulverizador

O moinho pulverizador HP-M1500 (Figura 3), fabricado pela empresa Herzog, é responsável por cominuir amostras de minério de ferro para distribuições granulométricas mais baixas do que as conseguidas através da britagem. Desta forma, o equipamento recebe amostras já britadas, acondicionadas em copos de aço-inoxidável, e utiliza um mecanismo de elevação interno para transportar o copo até um dispositivo basculante, onde o conteúdo do mesmo é derramado dentro do moinho (HERZOG., 2017b).

Tabela 1 – Folha de Dados do britador HP-CS/A

Equipamento:	HP-CS/A
Ar Comprimido	
Pressão (kPa)	800
Consumo (L/A)	1500
Consumo(L/min)	1050
Despoeiramento	
Consumo (m ³ /min)	8
Pressão no ponto de conexão equipamento	2,1
Elétrica	
kW	4
Fases	3
Hz	50/60
Alcance (m)	0
Peso (kg)	680
Dimensões (LxWxH)	830x1130x1740



Figura 3 – Moinho Pulverizador Herzog HP–M1500.

O moinho é controlado por um CLP Siemens S7-314C 2PN/DP, capaz de se comunicar através dos protocolos Profinet, Profibus DP e MPI. O sistema de automação é acondicionado em um gabinete de controle com grau de proteção IP-65. A folha de dados do equipamento pode ser vista na Tabela 2.

1.1.4 Unidade Dosadora

A unidade dosadora HP – SCD (Figura 5), fabricada pela empresa Herzog, é responsável por retirar um volume fixo de amostra a partir do material recebido após a etapa de pulverização. O equipamento de dosagem utiliza um amostrador tipo lança para remover a amostra do copo de aço-inoxidável e colocá-lo em um frasco ou recipiente semelhante (HERZOG., 2017c).

Tabela 2 – Folha de Dados do britador HP-M1500

Equipamento:	HP-M1500
Ar Comprimido	
Pressão (kPa)	800
Consumo (L/A)	1500
Consumo(L/min)	1050
Despoeiramento	
Consumo (m ³ /min)	8
Pressão no ponto de conexão equipamento	2,1
Elétrica	
kW	4,8
Fases	3
Hz	50/60
Alcance (m)	0
Peso (kg)	1300
Dimensões (LxWxH)	2230x1138x2168



Figura 4 – Unidade dosadora Herzog HP-SCD.

A unidade dosadora é controlada por um CLP Siemens S7-314C 2PN/DP, capaz de se comunicar através dos protocolos Profinet, Profibus DP e MPI. O sistema de automação é acondicionado em um gabinete de controle com grau de proteção IP-65. A folha de dados do equipamento pode ser vista na Tabela 3.

1.1.5 Manipulador Industrial ABB IRB 4600

O manipulador industrial IRB 4600 (Figura 5), é um robô multi-propósitos de alta produtividade fabricado pela empresa ABB. O robô pode ser montado de várias formas, como no chão, na parede, inclinado ou invertido. Todas as versões do robô possuem grau de proteção IP-67 e podem trabalhar em ambientes severos (ROBOTICS, 2017).

A robô é comandado pelo controlador IRC5, sendo programado pela linguagem RAPID. O controlador IRC5 é capaz de se comunicar através dos protocolos Profibus DP, Devicenet.

Tabela 3 – Folha de Dados da unidade dosadora HP-SCD

Equipamento:	HP-SCD
Ar Comprimido	
Pressão (kPa)	600
Consumo (L/A)	1500
Consumo(L/min)	1050
Despoeiramento	
Consumo (m ³ /min)	8
Pressão no ponto de conexão equipamento	2,1
Elétrica	
kW	0,8
Fases	3
Hz	50/60
Alcance (m)	0
Peso (kg)	220
Dimensões (LxWxH)	600x600x2042



Figura 5 – Manipulador Industrial IRB-4600 (ROBOTICS, 2017).

Profinet e Ethernet/IP.

1.2 Automação do Laboratório de Vargem Grande

A automação do laboratório de Vargem Grande tem como principal meta a redução de trabalho manual, aumento de performance e redução do risco de acidentes. De acordo com a Requisição Técnica emitida pela VALE, o projeto de laboratório automatizado proposto deve acomodar e utilizar um britador, dois moinhos, uma unidade dosadora e um robô, conforme mostrado na Figura 6. O projeto deve contemplar sistemas, serviços e utilidades

com o objetivo de prover um laboratório eficiente e totalmente automatizado, desde a entrada de amostra até a análise, incluindo o armazenamento da amostra e a remoção de resíduos.

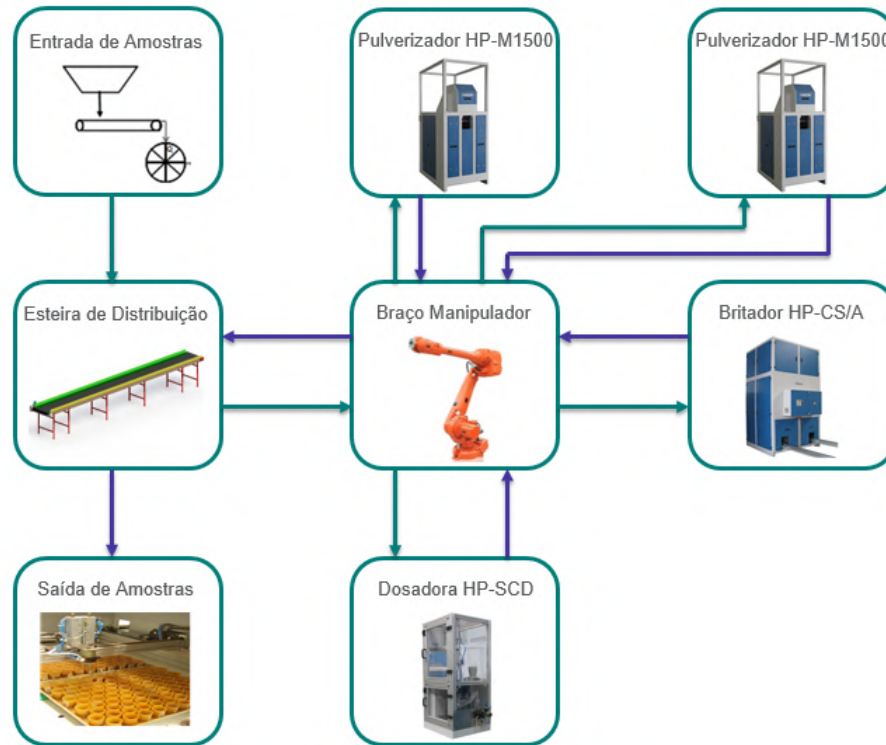


Figura 6 – Layout do laboratório de análises físicas.

1.2.1 Processamento das amostras

O processamento das amostras deve seguir o fluxo de processos mostrado na Figura 7.

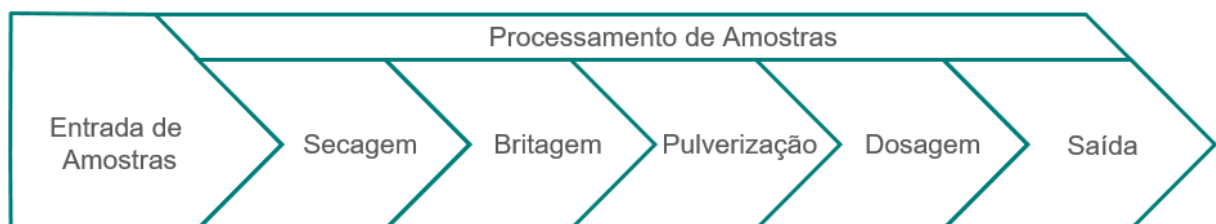


Figura 7 – Fluxo de amostras no laboratório de análises físicas.

Todas as amostras que chegam ao laboratório precisarão de um código de barras ou *Identification* (ID) legível, que pode ser fornecido através de tecnologias que serão estudadas posteriormente, como, por exemplo, o sistema *Radio-Frequency Identification* (RFID). Qualquer amostra que não possuir um ID precisará ser registrada no *Laboratory Information Management System* (LIMS), e um código de barras apropriado lhe será

atribuído, antes da amostra ser introduzida no sistema automatizado. Informações sobre o que precisa ser feito com a amostra (a forma como a amostra precisa ser processada) devem ser definidas no LIMS, ou a própria identificação da amostra deve conter informações sobre como a mesma precisa ser processada através do sistema.

O sistema automatizado possuirá quatro áreas onde as amostras poderão ser inseridas. Uma das áreas disponíveis possuirá capacidade para receber grandes amostras (até 15kg de massa), sendo que a outra receberá amostras secas de até 1kg de massa e distribuição granulométrica inferior a 10mm de diâmetro. As duas posições restantes são relevantes para o registro dos frascos na magazine (bandeja de frascos) e no sistema de fusão.

Depois de efetuar o *login* no sistema automatizado, o dispositivo de entrada de bandeja abrirá e o operador pode derramar a amostra no copo deste dispositivo. A partir daqui, a amostra será transferida para a célula robótica e não será mais manipulada manualmente, até a análise final estar completa.

As amostras destinadas para os processos físicos serão pesadas e colocadas em um forno diversas vezes, até se obter uma massa constante, para determinar o teor de umidade.

O copo com a amostra seca é então colocado no britador HP- CS/A, onde a mesma é britada a -4mm e dividida em duas porções; 700 ± 50 g para análise química e o restante para o descarte. A porção de 700g de amostra britada é então transferida para um dos 2 moinhos HP-M1500, após o qual a parcela de resíduos é transferida pelo robô e descarregada na correia de saída de resíduos e transportada para fora do edifício.

Destes moinhos, a amostra pulverizada é enviada pelo robô para o dosador. Nesta etapa, uma alíquota de 40g da amostra é retirada e transferida para um frasco. Este frasco de amostra é levado diretamente para o laboratório químico, enquanto o restante da amostra pulverizada é removido do dosador pelo robô central e descarregado na correia de resíduos e transportado para fora do edifício, para área de recolha de resíduos. O copo de amostra é limpo na estação de limpeza de copos e devolvido para o moinho, ou colocado no rack de copos, ficando pronto para a amostra seguinte.

Na célula automatizada, a maioria dos equipamentos, com exceção do braço robótico, possuem programação fechada. Além disso, o sistema de limpeza de ar comprimido e o sistema de despoeiramento foram projetados para serem embarcados nos equipamentos, a fim de reduzir o ruído e a exposição dos operadores ao pó. Inclusive, essa arquitetura evita a contaminação cruzada de amostra entre as máquinas e entre cada amostra.

1.3 Treinamentos Ministrados pelo ITV MI

Em paralelo ao aumento do grau de automação de equipamentos e processos, existe a necessidade de manter um quadro de profissionais qualificados para acompanhar a evolução e manter os sistemas em funcionamento. Desta forma, uma série de treinamentos

foram ofertados para que funcionários da Vale, diretamente ou indiretamente envolvidos na automação de processos, estejam aptos a aprender e difundir o conhecimento em automação entre seus pares.

Ao longo dos anos de 2016 e 2017, foram ofertados 7 cursos de robótica e 1 curso de programação de controladores Siemens da família S7-300, onde 36 profissionais da empresa Vale foram capacitados. O valor economizado pela empresa, levando em consideração o preço médio dos treinamentos, gira em torno de R\$130.000,00. Este valor não contabiliza o preço gasto com traslado e hospedagem, visto que estes cursos são geralmente ofertados na sede do fabricante do equipamento.

1.3.1 IRC5 - Treinamento de Operação Básica e Programação I

O objetivo deste treinamento é ensinar os princípios básicos de operação com robôs da ABB que utilizam o controlador IRC5, apresentando de maneira simples e direta os elementos necessários para operadores, técnicos e engenheiros poderem manusear e operacionalizar uma célula de robô em produção, bem como criar, interpretar, efetuar alterações e correções em programas simples.

No total, foram abertas quatro turmas e dezessete funcionários treinados. A Figura 8 mostra alguns profissionais em capacitação no treinamento supracitado.



Figura 8 – Funcionários sendo capacitados em Operação Básica e Programação I.

1.3.2 IRC5 - Treinamento de Operação Avançada e Programação II

Objetivo do treinamento de operação avançada e programação II é ensinar aos participantes a elaborar e interpretar programas de complexidade avançada, bem como atuar na correção e otimização de programas conforme os recursos apresentados, além de um aprofundamento em alguns conceitos do *hardware* do equipamento.

No total, foram abertas três turmas e dezesseis funcionários treinados. A Figura 9 mostra alguns profissionais em qualificação no treinamento avançado e também o momento de entrega de certificados.

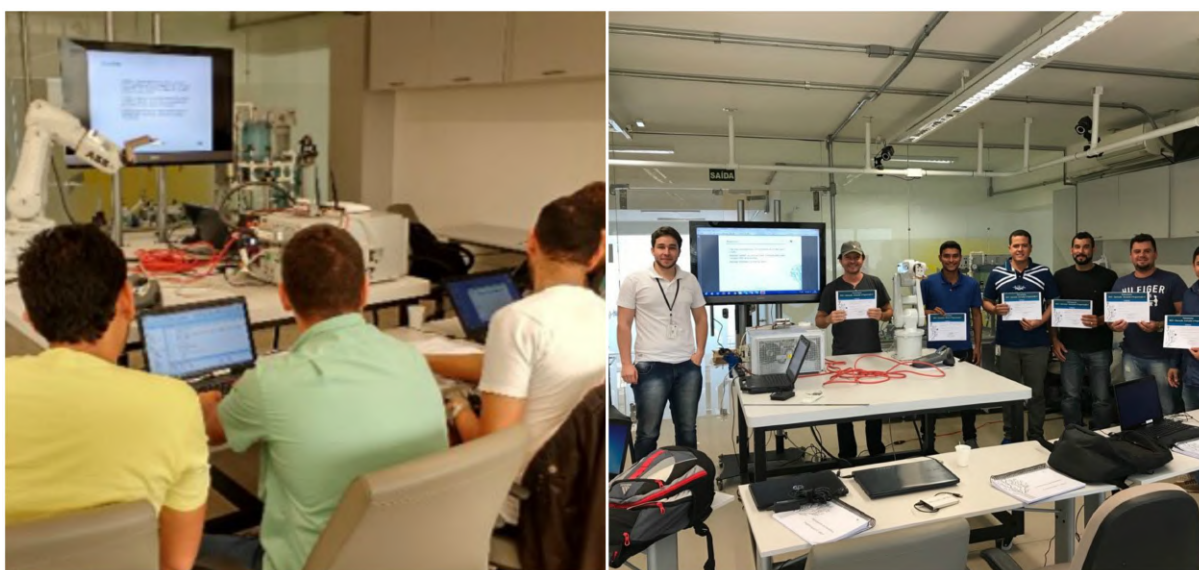


Figura 9 – Funcionários sendo capacitados em Operação Avançada e Programação II.

1.3.3 Treinamento de Siemens S7 300 - Programação I

O objetivo do treinamento de programação I da família de controladores Siemens S7-300 é ensinar os participantes os conceitos da arquitetura dos Controladores Lógicos Programáveis, bem como elaborar, interpretar e atuar na correção de programas de complexidade básica. As principais funções de programação, os conceitos de *hardware* dos CLPs e redes industriais também são abordados.

Até o presente momento, apenas um turma foi aberta, com três funcionários treinados. Neste caso em particular, ocorreu uma extensão do treinamento, onde uma demanda da área envolvendo integração dos equipamentos foi utilizada como prática. A Figura 10 mostra os profissionais sendo capacitados em programação de controladores Siemens S7-300, tanto em sala de aula quanto em aplicações práticas nas dependências da Vale.



Figura 10 – Funcionários sendo capacitados em programação da família de controladores Siemens S7-300.

2 OBJETIVO

O objetivo da etapa do projeto descrita neste relatório é realizar a integração de diversos equipamentos que compõem a célula robótica do laboratório físico de Vargem Grande. As atividades foram subdivididas em três etapas, de acordo com as necessidades da área e da disponibilidade dos equipamentos. A integração entre os equipamentos é necessária para permitir a troca de informações e sincronismo de tarefas entre o braço manipulador ABB IRB 4600 e dois moinhos pulverizadores, que reduzem a granulometria da amostra de acordo com seu tipo. A célula será alimentada com amostras já britadas, que serão inseridas em copos de aço inoxidável, sendo então levadas até o braço robótico. O braço robótico deverá ser capaz de identificar o moinho pulverizador disponível para receber a amostra e então leva-la até seu compartimento de entrada, dando início à batelada de pulverização. Com o processo de pulverização terminado, o robô deverá retirar a amostra do equipamento e coloca-la na esteira de retorno, que levará a amostra até o ponto de retirada. Dessa forma, ocorrerá a redução do trabalho manual nos processos do laboratório físico, diminuição de riscos de acidentes e, conseqüentemente, aumento na eficiência das preparações e na performance geral do laboratório.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo mostra os procedimentos e métodos utilizados para a programação do braço manipulador ABB IRB 4600 e dos controladores industriais Siemens da família S7 300.

3.1 Programação do Robô ABB IRB 4600

O RobotStudio é o software utilizado para desenvolver a programação do controlador IRC5. Entretanto, para a marcação dos pontos que servirão como base para a geração de trajetórias, é feito o uso do FlexPendant, devido a sua praticidade. O FlexPendant também pode ser utilizado para programação do robô, mas à medida que funções de programação mais específicas são necessárias, o uso do RobotStudio se torna mais indicado por ser um ambiente de desenvolvimento.

Neste projeto são utilizados comandos com movimento no espaço de trabalho das juntas, trajetórias lineares e circulares no espaço de trabalho do efetuador, bem como a manipulação de saídas e entradas digitais para o comando e recebimento de estados da garra, pulverizadores e esteira.

O comando de movimento por juntas é utilizado quando não há necessidade de criar uma trajetória linear entre dois pontos no espaço de trabalho do robô, sendo este o comando mais simples para mover o efetuador de um ponto para o outro. Desta maneira, não haverá previsibilidade no movimento do braço e os pontos serão alcançados com trajetórias não lineares. A estrutura de um comando por juntas segue o seguinte padrão:

```
MoveJ ponto, velocidade, zona , ferramenta;
```

Onde:

- **Ponto:** Posição que deve ser alcançada, dentro do espaço de trabalho do robô;
- **Velocidade:** Velocidade das juntas em $^{\circ}/s$, ou mm/s em movimentos lineares;
- **Zona:** Parâmetro que cria uma zona circular ao redor do ponto desejado. O próximo comando começa a ser executado quando o efetuador entra nesta área, realizando um movimento suave e ininterrupto, como mostrado na Figura 11. O desvio deixa de existir caso o valor *fine* seja adotado, garantindo que o efetuador passará exatamente pelo ponto definido.
- **Ferramenta:** Variável relativa ao *Tool Center Point* (TCP), ponto em relação ao qual será definido todo o posicionamento do robô. Caso nenhuma ferramenta seja definida, o TCP adotado é o centro da flange do manipulador.

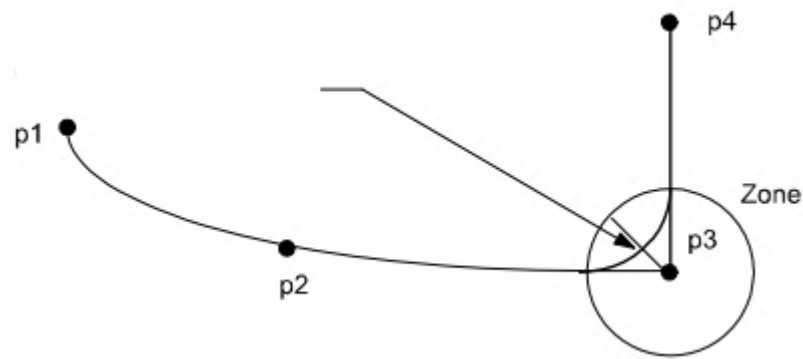


Figura 11 – Movimento com zona definida (ABB CORPORATION, 2010).

O comando de movimento linear é utilizado para mover o efetuador por uma trajetória em linha reta entre dois pontos. Este apresenta estrutura similar ao comando de movimento por juntas:

```
MoveL ponto, velocidade, zona, ferramenta;
```

O comando de movimento circular é utilizado para mover o efetuador descrevendo uma trajetória semicircular, que passa por dois pontos, saindo de um ponto inicial. Sua estrutura segue o seguinte padrão:

```
MoveC ponto1, ponto2, velocidade, zona , ferramenta;
```

O acionamento de uma saída digital é realizado através da função “SetDO”, onde o nome da saída digital deve ser indicado, bem como o estado desejado:

```
SetDo doNome , estado;
```

Onde:

- **doNome:** Nome da saída digital.
- **estado:** Valor booleano desejado na saída (0 ou 1).

A maneira mais simples de marcar os pontos é movendo o robô para a posição desejada e incluir uma instrução de movimento, que automaticamente cria os pontos necessários para sua execução. O nome e a posição destes pontos podem ser modificados manualmente. Há diferentes maneiras de mover o robô em modo manual, podendo ser através de cada junta, movimento linear e por reorientação do efetuador. A seleção é feita no FlexPendant,

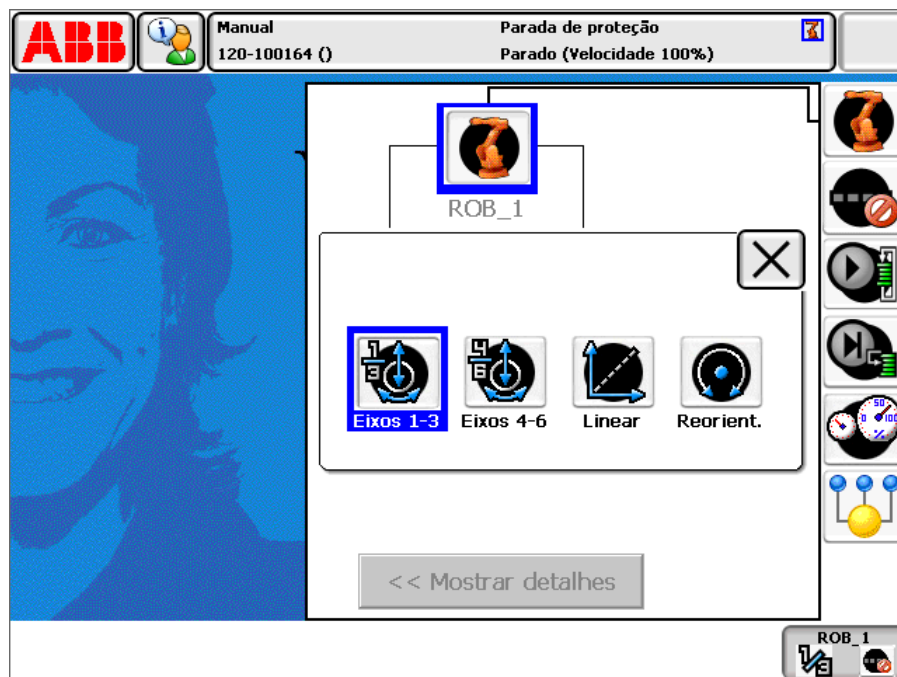


Figura 12 – Seleção do modo de movimento pelo FlexPendant.

conforme mostrado na Figura 12. Após selecionar o modo de movimentação, o braço pode ser movido através *joystick*.

Com o robô posicionado no ponto desejado, o editor de programa deve ser acessado através do “Menu AB”, e as instruções de movimento adicionadas através da opção “Adicionar Instrução”. Para modificar a posição do ponto, basta selecioná-lo e clicar na opção “Modificar Posição”, localizada na parte inferior da interface do FlexPendant, conforme mostrado na Figura 13.

À partir do FlexPendant é possível desenvolver a estrutura base do programa, salvando pontos e programando instruções movimento. É recomendável prosseguir com o desenvolvimento do código pelo software RobotStudio, que apresenta funcionalidades que auxiliam durante a programação, como sugestões de preenchimento de comandos, entre outros. Para isto, é necessário a conexão entre um computador com o software instalado e o controlador IRC5.

Para que a comunicação entre o controlador e o computador com o software RobotStudio seja estabelecida, é necessário que as placas de rede de ambos os equipamentos estejam com endereços de IP configurados na mesma faixa.

O computador pode estar conectado ao robô pela porta ethernet ou pela *service port*, situadas no painel traseiro do controlador. O procedimento para estabelecer a comunicação é realizado através da opção *Add Controller*, localizada na aba *Controller* do *software* RobotStudio (Figura 14). Com o computador conectado pela *service port*, a opção *One*

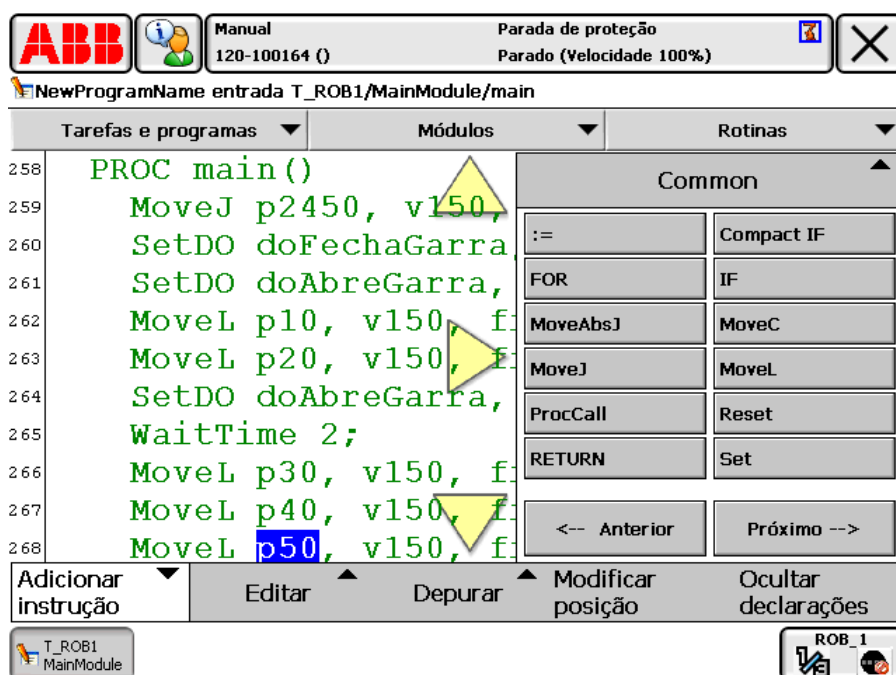


Figura 13 – Adicionar instrução pelo FlexPendant.

Click Connect pode ser utilizada. Caso esteja conectado pela porta *ethernet*, o *software* irá realizar a busca do controlador na rede através da opção *Add Controller*.

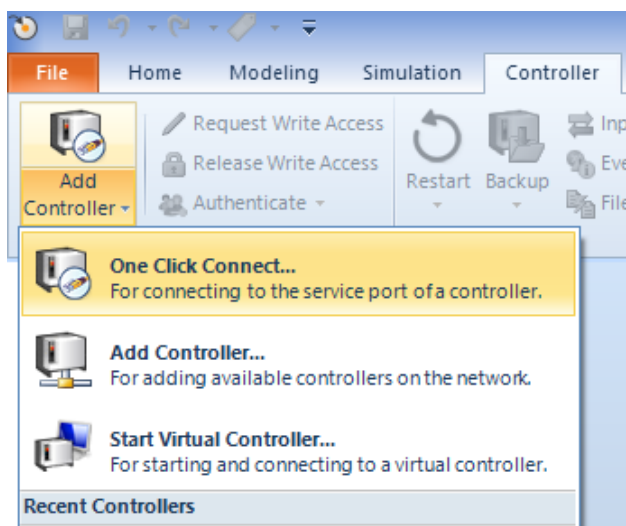


Figura 14 – Adicionar controlador pela rede.

Para prosseguir com a programação pelo RobotStudio, é necessário solicitar o acesso para o controlador IRC5 Compact. O acesso é requerido na aba *Controller*, pela opção *Request Write Access*. A liberação deve ser concedida pelo FlexPendant, após o surgimento de uma caixa de diálogo com as opções de permitir ou negar o pedido.

O primeiro passo é configurar as saídas digitais do controlador que serão usadas no interfaceamento com os demais dispositivos. A lista de I/O do sistema pode ser encontrada através da aba *Controller*, no ícone *Configuration Editor*. Na opção *Signals*, todos os pontos de I/O do sistema podem ser visualizados. A Figura 15 mostra a configuração da saída de abertura da garra, que está mapeada como *bit 0* de saída do módulo DSQC 652, assinado como *BOARD10*.

Name	Value
Name	doAbreGarra
Type of Signal	Digital Output
Assigned to Unit	BOARD10
Signal Identification Label	
Unit Mapping	0
Category	
Access Level	DEFAULT
Default Value	0
Signal Value at System Failure and Power Fail	☐ Set the Default Value ☒ Keep Current Value (no change)
Store Signal Value at Power Fail	☐ Yes ☒ No
Invert Physical Value	☐ Yes ☒ No
Invert Physical Value	☐ Yes ☒ No

Figura 15 – Configuração de I/O pelo RobotStudio.

O programa pode ser aberto através aba *RAPID*, localizada na estrutura de arquivos do RobotStudio. A tarefa principal, *T.ROB1*, possui uma rotina *main*. Ao clicar nesta rotina, o editor de programa será aberto. O mesmo código, feito até então pelo Joystick, aparecerá no editor de programa do *software* RobotStudio. O trecho de código a seguir foi adaptado do programa original, onde são mostrados os exemplos de comando por juntas, lineares e circulares, além do acionamento da saída de abertura da mão robótica:

```

1 MoveJ p10, v300, fine, tool0;
2 MoveL p20, v300, z10, tool0;
3 MoveC p30, v300, z20, tool0;
4 SetDO doAbreGarra, 1;

```

A Figura 16 mostra um exemplo de código no editor de texto do *software* RobotStudio.

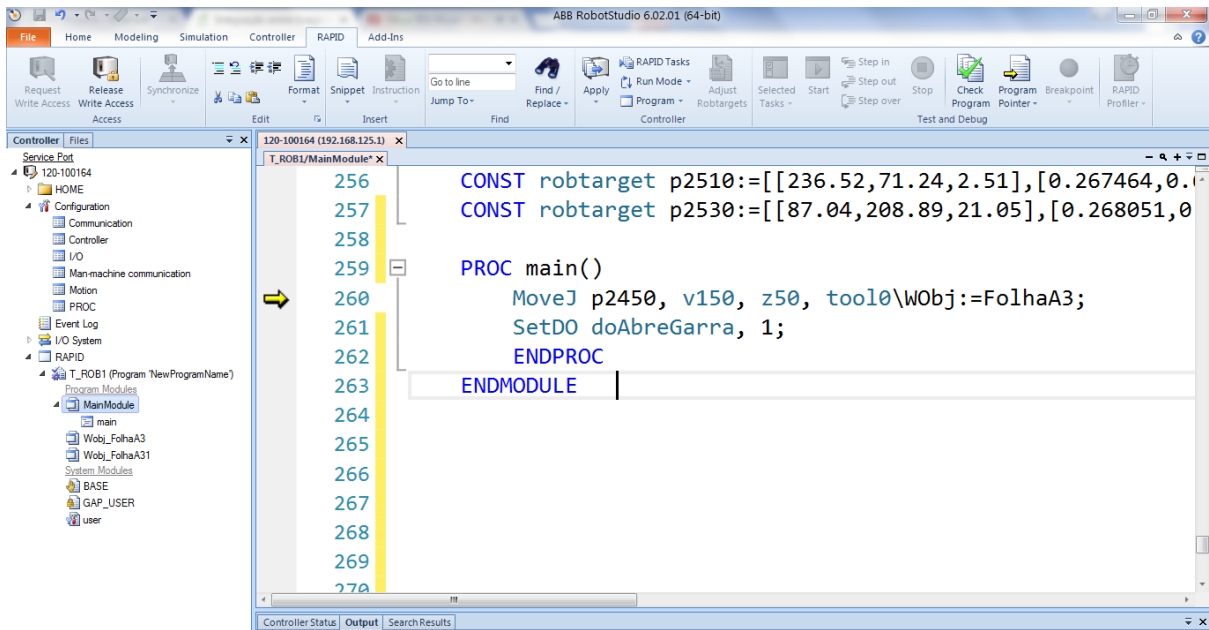


Figura 16 – Exemplo de código no editor do RobotStudio.

3.2 Programação dos Controladores (CLPs)

As atividades de programação dos controladores lógicos programáveis foram realizadas em três etapas, de acordo com as necessidades da área e da disponibilidade dos equipamentos. Antes de qualquer modificação, foi necessário realizar o *upload* das lógicas de controle de todos os CLPs e realizar alguns testes, visando identificar entradas e saídas que seriam necessárias para a integração.

3.2.1 Programação em *Ladder*

A linguagem *ladder* é uma linguagem gráfica baseada na lógica de relés e contatos elétricos, onde símbolos como bobinas e contatos são utilizados. Os símbolos de contatos representam as condições que serão avaliadas de acordo com a lógica. Como resultado, determinam o controle de uma saída, que normalmente é representado pelo símbolo de uma bobina (FRANCHI; CAMARGO, 2008).

3.2.1.1 Contato normalmente aberto

No contato normalmente aberto, a posição original é aberta, ou seja, permanece aberto até que seja aplicada uma força externa.

Se o bit endereçado pela instrução estiver no estado lógico “0”, a instrução retorna com o valor lógico falso e, portanto, não há continuidade lógica no trecho do *ladder* em que a instrução está inserida. Caso contrário, a instrução retorna o valor lógico verdadeiro e, portanto, há continuidade no trecho em que a instrução está inserida (FRANCHI;

CAMARGO, 2008).

3.2.1.2 Contato normalmente fechado

No contato normalmente fechado, a posição original é fechada, ou seja, permanece fechada até que seja aplicada uma força externa.

Se o bit endereçado pela instrução estiver no estado lógico “0”, a instrução retorna com o valor lógico verdadeiro e, portanto, há continuidade lógica no trecho do *ladder* em que a instrução está inserida. Caso contrário, a instrução retorna o valor lógico falso e, portanto, não há continuidade no trecho em que a instrução está inserida (FRANCHI; CAMARGO, 2008).

A Figura 17 mostra alguns símbolos de contato utilizados por alguns fabricantes de CLP em diagramas *Ladder*.

Fabricante	Contato Normalmente Fechado (NF)	Contato Normalmente Aberto (NA)
IEC 61131-3		
Allen-Bradley		
Siemens S7		
GE Fanuc		

Figura 17 – Símbolos em Ladder utilizado por alguns fabricantes de CLP (FRANCHI; CAMARGO, 2008).

3.2.1.3 Instrução bobina

A CPU verifica se há ou não continuidade lógica na linha que antecede a instrução. Caso positivo, o bit endereçado pela instrução será colocado no estado lógico “1”. Caso contrário, o bit endereçado pela instrução será colocado no estado lógico “0” (FRANCHI; CAMARGO, 2008).

3.2.2 Diagrama de contatos em *Ladder*

Segundo Franchi e Camargo (2008), a função principal de um programa em linguagem Ladder é controlar o acionamento de saídas, dependendo da combinação lógica dos contatos de entrada, sendo uma técnica adotada para descrever uma função lógica utilizando contatos e relés com uma notação é bastante simples.

Um diagrama de contatos é composto de duas barras verticais que representam os pólos positivo e negativo de uma bateria. A linha vertical à esquerda representa o pólo positivo e a outra linha paralela à direita representa o pólo negativo. A idéia por trás da linguagem *Ladder* é representar graficamente um fluxo de “eletricidade virtual” entre duas barras verticais energizadas. Essa “eletricidade virtual” flui sempre do pólo positivo em

direção ao negativo, ou seja, sempre da barra da esquerda para a da direita (FRANCHI; CAMARGO, 2008).

A Figura 18 representa a estrutura típica de um degrau em ladder, constituído por instruções de entrada e de saída.

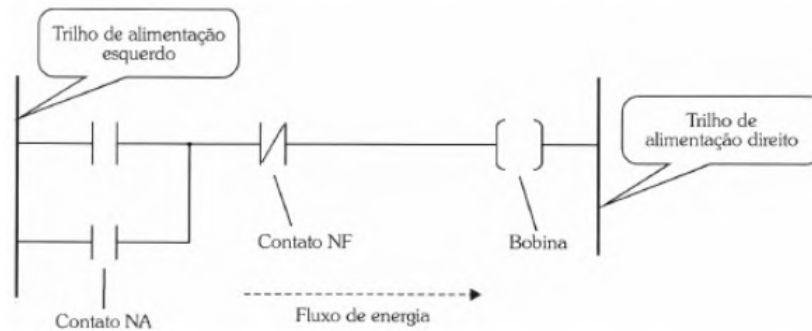


Figura 18 – Estrutura típica de um degrau em *Ladder* (FRANCHI; CAMARGO, 2008).

3.2.3 Rede Profibus DP

Segundo Xu e Fang (2004), a tecnologia Profibus é largamente utilizada em sistemas de manufatura e automação de processos, e inclui três soluções: Profibus DP (Decentralized Periphery), Profibus-PA (Process Automation) and Profibus-FMS (Field Message Specification).

As redes Profibus DP são extremamente utilizadas em sistemas de comunicação de alta velocidade envolvendo sistemas de controle, módulos de I/O distribuídos e dispositivos de campo inteligentes.

Em relação às tecnologias de transmissão física, o protocolo Profibus DP é baseado em RS-485 (par trançado) ou fibra óptica, com *baudrates* de até 12mpbs (KLEINES et al., 2000).

Ainda segundo Xu e Fang (2004), o protocolo Profibus DP adota o modelo *International Organization for Standardization* (ISO)/*Open System Interconnection* (OSI) como referência, porém inclui apenas a primeira e segunda camada, além da interface com o usuário (Figura 19), não utilizando as camadas de 3 a 7 deste modelo devido aos requisitos de alta velocidade de transmissão.

3.2.4 Multi-Point Interface (MPI)

O *Multi-Point Interface* (MPI) é um protocolo proprietário da empresa Siemens ©, sendo uma interface integrada para comunicação entre produtos da família SIMATIC, como controladores, Interface Homem-Máquina (IHM) e dispositivos de programação. A

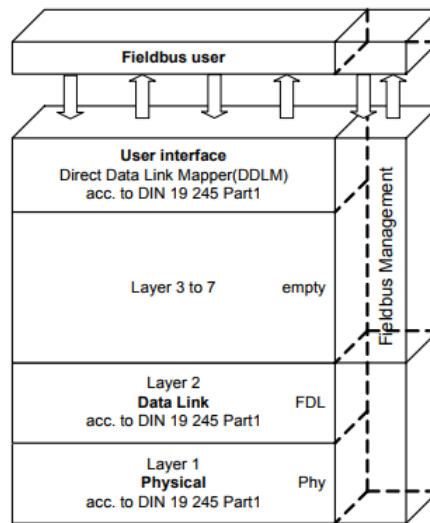


Figura 19 – Estrutura do protocolo Profibus DP (XU; FANG, 2004).

rede MPI pode ser utilizada para estabelecer comunicações de pequeno escopo, com poucos nós e pequeno tráfego de dados (SIMATIC, 2017).

O protocolo MPI, assim como o protocolo Profibus, também é baseada no meio físico RS-485 e pode se comunicar com até 127 nós.

3.2.4.1 Global Data Communication (GD)

Um dos serviços oferecidos pelo protocolo MPI é a comunicação em *Global Data* (GD), que será utilizada na segunda etapa de integração descrita na Subseção 3.2.7. A comunicação em *Global Data* é um serviço para transferência cíclica de dados entre controladores Simatic, de implementação extremamente simples (SIMATIC, 2017). Para que ocorra a troca de dados, todos os nós envolvidos devem estar na mesma subrede MPI.

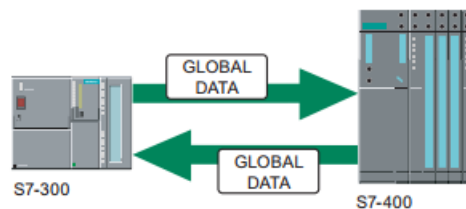


Figura 20 – Comunicação em *Global Data* (SIMATIC, 2017).

O método utilizado para transmissão de dados em *Global Data* é do tipo *broadcast*, ou seja, não há confirmação de recebimento de dados entre os nós. Logo, o método não apresenta um mecanismo para garantia da integridade e precisão dos dados transmitidos. Desta forma, foi utilizado um método de *watchdog* para identificar falhas de comunicação, conforme explicado na Subseção 3.2.8.

Tabela 4 – Características da rede Profinet pelo meio físico (SIMATIC, 2017).

Meio	Topologia	Número de Nós	Comprimento da Rede
Cobre	Estrela	Máx. 126	Até 5km
	Barramento		
	Árvore		
Fibra Óptica	Estrela	Máx. 1000	Até 150km
	Anel		
	Barramento		
Rádio	Estrela	Máx. 8	Até 1km por segmento

3.2.5 Profinet - Industrial Ethernet

Segundo Jasperneite e Feld (2005 apud FELD, 2004), o Profinet é uma iniciativa para adaptar o Ethernet para ambientes industriais. O Profinet consiste de várias funcionalidades, como automação distribuída (Profinet CBA), dispositivos de campo descentralizados (Profinet IO), gerenciamento de redes, guias de instalação e integração web.

A Tabela 4 mostra as características da rede Profinet de acordo com o meio físico adotado.

Através da rede Profinet, é possível configurar serviços de comunicação S7 para que haja troca de informações entre controladores da família Simatic, utilizando *System Function Block* (SFB) e *Function Block* (FB). Desta forma, é possível ler e escrever dados em controladores S7 300 e S7 400, como mostrado na Figura 21.

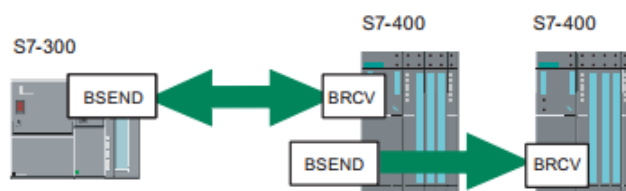


Figura 21 – Serviços para leitura e escrita de dados (SIMATIC, 2017).

3.2.6 Primeira Etapa

Na primeira etapa de programação dos CLPs, foi necessário implementar a comunicação entre o controlador ABB IRC5, responsável pelo controle do Braço Robótico, e o CLP Siemens S7-314/2DP, que controla o pulverizador 03_HP-M1500. Como havia um interface Profibus DP disponível no controlador IRC5, a mesma foi configurada para trabalhar como escravo do CLP Siemens, como mostrado na Figura 22.

Logo, após esta configuração, os controladores do Robô e do Pulverizador 1 passaram a compartilhar 16 bytes de dados no total, sendo 8 bytes de entrada e 8 bytes de saída.

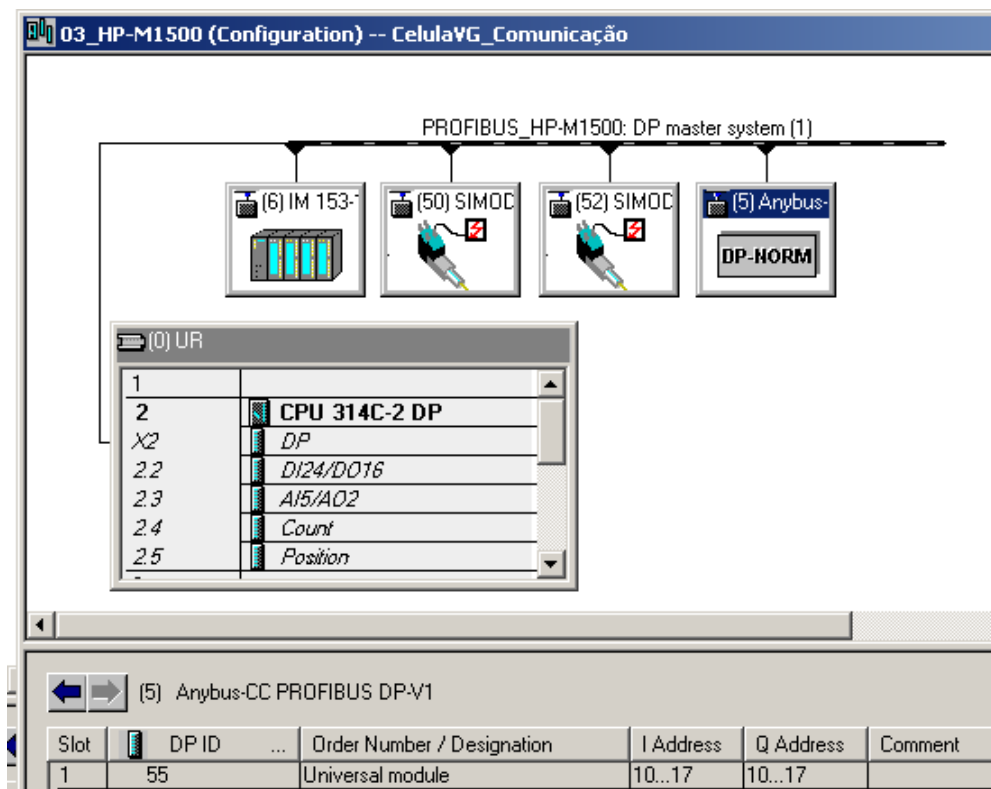


Figura 22 – Configuração da comunicação entre o Robô e o CLP do Pulverizador 1

3.2.7 Segunda Etapa

Até o início dessa etapa, apenas era possível sincronizar tarefas entre o Robô e o Pulverizador 1. Com a necessidade de inclusão de outros equipamentos, como um segundo pulverizador, foi necessário implementar a comunicação entre três controladores.

A dificuldade enfrentada foi a não disponibilidade de interfaces entre os diferentes modelos de CLPs. O controlador do Pulverizador 1 não poderia se comunicar diretamente com o CLP do pulverizador 2, visto que um deles possuía apenas uma interface MPI disponível e, o segundo, uma interface Profinet. A solução encontrada foi utilizar um CLP intermediário, que possuía as duas interfaces disponíveis, que passou a ser utilizado como CLP Mestre da célula robótica. A configuração geral de comunicação entre os equipamentos pode ser vista na Figura 23.

A comunicação entre o Pulverizador 1 e o CLP intermediário foi implementada através de *Global Data*, que trafega através da interface MPI, como mostrado na Figura 24.

Após esta configuração, os controladores passaram a compartilhar 2 bytes de memória, sendo 1 byte de entrada e 1 byte de saída.

A comunicação entre os controladores Intermediário e Pulverizador 2 foi implementada através da interface Profinet, e também programada para transmitir 2 bytes de dados (1

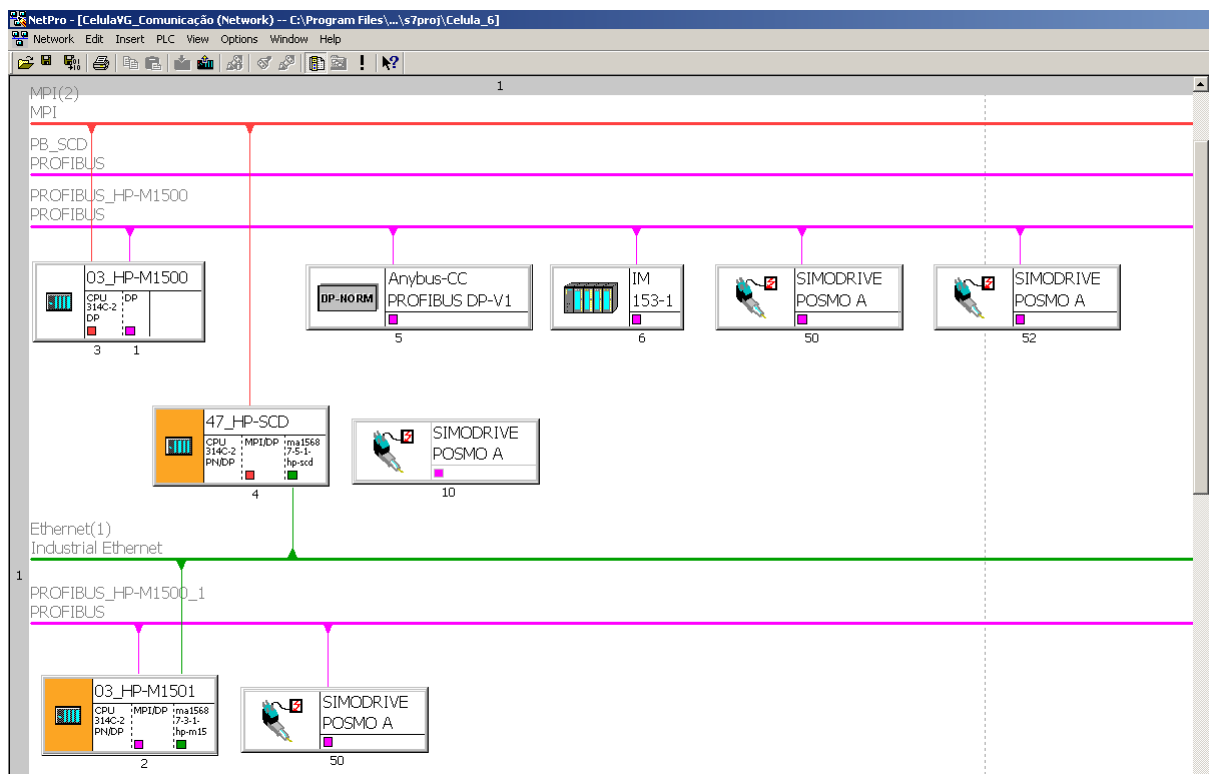


Figura 23 – Configuração geral de comunicação

GD - MPI(2)				
GD Table Edit Insert PLC View Window Help				
MPI(2) (Global data) -- CelulaVG_Comunicação				
	GD ID	03_HP-M1500\ CPU 314C-2 DP	47_HP-SCD\ CPU 314C-2 PN/DP_HP-SCD	
1	GD 1.1.1	>MB250	MB250	
2	GD 1.2.1	MB251	>MB251	
3	GD			
4	GD			
5	GD			
6	GD			
7	GD			
8	GD			
9	GD			

Figura 24 – Configuração da comunicação entre o Pulverizador 1 e o CLP Intermediário

byte de entrada e 1 byte de saída), como mostrado na Figura 25.

A configuração geral contendo os endereços de comunicação entre todos os controladores pode ser vista na Tabela 5.

3.2.8 Terceira Etapa

A terceira etapa de integração dos equipamentos consistiu em identificar e transmitir os sinais necessários para a operação em conjunto, tais como comandos e estados dos equipamentos. A confiabilidade dos dados compartilhados também foi assegurada, com

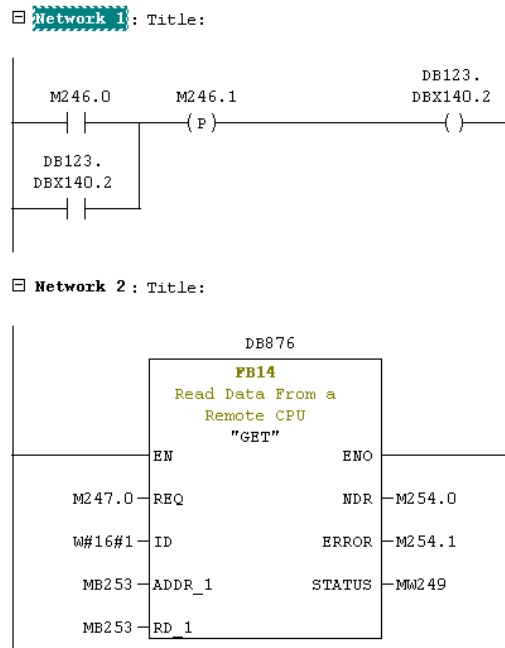


Figura 25 – Configuração da comunicação entre o Pulverizador 2 e o CLP Intermediário

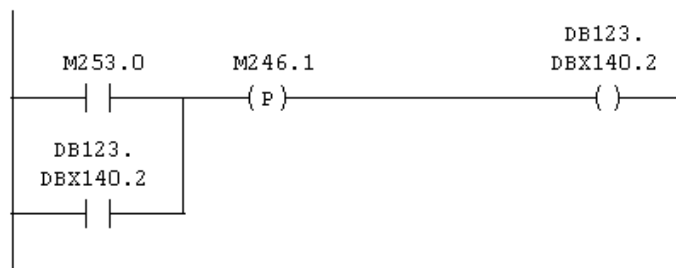
Tabela geral de Comunicação						
ABB IRC5 - Pulv. 1		Pulv. 1 - CLP Interm.		CLP Interm. - Pulv. 2		
	IRC5	Pulv. 1	Pulv. 1	CLP Interm.	CLP Interm.	Pulv. 2
Leitura	DI0 .. DI64	I10 .. 17	MB251	MB250	MB252	MB253
Escrita	DO1 .. DO64	Q10 .. 17	MB250	MB251	MB253	MB252

Tabela 5 – Tabela geral de comunicação

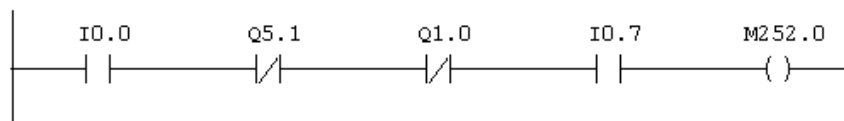
tratamento de defeitos em caso de falha de comunicação entre os CLPs. A Figura 26 mostra alguns dos sinais que foram compartilhados entre o Pulverizador 2 e o Robô.

Em relação à confiabilidade dos dados, foi implementada uma lógica de *watchdog* em todos os controladores. Esta lógica realiza a leitura de um bit, disponível no parceiro de comunicação, que altera o seu estado lógico na frequência de 1 Hz. A variação do bit é monitorada constantemente, e caso a leitura pare de variar num tempo maior ou igual a 5 segundos, entende-se que está ocorrendo uma falha de comunicação e a área de memória compartilhada é zerada. Para exemplificar, a Figura 27 mostra a lógica de *watchdog* implementada em um dos controladores.

☐ **Network 1**: Title:



☐ **Network 2**: Title:



☐ **Network 3**: Title:



☐ **Network 4**: Title:

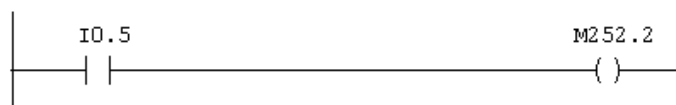
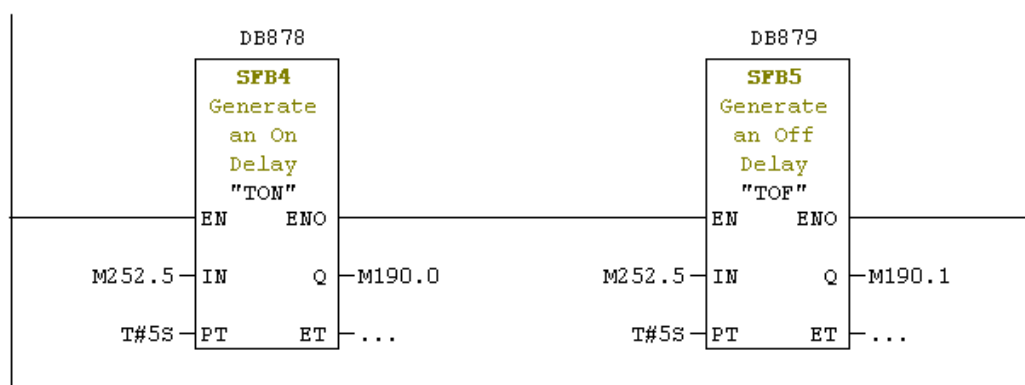


Figura 26 – Sinais compartilhados entre o Pulverizador 2 e o Braço Robótico

☐ **Network 9** : Watchdog - Zera MB251 no caso de falha de comunicação (Pulv 2)



☐ **Network 10** : Title:

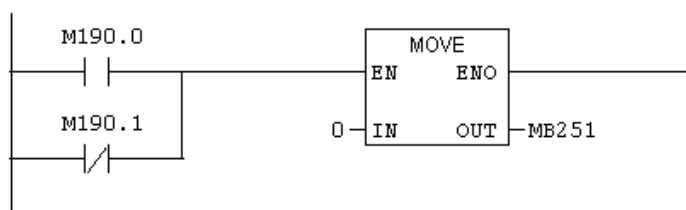


Figura 27 – Lógica de *Watchdog*

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Além das modificações técnicas realizadas em parceria com o laboratório de análises físicas de Vargem Grande, os treinamentos ministrados permitiram que a programação e integração dos equipamentos fossem realizadas sem a contratação de empresas integradoras. Dessa forma, todas as tarefas foram realizadas com recursos próprios, gerando economia para a empresa e *know-how* para melhorias e futuras expansões.

A integração do segundo pulverizador possibilitou a operação automática, em paralelo, de bateladas completas de pulverização, que iniciam através da inserção, por parte do laboratorista, do copo de aço inoxidável na janela de entrada da célula robótica, como mostrado na Figura 28.



Figura 28 – Inserção da amostra na entrada da célula.

A esteira de entrada de materiais possui um sensor indutivo nas duas extremidades. Assim que o copo é identificado, a esteira parte automaticamente e transporta o copo com a amostra até a outra extremidade, onde o mesmo será coletado pelo robô. A Figura 29 mostra o momento em que o braço robótico efetua a coleta do copo.

Após a coleta, é feita a análise de qual moinho pulverizador está pronto para receber a amostra. Então, o robô é leva o copo até o compartimento de entrada do equipamento disponível. Ao posicionar o copo no pulverizador (Figura 30), o robô retorna para sua posição de segurança e envia o comando para iniciar o processo de pulverização.

Com o processo de pulverização concluído, o equipamento envia um sinal para o robô,



Figura 29 – Coleta do copo na esteira.



Figura 30 – Posicionamento do copo no pulverizador.

que imediatamente realiza a coleta do copo e posiciona o mesmo na esteira de retorno (Figura 31). Nesta etapa, a amostra estará disponível para confecção da pastilha fundida, que será enviada para a análise química.

É importante observar que, paralelamente, até duas amostras podem ser processadas. Caso mais uma amostra seja inserida na esteira de distribuição, o copo permanecerá parado até que algum dos processos em andamento termine. A esteira irá levar o copo em

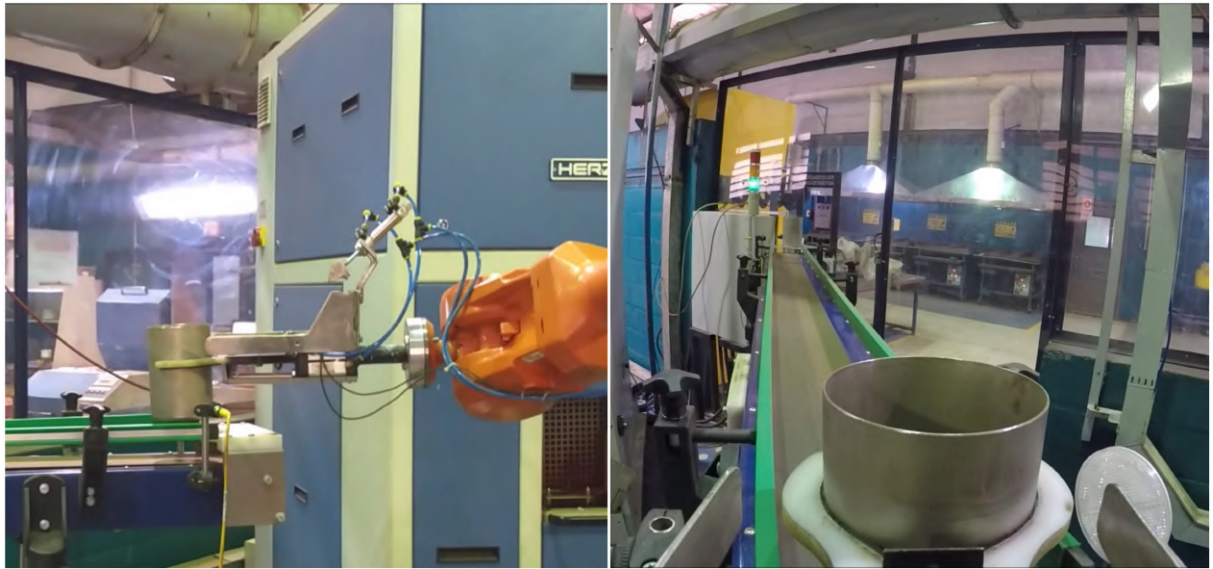


Figura 31 – Posicionamento do copo no pulverizador.

stand-by até o braço robótico automaticamente, quando identificar a ociosidade de algum dos pulverizadores.

5 CONCLUSÃO

A interação entre o Instituto Tecnológico Vale e as áreas operacionais da Vale S.A. forma uma parceria importante para a capacitação de profissionais envolvidos em atividades de inovação dentro da empresa, além de abrir caminhos para a realização de provas de conceito e aplicações em campo que possam auxiliar o desenvolvimento das pesquisas em curso no instituto. As atividades descritas neste relatório são frutos de um treinamento ministrado pelo ITV, que se estendeu para aplicações práticas de campo, resultando na economia para a Vale S.A. tanto em treinamentos quanto em contratação de serviços.

As alterações realizadas viabilizaram o sincronismo de tarefas e troca de informações entre os equipamentos. O controlador do braço robótico é agora capaz de acionar e receber sinais de cada pulverizador, individualmente. Como a batelada de pulverização dura, em média, 9 minutos, a integração de um segundo pulverizador possibilita a preparação de um número maior de amostras para a confecção de pastilhas fundidas. Além do ganho de performance, devem ser levados em consideração os ganhos gerados pela padronização do processo e redução da contaminação das amostras, visto que estas são processadas em equipamentos totalmente fechados e com controle de poeira, reduzindo a contaminação cruzada. Outro fator positivo é a diminuição do trabalho manual no processo de amostragem, que exige a manipulação frequente de objetos, se caracterizando por uma atividade repetitiva e ergonomicamente desfavorável.

Dadas as características do processo, a adoção de um robô é perfeitamente justificável, visto que existe a necessidade real de distribuição de amostras entre diversos equipamentos, além de tornar flexível a alteração de layout do laboratório em caso de necessidade de expansão, como a inclusão de novos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- ABB CORPORATION. **RAPID Instructions, Functions and Data types**. [S.l.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 22.
- BARTOLOMEU, P.; LOPES, L. S.; LAU, N.; PINHO, A.; ALMEIDA, L. Integração de informação na equipa de futebol robótico cambada. **Electrónica e Telecomunicações**, v. 4, n. 4, p. 467–477, 2005. Citado na página 9.
- FELD, J. Profinet-scalable factory communication for all applications. In: IEEE. **Factory Communication Systems, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Workshop on**. [S.l.], 2004. p. 33–38. Citado na página 30.
- FRANCHI, C. M.; CAMARGO, V. L. A. **Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos**. [S.l.: s.n.], 2008. Citado 4 vezes nas páginas 3, 26, 27 e 28.
- HERZOG. **HP-C/ HP-CS/ HP-CA: AUTOMATIC JAW CRUSHER**. [S.l.], 2017. Citado na página 11.
- HERZOG. **HP-M 1500 AUTOMATIC PULVERIZING MILL**. [S.l.], 2017. Citado na página 11.
- HERZOG. **HP-SCD: SCOOP DOSING DEVICE**. [S.l.], 2017. Citado na página 12.
- JASPERNEITE, J.; FELD, J. Profinet: an integration platform for heterogeneous industrial communication systems. In: IEEE. **Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. 10th IEEE Conference on**. [S.l.], 2005. v. 1, p. 8–pp. Citado na página 30.
- KLEINES, H.; ZWOLL, K.; DROCHNER, M.; SARKADI, J. Integration of industrial automation equipment in experiment control systems via profibus-developments and experiences at forschungszentrum julich. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, IEEE, v. 47, n. 2, p. 229–235, 2000. Citado na página 28.
- ROBOTICS, A. **Product Specification IRB 4600**. 2017. Citado 3 vezes nas páginas 3, 13 e 14.
- SIMATIC, S. **Communication with SIMATIC**. 2017. Citado 4 vezes nas páginas 3, 5, 29 e 30.
- XU, J.; FANG, Y.-J. Profibus automation technology and its application in dp slave development. In: IEEE. **Information Acquisition, 2004. Proceedings. International Conference on**. [S.l.], 2004. p. 155–159. Citado 3 vezes nas páginas 3, 28 e 29.

3. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO DE CÉLULAS ROBÓTICAS INDUSTRIAIS COM FOCO NA INDÚSTRIA 4.0

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA INTEGRAÇÃO DE CÉLULAS ROBÓTICAS INDUSTRIAIS COM FOCO NA INDÚSTRIA 4.0

MARCOS PAULO TORRE^{*†}, GABRIEL CARVALHO GARCIA^{*†}, SANDER SOARES QUEIROZ[‡], MYRIAM SOUZA DE OLIVEIRA DIAS[‡], MARCONE JAMILSON FREITAS SOUZA[§], GUSTAVO MEDEIROS FREITAS^{*}

^{*}*Instituto Tecnológico Vale - Ouro Preto, MG, Brasil*

[†]*Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto - Ouro Preto, MG, Brasil*

[‡]*Vale S.A. - Engenharia Mineral e Laboratórios - Corredor Sudeste - Nova Lima, MG, Brasil*

[§]*Departamento de Computação - Universidade Federal de Ouro Preto - Ouro Preto, MG, Brasil*

Emails: marcos.torre@itv.org, gabrcg@gmail.com, sander.queiroz@vale.com, myriam.souza.dias@vale.com, marccone@iceb.ufop.br, gustavo.medeiros.freitas@itv.org

Abstract— This work aims to develop a system for industrial robotic cells integration, focusing on Industry 4.0, using softPLC and 3D perception approaches. Most industrial robots use proprietary software and closed architecture drivers, and as a result, the integration with devices from different manufacturers becomes inflexible. Thus, we propose the development of an open-source tool to simplify the system development and integration using the framework Robot Operating System (ROS). The work's development aims the application in a robotic cell for iron ore samples manipulation. As tests in industrial environments demand the stop of machines directly involved in the production process, laboratory tests were done using equipment with the same characteristics as those used in the real process, such as an ABB IRB 120 robotic arm, in conjunction with a Festo didactic plant, capable of distributing, separating and sorting parts. Using a depth camera, we have programmed the robotic manipulator to perform pick and place tasks, identifying the parts position and inserting them into the circuit. Subsequently, the parts follow simulated processing routes according to the cell processes.

Keywords— System Integration, Industry 4.0, 3D Perception, softPLC, Industrial manipulators.

Resumo— O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema, com foco na Indústria 4.0, para integração de células robóticas industriais, utilizando abordagens de *softPLC* e percepção 3D. A maioria dos robôs industriais utilizam *softwares* proprietários e controladores de arquitetura fechada, tornando inflexível a integração com dispositivos de fabricantes diferentes. Dessa forma, é proposto o desenvolvimento de uma ferramenta de código aberto com o objetivo de simplificar a integração, expansão e inclusão de algoritmos de alto nível nos sistemas, utilizando o *framework Robot Operating System* (ROS). O trabalho foi realizado visando a aplicação em uma célula robótica para manipulação de amostras de minério de ferro. Como a realização de testes em ambientes industriais demanda a parada de equipamentos diretamente envolvidos na produção, os testes foram realizados em equipamentos com as mesmas características dos utilizados nos processos reais, como um braço robótico ABB IRB 120 e uma planta didática Festo para separação, distribuição e classificação de peças. Com o auxílio de uma câmera de profundidade, o braço robótico foi programado para realização de tarefas de *pick and place*, identificando a posição das peças e inserindo-as no circuito. Posteriormente, as peças seguem por rotas de processamento simuladas de acordo com os processos da célula.

Palavras-chave— Integração de Sistemas, Indústria 4.0, Percepção 3D, softPLC, Manipuladores industriais.

1 Introdução

A capacidade de efetuar tarefas complexas e repetitivas com alto grau de precisão, velocidade e repetibilidade, tornaram os braços robóticos industriais um importante aliado no caminho para a competitividade nos setores industriais. Além do mais, estes podem ser aplicados em ambientes insalubres e de risco sem perda de desempenho, sendo uma importante ferramenta para evitar danos à vida dos colaboradores.

Mesmo com as inúmeras vantagens de sua utilização, os braços robóticos industriais são geralmente programados para efetuar tarefas pré-programadas, sem interação com o ambiente (Moriano Martín, 2013). Esses dispositivos utilizam softwares proprietários e controladores de arquitetura fechada, dificultando a integração com dispositivos de fabricantes diferentes.

De modo geral, células robóticas não são compostas unicamente por robôs, sendo que as etapas

do processo são executadas por equipamentos diferentes, podendo existir controladores que se comunicam em protocolos distintos, resultando em ilhas de automação que necessitam de integração.

Segundo Bartolomeu et al. (2005), um dos grandes desafios da robótica é justamente como integrar as informações vindas de todos os algoritmos e sensores presentes em um processo, de modo a gerar comandos e controlar os diferentes dispositivos de atuação do robô, garantindo que a tarefa seja executada de modo correto, sem colocar em risco o robô e aqueles que o cercam.

Os fatos previamente descritos foram vivenciados em uma célula robótica de um laboratório físico da empresa Vale S.A.. Os equipamentos que compõem a célula foram adquiridos de forma gradual, e as mudanças no cenário da indústria da mineração impossibilitaram a contratação de serviços para integração das máquinas. Cada uma dessas possui seu PLC, do inglês *Programmable Logic Controller*, sem comunicação com os demais.

Para possibilitar troca de dados e sincronismo de tarefas, é necessário implementar a comunicação entre os controladores de cada dispositivo.

Para a aplicação de ferramentas alinhadas com as premissas da Indústria 4.0, é importante que o sistema esteja preparado para tal desde sua concepção, o que não é alcançado facilmente por meio de técnicas de integração convencionais, considerando a variedade de padrões existentes e inflexibilidade de sistemas proprietários.

Este trabalho mostra uma abordagem com foco na Indústria 4.0 para integração dos equipamentos da célula robótica estudada, no qual é proposto um sistema flexível, de código aberto e capaz de se comunicar com alguns dos principais controladores, robôs e redes de campo utilizados na indústria, tais como CanOpen, Ethernet/IP, Profinet e Modbus TCP. A plataforma tem o objetivo de padronizar e facilitar o cruzamento de informações provenientes de sensores, algoritmos e tarefas, para tomada de decisões de uma maneira mais eficaz.

O desenvolvimento da plataforma foi baseado no *framework Robot Operating System (ROS)* e sua extensão ROS-Industrial, que são ferramentas de código aberto criadas para incentivar a implementação colaborativa de *softwares* para sistemas robóticos.

O sistema também será capaz de interagir com o espaço de trabalho por meio de percepção 3D, de forma que o ambiente ao redor possa ser compreendido e as trajetórias do braço robóticos sejam efetuadas baseadas nessa percepção, sendo uma alternativa às rotas pré-programadas e fixas.

Devido as dificuldades de realização de testes em ambientes industriais, que demandam parada de equipamentos envolvidos diretamente na produção, testes de conceito foram efetuados em laboratório, por meio de equipamentos industriais representativos, com o objetivo de validar seu uso nas próximas etapas de integração da célula. Ainda, segundo Zuehlke (2010), propostas que visam substituir tecnologias bem estabelecidas devem ser inicialmente testadas fora do ambiente industrial, e aplicadas somente quando forem garantidas sua robustez, segurança e integridade.

Dessa forma, o presente trabalho visa fornecer uma opção de futuro para integração de células robóticas industriais, onde diversos algoritmos de alto nível para interação com o sistema possam ser aplicados de uma maneira mais simples e direta, como os de otimização, tratamento de imagens e visão computacional.

2 Automação do Laboratório Físico

A célula robótica do laboratório físico da Vale tem a função de realizar transformações físicas nas amostras de minério de ferro para preparação de pastilhas fundidas, que posteriormente serão analisadas quimicamente e fornecerão infor-

mações importantes para o controle de qualidade do produto, como teor de ferro, contaminantes, entre outros.

O projeto do laboratório automatizado tem o objetivo de integrar esteiras de distribuição e de saída, uma estufa, um britador Herzog HP-CS/A, dois moinhos pulverizadores Herzog HP-M1500, uma unidade dosadora Herzog HP-SCD e um manipulador industrial ABB IRB 4600. Um esquema desse projeto está ilustrado na Figura 1. As principais metas são a redução do erro de amostragem, redução de trabalho manual e aumento de performance.

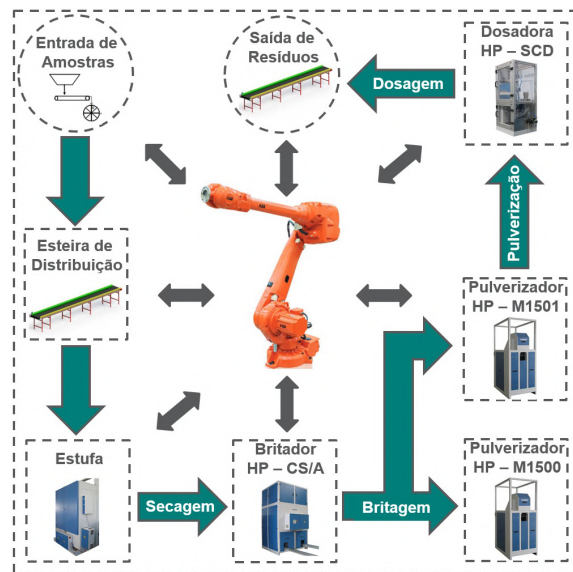


Figura 1: Layout do laboratório físico

O processo começa com o operador despejando a amostra em um copo metálico e posicionando-o na esteira de distribuição. Posteriormente, o manipulador industrial tem a função de realizar tarefas de *pick and place*, inserindo e retirando as amostras dos equipamentos, respeitando o fluxo mostrado na Figura 1.

Geralmente, um PLC geral não vinculado a nenhuma máquina da célula é inserido como elemento de interface e centralizador de dados. Esta abordagem demanda a inclusão de equipamentos que normalmente possuem um alto custo associado, muitas vezes desempenhando apenas a função de comunicação, visto que cada equipamento já possui um programa interno e apenas o interfaceamento de comandos é necessário.

Em outros casos, alguns controladores que já fazem parte do processo e que possuam as interfaces desejadas são utilizados para desempenhar essa função, reservando parte de seu processamento para executar a tarefa de comunicação. Essa arquitetura torna confusos os mapas de comunicação da rede, acarretando na dificuldade de expansão e manutenção do sistema, além da possibilidade de sobrecarga do controlador, dependendo do processo em execução.

A implementação de algoritmos de alto nível, como para tratamento de imagens e percepção 3D, demandam um processamento computacional não disponível em PLCs industriais convencionais. Logo, esses algoritmos são normalmente executados em computadores ou servidores, sendo posteriormente interfaceados com os devidos controladores industriais. Com base nessas informações, este trabalho propõe que o mesmo ambiente computacional efetue a função de PLC central e execute os algoritmos de alto nível responsáveis por tarefas mais complexas.

3 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica foi baseada em aplicações alternativas de integração de equipamentos voltadas para a indústria. O conceito da plataforma proposta se aproxima bastante da abordagem de *softPLC*, que se baseia no controle de equipamentos por meio de computadores pessoais, envolvendo ganhos de flexibilidade, baixo custo e maior capacidade de processamento. Como sistemas industriais exigem robustez, mesclas entre sistemas baseados em *softPLC* e controladores tradicionais também devem ser consideradas.

Visando demonstrar a flexibilidade da aplicação proposta e capacidade de interação com o mundo ao redor da célula robótica, foram revisadas algumas técnicas para tratamento de mapas de profundidade, que posteriormente serão aplicadas para identificação da posição de objetos.

3.1 Técnicas de Integração

Como execução prática em equipamentos industriais, Martinov et al. (2016) propõem a implementação de um sistema de controle automático com *hardware* independente para tornos e fresadoras CNC. A solução contempla o desenvolvimento de lógicas de controle em controladores lógicos programáveis baseados em *software* (*softPLC*), permitindo a unificação dos algoritmos para comando de equipamentos auxiliares envolvidos no interfaceamento de máquinas. Essa abordagem permite a divisão dos níveis de implementação do programa de controle e também do *hardware* do PLC.

Por meio da configuração direta no ambiente de programação, a solução apresenta flexibilidade de adaptação entre diferentes grupos de módulos de I/O e dispositivos auxiliares. O artigo também propõe um modelo de configuração de uma área de memória compartilhada para acesso dos dados provenientes dos módulos de *hardware* disponíveis. Essa área de memória é composta por uma matriz, onde os dados físicos são lidos, sendo esta matriz preenchida de acordo com o *ID* e *Vendor ID* de cada elemento. Assim, os dados lógicos podem ser acessados de uma maneira estruturada.

Visando apresentar as vantagens e desvantagens da implementação de um sistema de controle

unificado, outro artigo de Martinov et al. (2017) enfoca o controle de máquinas periféricas utilizando a mesma abordagem de *softPLC*. A implementação do sistema centralizado em uma única CPU apresenta algumas desvantagens. No caso da ocorrência de um erro crítico de *hardware*, todas as tarefas serão interrompidas, o que acarretará em consequências imprevisíveis. Dessa forma, a abordagem contempla, além de uma placa contendo o controlador baseado em *software*, outro controlador que garanta as funções de segurança em caso de falha do sistema central.

A adoção de controladores auxiliares responsáveis pelas tarefas principais das máquinas garante a distribuição da carga computacional das tarefas de controle em múltiplos processadores e o aumento da confiabilidade do sistema, visto que o gerenciamento, controle das atividades, funções de monitoramento e diagnósticos dos módulos de *hardware* estarão distribuídos.

No estudo realizado por Nocoń and Choiński (2006) os autores propõem um sistema de controle tolerante a falhas, que visa aumentar a flexibilidade de programação para realização dos procedimentos experimentais de uma planta piloto para tratamento de água. Todos os sensores e atuadores do sistema são conectados em PLCs industriais em sua forma padrão, porém, o programa principal é executado em um computador.

Como um computador pessoal não possui a robustez de um controlador industrial, o PLC também é programado para verificar o status da comunicação com o computador e, em caso de falhas, o PLC assume o controle da planta. Dessa maneira, os controladores industriais foram utilizados como dispositivos de entrada e saída pelo computador, além de possuir um programa *hot-standby* que monitora a execução do processo.

3.2 Percepção 3D

A percepção 3D é uma importante ferramenta para que sistemas robóticos, que trabalham em ambientes não estruturados ou que possam sofrer alterações de *layout*, possam interagir com o mundo a sua volta (Rusu and Cousins, 2011). Sensores com essa capacidade de percepção são aptos a representar ambientes em nuvem de pontos. Em cada ponto da nuvem gerada estão associados sua posição no espaço tridimensional e também sua cor em RGB. Essas características possibilitam a extração de informações importantes do ambiente, como a posição e orientação de objetos, utilizando técnicas conhecidas por pré-processamento e segmentação.

3.2.1 Pré-processamento

Consiste na preparação da nuvem de pontos para as etapas de segmentação. As etapas principais do pré-processamento são divididas em:

- *Voxel Grid Downsampling*: A aplicação deste filtro cria uma malha de pequenas caixas 3D ao longo da estrutura da nuvem de pontos. Posteriormente, todos os pontos situados dentro da caixa são reduzidos ao seu centroide (WIL, 2018), reduzindo a densidade do mapa de profundidade.

- *Filtro PassThrough*: O Filtro *PassThrough* limita as dimensões da nuvem de pontos de entrada. Em outras palavras, é possível eliminar os pontos que se encontram fora de um determinado intervalo do eixo tridimensional.

3.2.2 Segmentação

Com a região limitada, são aplicadas técnicas de identificação de formas conhecidas. Com os objetos extraídos, aplicam-se técnicas de clusterização para que as peças sejam isoladas e tratadas individualmente.

- *RANSAC*: Segundo Derpanis (2010), o *RANdom SAMple Consensus*, é um algoritmo para levantamento de modelos matemáticos robustos a partir de dados que apresentem *outliers*. Dessa forma, a técnica pode ser aplicada para identificação de geometrias conhecidas, como planos, cilindros e esferas, presentes na nuvem de pontos. Logo, é fornecido o modelo matemático da forma desejada e dois subconjuntos são gerados, o que contém (*inliers*) e o que não contém (*outliers*) a geometria desejada. De acordo com a aplicação, o mapa de profundidade pode ser manipulado a fim de manter apenas os *inliers* ou somente os *outliers*. Ainda é possível manter um intervalo contaminado com *outliers*, que pode ser manipulado de maneira que represente o modelo da melhor maneira.

- *DBSCAN*: Segundo Zhou et al. (2000), o *Density-Based Clustering Methods* é um algoritmo capaz de encontrar regiões mais densas (*clusters*) nos dados de entrada, que podem ser medidas pelo número de objetos próximos a um determinado ponto. Assim, o DBSCAN é capaz de identificar *clusters* de formas variadas e obter bom desempenho lidando com dados ruidosos. Como é um método baseado em densidade local, alguns parâmetros devem ser definidos, como o número mínimo de pontos que constituem um cluster (MinPts) e um raio ϵ . Um ponto que possuir o número mínimo de pontos ao seu redor dentro da faixa compreendida pelo raio ϵ é considerado um ponto central, e esse conjunto de pontos, um *cluster*.

Com os pontos agrupados em *clusters*, é esperado que esses representem a forma dos objetos procurados. Os parâmetros que fornecem a posição desses objetos no espaço são as coordenadas de seus respectivos centróides. O valor é dado por $\{\bar{c} \in \mathbb{R}^3 | x = \bar{x}, y = \bar{y}, z = \bar{z}\}$, onde $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ são, respectivamente, as médias das coordenadas x, y e z dos pontos que constituem o *cluster*.

As técnicas previamente abordadas podem ser aplicadas com o auxílio da biblioteca *Point Cloud*

Library, que possui algoritmos estado-da-arte para tratamento de dados 3D. De acordo com Aldoma et al. (2012), a biblioteca é totalmente de código aberto e está se tornando uma referência em processamento tridimensional. Outro fato que a torna interessante para o trabalho proposto é o fato dela ser completamente compatível com o ROS.

4 Metodologia

A metodologia de desenvolvimento do trabalho visa padronizar a integração da célula robótica descrita na Seção 2 por meio do desenvolvimento de uma plataforma baseada no *framework* ROS.

O processo da célula e os equipamentos responsáveis pelo controle de suas etapas foram tomados como referência para seleção dos equipamentos. Para a realização de um teste de conceito, foram escolhidos equipamentos industriais de menor escala e também equipamentos didáticos, que são comandados pelo mesmo modelo dos controladores presentes na área operacional em questão, sendo que estes serão apresentados nas próximas subseções.

4.1 Manipulador Industrial e efetuador

O manipulador industrial utilizado neste trabalho, fabricado pela ABB Corporation, conta com um braço manipulador IRB 120 e um controlador IRC5 Compact (Figura 2(a)). Em uma versão compacta, esse apresenta todas as características do controlador IRC5, que é utilizado em robôs de maior escala, fornecendo controle de movimento e alta precisão para aplicações industriais (Robotics, 2017).

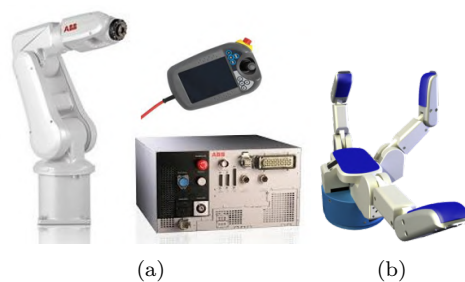


Figura 2: Sistema robótico e efetuador utilizados.

O efetuador BarrettHand BH8-282 (Figura 2(b)) é uma mão robótica programável que possui três dedos, com a destreza de segurar objetos de diferentes tamanhos (Barrett, 2013). A mão robótica conta com sensores tácteis na palma da mão e na ponta dos dedos. Esse efetuador pode se comunicar em padrão serial RS-232 e também via barramento CAN de alta velocidade.

4.2 Planta didática modular Festo MPS

As plantas didáticas Festo, da linha MPS, possuem arquitetura modular. Três plantas distintas serão utilizadas neste trabalho, que são as de distribuição, separação e classificação.

Cada planta é comandada por um controlador lógico programável Siemens S7-314C 2PN/DP, que é geralmente aplicado para comandar e controlar máquinas e processos industriais de médio porte. Esses controladores possuem interfaces de rede industrial MPI, Profibus DP e Profinet.

4.3 Robot Operating System

O ROS é uma ferramenta de código aberto criada para incentivar a implementação colaborativa de softwares para sistemas robóticos (Quigley et al., 2009).

Uma característica importante do ROS é a maneira com que os programas se comunicam entre si. Cada programa é chamado de nó e a troca de informações entre eles é feita por meio de tópicos e serviços, que transmitem um determinado tipo de mensagem. Outra característica relevante no ROS é a sua universalidade. É possível controlar robôs de diferentes fabricantes por meio dos vários *drivers* disponíveis.

4.3.1 ROS industrial, MoveIt! e OMPL

A aplicação da ferramenta nas áreas operacionais da Vale demanda o uso do ROS Industrial, que é um projeto de código aberto que estende as avançadas capacidades do ROS para aplicações industriais (Michieletto et al., 2014). O ROS Industrial torna possível a comunicação entre o ROS e alguns braços robóticos industriais fabricados pela ABB, Motoman, Fanuc e Universal Robots. Alguns pacotes vêm sendo desenvolvidos para comunicação com outros fabricantes (Morianio Martín, 2013).

A interação com o usuário acontece por meio do MoveIt!, que segundo Chitta et al. (2012), fornece uma plataforma de fácil utilização para desenvolvimento de aplicações robóticas avançadas, avaliação de projetos de novos robôs e construção de sistemas robóticos integrados para as áreas industriais, comerciais, pesquisa e desenvolvimento. O MoveIt! trabalha em conjunto com algoritmos estado da arte para manipulação móvel, como os fornecidos pela biblioteca OMPL, incorporando os últimos avanços em planejamento de trajetórias, manipulação, percepção 3D, cinemática, controle e navegação.

4.3.2 Sistema de integração proposto

Para flexibilizar o controle e planejamento de trajetória do braço robótico ABB IRB 120, esses são implementados no ambiente do ROS Industrial por meio da ferramenta MoveIt!, bem como a integração da mão robótica multi-dedos BarrettHand BH8-282, para auxílio na manipulação de objetos.

Os PLCs industriais que controlam a planta didática também são integrados, simulando as diferentes rotas adotadas nos processos de manipu-

lação de amostras nos laboratórios físicos e também a troca de informações entre os mesmos.

Cada controlador têm dois tópicos do ROS associados a seus pontos de entrada e saída, que podem ser lidos e escritos pelos nós, se caracterizando por áreas de memória compartilhadas semelhantes ao sistema proposto por Martinov et al. (2016).

A programação original da planta didática é mantida, sendo o ROS responsável apenas por interfaceamento de comandos para sincronismo de tarefas. Entretanto, metodologias semelhantes as propostas por Martinov et al. (2017) e Nocoñ and Choiński (2006) poderiam ser facilmente aplicadas, visto que todos os recursos para tal estão disponíveis no ROS.

O sistema de percepção funciona com base na nuvem de pontos geradas por um sensor Kinect, cujos dados serão tratados para identificação da posição e orientação das peças da planta didática Festo. Com o sistema em funcionamento, o objetivo é o desenvolvimento de uma tarefa de *pick and place*, onde o braço manipulador, com o auxílio da mão robótica, pegue uma peça por vez e alimente a planta didática. A arquitetura final do sistema está representada na Figura 3.

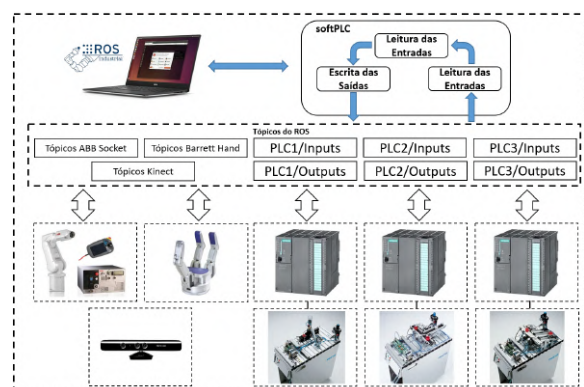


Figura 3: Arquitetura do sistema utilizando o ROS como sistema central.

5 Integração e Resultados

A seção Resultados será dividida em três subseções, onde cada uma descreverá os resultados de cada etapa proposta na metodologia, sendo esses a integração do robô e efetuator, os resultados do tratamento da nuvem de pontos para identificação da posição das peças que alimentam a planta didática, e os resultados de integração entre o ROS e os controladores industriais.

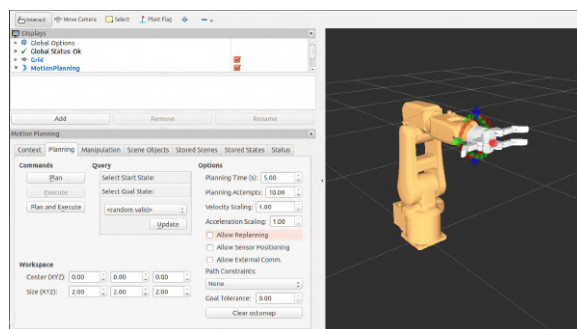
5.1 Integração entre o ROS, o Robô ABB IRB 120 e a mão robótica BarrettHand BH8-282

Esta integração utilizou o ROS como um sistema central onde um computador é responsável por processar todas as informações. A ferramenta MoveIt! disponibiliza uma interface gráfica onde diferentes trajetórias podem ser calculadas e exe-

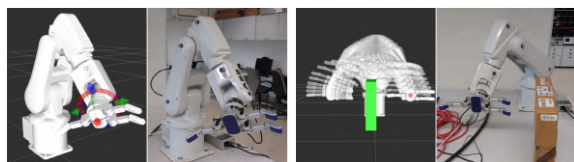
cutadas interativamente. O vetor de pontos que representa a trajetória é enviado por meio de um *socket* ao controlador IRC5 Compact, que colocará o robô em movimento seguindo a trajetória calculada. A estrutura da mensagem que trafega pelo *socket* consiste no cabeçalho da mensagem, valores e velocidades das juntas e a duração da trajetória, transmitidas em quatro *bytes* cada.

No mesmo ambiente, as juntas da mão robótica podem ser controladas diretamente. É possível, ainda, receber e tratar os valores dos sensores tácteis e de força-torque existentes no *hardware* do equipamento.

O sistema foi testado em laboratório quanto à fidelidade de execução dos movimentos, pelo sistema real, das trajetórias geradas pelo *software* MoveIt!, por meio do posicionamento interativo pela interface gráfica (Figura 4(a)) e comando para planejamento da trajetória da posição corrente até a posição objetivo (Figura 4(b)). A ferramenta de desvio de obstáculos também foi testada, incorporando um objeto no espaço entre a posição atual e objetivo. A trajetória gerada desvia do obstáculo em questão, como mostrado na Figura 4(c).



(a) Interface Gráfica do MoveIt!.



(b) Posição real e virtual (c) Desvio de obstáculo.

Figura 4: Figuras comparativas entre robô real e virtual.

5.2 Percepção 3D

As peças que alimentam a planta festo podem ser comparadas aos copos que transportam as amostras, pois possuem geometria similar e apresentam, devido suas pequenas dimensões, um desafio maior para identificação da posição usando técnicas de percepção 3D. Estão ilustradas na Figura 5 todas as etapas do tratamento da nuvem de pontos obtida por meio do sensor Kinect, cujo o objetivo foi obter a posição de todas as peças cilíndricas para a alimentação da planta. A biblioteca *Point Cloud Library* foi utilizada para esse fim, sendo

necessária a definição dos parâmetros para execução dos algoritmos. Todos os parâmetros dos filtros foram obtidos empiricamente, por meio da execução passo a passo de cada algoritmo, e os valores obtidos estão representados na Tabela 1. O pseudocódigo representando os passos para o tratamento da nuvem de pontos está descrito no Algoritmo 1.

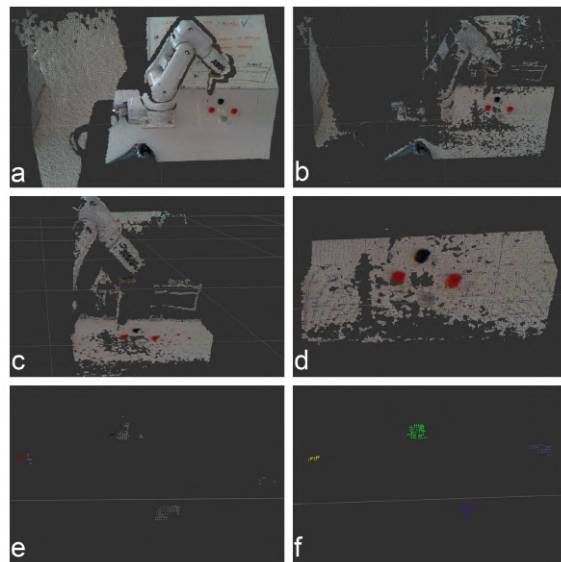


Figura 5: Etapas do tratamento da nuvem de pontos.

A Figura 5(a) mostra a nuvem de pontos bruta fornecida pelo Kinect. Na sequência, foi aplicado o filtro *Voxel Grid Downsampling* (Figura 5(b)). As Figuras 5(c) e 5(d) mostram a limitação tridimensional do mapa de profundidade por meio da aplicação de filtros *PassThrough*. Após a limitação física do mapa de profundidade, foi necessário eliminar os pontos que representam a mesa onde as peças estão apoiadas.

Dessa forma, o algoritmo RANSAC foi aplicado com a função de identificação de planos. Estão ilustradas, na Figura 5(e), as peças de interesse já isoladas do mapa de profundidade original. As peças já clusterizadas podem ser vistas na Figura 5(f), onde o algoritmo DBSCAN foi aplicado para identificar regiões mais densas do mapa e atribuir uma cor randômica ao conjunto de pontos que, naturalmente, representam os objetos procurados.

Com os objetos clusterizados, o próximo passo é identificar a posição e orientação dos mesmos. A orientação é fixa para o caso estudado, pois os objetos são cilíndricos e sempre estarão dispostos sobre a mesa. Logo, foi definido que o vetor orientação é normal ao plano onde os objetos estão posicionados. A posição no espaço tridimensional é calculada com base nas médias individuais das coordenadas x , y e z dos pontos que constituem cada *cluster*.

Com a posição e orientação definidos, a fer-

Técnica	Parâmetro		Valor
Voxel Grid Downsampling	leaf_size		0.026
PassThrough Filter	Eixo X	axis_min	0.0
		axis_max	0.7
	Eixo Y	axis_min	0.0
		axis_max	0.4
	Eixo Z	axis_min	1.15
		axis_max	1.5
RANSAC Segmentation	model_type	pcl.SACMODEL_PLANE	
	method_type	pcl.SAC_RANSAC	
	max_distance	0.0143	
	tolerance	0.06	
DBSCAN	min_points	10	
	max_points	5000	

Tabela 1: Parâmetros para processamento 3D.

ramenta MoveIt! utiliza o algoritmo *Rapidly-Exploring Random Tree* para calcular a trajetória até o objeto, onde o braço robótico realiza três movimentos para realizar o *grasp*: uma primeira aproximação, para orientar a ferramenta de modo a chegar na peça sem alterar sua posição; uma segunda aproximação, a fim de deixar a peça ao alcance da mão robótica; finalmente, a mão robótica fecha seus dedos, prendendo a peça de interesse. A Figura 6 ilustra, com mais detalhes, os passos previamente mencionados.

Algoritmo 1: Pseudocódigo para obter a posição das peças.

```

1: procedure get_position(cloud)
2:   cloud ← cloud.make_voxel_grid_filter(
     leaf_size)
3:   cloud ← cloud.passthrough_filter(
     axis_min, axis_max)
4:   outliers ← cloud.ransac_seg(
     model_type, method_type, max_distance)
5:   wc ← XYZRGB_to_XYZ(cloud)
6:   clusters[] ← wc.euclidean_clustering(
     tolerance, MinPts, MaxPts)
7:   centroids[] ← np.mean(clusters, axis =
     0)[:3] return centroids
8: end procedure

```

5.3 Interfaceamento entre o ROS e PLCs Industriais

As atividades desta seção foram focadas na definição e desenvolvimento de um método para leitura e escrita de registros de memória dos controladores Siemens S7-314C - 2PN/DP, por meio do ROS. O controlador Siemens possui, como uma de suas funcionalidades, a comunicação em Modbus TCP pela sua interface Profinet.

Como este protocolo é utilizado em uma grande variedade de equipamentos de automação, o desenvolvimento permitirá estabelecer comunicação não apenas com o controlador utilizado neste teste, mas também com diversos dispositivos de outros fabricantes que utilizem o protocolo.

Para permitir que o ROS troque informações por meio do protocolo mencionado, foi utilizado

um *wrapper*¹ capaz de transmitir e receber dados por meio do protocolo Modbus TCP. Basicamente, esse pacote funciona como uma ponte entre os dispositivos cliente (ROS) e servidor (Siemens S7-300). O controlador siemens foi configurado² para funcionar como servidor Modbus TCP, se comunicando por meio de sua porta Profinet integrada. Ao utilizar o *wrapper*, é possível obter os dados de um dispositivo que comunica via Modbus TCP e tratá-los como uma mensagem padrão do ROS. Da mesma forma, é possível publicar uma mensagem padrão do ROS para escrever valores nos registros de memória destes dispositivos.

Para expandir as possibilidades de aplicação da plataforma, foram realizados testes de comunicação com controladores ControlLogix e Compactlogix, fabricados pela empresa Rockwell, por meio de uma biblioteca³ que fornece funções de leitura e escrita de dados destes equipamentos a partir do sistema operacional Linux e que possui total compatibilidade com o ROS. Apesar de tanto a planta didática quanto a planta real estudadas não possuírem estes equipamentos, outras células robóticas da Vale utilizam estes modelos de controladores e a comunicação com estes dispositivos é importante num horizonte de disponibilização da plataforma para uso geral. Por meio do protocolo EthernetIP, o ROS é capaz de escrever e ler áreas de memória destes controladores de forma direta.

No final dos experimentos, as tarefas de *pick and place* foram executadas com sucesso (Figura 8). Como o ponto de entrada das peças na planta didática é fixo, e todas as peças identificadas eram depositadas na mesma posição. A geometria da mão robótica favorece bastante para o sucesso do *grasp*, visto que pequenos desvios da posição são compensados pelo movimento dos dedos, que seguram a peça firmemente.

6 Conclusão

Este trabalho apresentou um desenvolvimento que visa auxiliar na resolução de problemas típicos, que podem estar presentes em diversas células com a ocorrência de equipamentos de características heterogêneas que constituam ilhas de automação, impossibilitando troca de informações e sincronismo de tarefas. Outro benefício do trabalho é a possibilidade de uma padronização para a integração de células robóticas industriais presentes na Vale. A plataforma também fornecerá uma maior flexibilidade para essas células, pois a aplicação de Percepção 3D é capaz de detectar alterações de layout e correções no posicionamento do braço robótico de acordo com variações no processo.

Os resultados preliminares mostraram que o

¹Link para o *wrapper*: <http://wiki.ros.org/modbus>

²Guia de configuração Modbus TCP de controladores Siemens S7-300: <https://goo.gl/MQbrzi>

³Link para biblioteca e documentação *libplctag*: <https://github.com/kyle-github/libplctag>

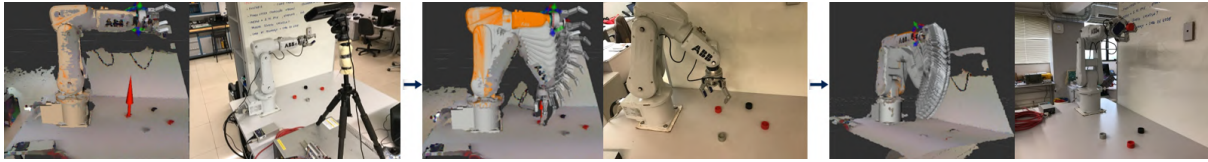


Figura 6: Etapas para *grasp* das peças de alimentação da planta didática.



Figura 7: Testes de comunicação entre o ROS e controladores industriais.

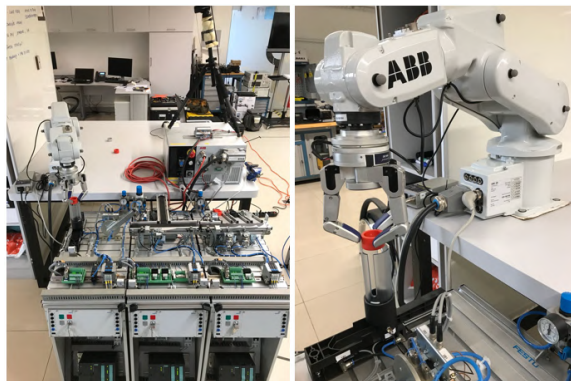


Figura 8: Tarefa de *pick and place*.

método proposto é viável, onde foi possível controlar equipamentos industriais por meio do *framework* ROS, a posição das peças da planta didática foram detectadas aplicando técnicas de percepção 3D, trajetórias foram geradas por intermédio da ferramenta MoveIt! e executadas com sucesso pelo manipulador IRB 120, bem como a sincronização das tarefas por meio da comunicação com os PLCs industriais. Esse resultado é um avanço importante, visto que todos os manipuladores industriais da ABB, independente da escala, são programados pela mesma linguagem e comandados por controladores de características semelhantes, mostrando que o desenvolvimento poderá ser facilmente replicado para células de proporções maiores.

O próximo passo dessa pesquisa consiste no estudo da robustez do sistema proposto, pois tecnologias voltadas para a indústria exigem o cumprimento de padrões e normas de segurança, bem como garantias de alta disponibilidade.

Referências

- Aldoma, A., Marton, Z.-C., Tombari, F., Wohlkinger, W., Potthast, C., Zeisl, B., Rusu, R. B., Giedli, S. and Vincze, M. (2012). Tutorial: Point cloud library: Three-dimensional object recognition and 6 dof pose estimation, *IEEE Robotics & Automation Magazine* **19**(3): 80–91.
- Barrett (2013). *Barrett Hand BH8-282*, Barrett Technology Inc.
- Bartolomeu, P., Lopes, L. S., Lau, N., Pinho, A. and Almeida, L. (2005). Integração de informação na equipa de futebol robótico cambada, *Electrónica e Telecomunicações* **4**(4): 467–477.
- Chitta, S., Sucan, I. and Cousins, S. (2012). MoveIt![ros topics], *IEEE Robotics & Automation Magazine* **19**(1): 18–19.
- Derpanis, K. G. (2010). Overview of the ransac algorithm, *Image Rochester NY* **4**(1): 2–3.
- Martinov, G., Kozak, N. and Nezhmetdinov, R. (2017). Implementation of control for peripheral machine equipment based on the external soft plc integrated with cnc, *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on*, IEEE, pp. 1–4.
- Martinov, G., Nezhmetdinov, R. and Kuliev, A. (2016). Approach to implementing hardware-independent automatic control systems of lathes and lathe-milling cnc machines, *Russian Aeronautics (Iz VUZ)* **59**(2): 293–296.
- Michieletto, S., Tosello, E., Romanelli, F., Ferrara, V. and Menegatti, E. (2014). Ros-i interface for comau robots, *International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, Springer, pp. 243–254.
- Moriano Martín, J. (2013). Trajectory planning for the irb120 robotic arm using ros.
- Nocoń, W. and Choiński, D. (2006). Fault-tolerant soft plc control using shadow processes, *IFAC Proceedings Volumes* **39**(21): 220–225.
- 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, Japan, p. 5.
- Robotics, A. (2017). *IRB 120 industrial robot*, ABB Corporation.
- Rusu, R. B. and Cousins, S. (2011). 3d is here: Point cloud library (pcl), *Robotics and automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 1–4.
- WIL (2018). *PCL documentation and tutorials*.
- Zhou, A., Zhou, S., Cao, J., Fan, Y. and Hu, Y. (2000). Approaches for scaling dbscan algorithm to large spatial databases, *Journal of computer science and technology* **15**(6): 509–526.
- Zuehlke, D. (2010). Smartfactory—towards a factory-of-things, *Annual Reviews in Control* **34**(1): 129–138.

4. DISPOSITIVO DE MONITORAMENTO REMOTO DE CAVIDADES - ESPELEOROBÔ

DISPOSITIVO DE MONITORAMENTO REMOTO DE CAVIDADES - ESPELEOROBÔ

EDUARDO COTA^{*†}, MARCOS P. TORRE^{*†}, FILIPE A. S. ROCHA^{*†}, GABRIEL GARCIA^{*†}, ÂNGELO JUNIOR[†], VICTÓRIA RAMOS[†], VINÍCIUS QUEIROZ[†], VINÍCIUS ZANINI[†], GUILHERME BRITO[†], ANDRÉ MARQUES[†], ÉRICA PINTO[†], LUIZ NOGUEIRA[†], GUSTAVO FREITAS^{*}, WILSON MIOLA^{*}, MARCO A. DOS REIS[‡], RAMON ARAÚJO[§], IURI BRANDI[§]

**Instituto Tecnológico Vale - Mineração
Ouro Preto, MG, Brasil*

*†Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Eng. Controle e Automação e Técnicas Fundamentais
Ouro Preto, MG, Brasil*

*‡Senai Cimatec
Salvador, BA, Brasil*

*§Vale S.A.
Gerência de Espeleologia - Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos
Belo Horizonte, MG, Brasil*

Emails: educota@gmail.com, marcos.torre@itv.org, f.rocha41@gmail.com, gabrcg@gmail.com, angelojunior17@gmail.com, vivirr_95@hotmail.com, vini.apq@gmail.com, vc2.1000@gmail.com, gbr4023@gmail.com, amrs1994@hotmail.com, erica.lins15@gmail.com, luizlecn@hotmail.com, gustavo.medeiros.freitas@itv.org, wilson.miola@itv.org, marcoreis@fieb.org.br, ramon.araujo@vale.com, iuri.brandi@vale.com

Abstract— The speleology is the science that studies natural caves. In the mining field, the speleological analysis is needed to comply legal requirements, which aim to reduce possible damage to the environment. The inspection and monitoring activities presents, nonetheless, risks to the speleologists, such as collapse, confinement and presence of venomous animals. Focusing on the reduction of the operators risks exposure, the Vale's speleological team proposed the EspeleoRobô, which consists in the development of a teleoperated robotic platform to execute the required activities inside caves. The implementations begin from an acquired commercial model, which corresponds to a six-legged robot inspired by the RHex device. The present work describes a series of modifications and improvements applied to suit the robot to operational areas, increasing its sensing capabilities and optimizing its functionalities.

Keywords— Robotic Platform, Mobile Robot, Robot Operating System (ROS), Cave inspection

Resumo— A espeleologia é a ciência que estuda cavidades naturais. No ramo da mineração, o estudo espeleológico se faz necessário para atender exigências da legislação, que visam minimizar os possíveis danos ao meio ambiente. As atividades de inspeção e monitoramento de cavidades apresentam, no entanto, riscos aos espeleólogos, tais como: desabamento, confinamento e presença de animais peçonhentos. Com o objetivo de reduzir a exposição dos operadores a estes riscos, a equipe de espeleologia da Vale propôs o EspeleoRobô, que consiste no desenvolvimento de uma plataforma robótica teleoperada para realizar as atividades necessárias dentro das cavernas. As implementações partem de um modelo comercial adquirido, que corresponde a um robô de seis pernas inspirado no dispositivo RHex. O presente trabalho apresenta uma série de adaptações e melhorias aplicadas para adequar o robô aos ambientes de operação, aumentando suas capacidades de sensoriamento e otimizando de forma relevante as suas funcionalidades.

Palavras-chave— Plataformas Robóticas, Robô Móvel, Robot Operating System (ROS), Inspeção em caverna

1 Introdução

A Espeleologia é uma ciência multidisciplinar que visa o estudo e a exploração de cavernas (Monteiro, 2011). Muitas minas da Vale S.A. se encontram em regiões que possuem cavidades naturais. Para obter licenças ambientais a fim de explorar tais regiões, a Vale deve atender a Legislação de Proteção ao Patrimônio Cultural Nacional e Ambiental (Figueiredo et al., 2010).

Em suma, segundo Ruchkys et al. (2015) o regime jurídico de proteção do patrimônio espeleológico brasileiro está previsto, basicamente, na Por-

taria - IBAMA no. 887/90, no Decreto 99.556/90 (alterado pelo Decreto no. 6.640, de 2008), na Resolução CONAMA 347/2004 e nas Instruções Normativas MMA 02/2009 e 30/2012.

A presença de cavidades em áreas de mineração é uma questão crítica em Carajás, onde se encontram os maiores projetos de expansão das atividades da Vale S.A. Em um levantamento feito em 2004 pela Fundação Casa da Cultura de Marabá, foram descobertas na região centenas de cavernas, grutas e abrigos com presença de minério de ferro e canga (Cunha Jr. et al., 2007).

Para viabilizar as operações nestas regiões, a

equipe de espeleologia da Vale deve visitar as cavidades para realizar um mapeamento das mesmas, bem como coletar informações que servirão de base para os estudos ambientais exigidos. A operação de inspeção e monitoramento de cavernas, porém, apresenta riscos aos espeleólogos, incluindo o deslocamento em áreas de difícil acesso, confinamento, desabamento e ainda a presença de animais selvagens ou peçonhentos (Figura 1).



Figura 1: Riscos na inspeção de cavidades: dificuldade de acesso, presença de animais peçonhentos, riscos ergonômicos, confinamento, desabamento.

Visando minimizar os riscos e aumentar a eficiência das atividades de inspeção e monitoramento de cavernas, a Equipe de Espeleologia e Tecnologia da Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos da Vale deu início ao projeto EspeleoRobô, adquirindo uma plataforma robótica móvel teleoperada de seis pernas, inspirada no modelo RHex da Boston Dynamics.

Com o intuito de estender as funcionalidades e as capacidades de locomoção do robô, o Instituto Tecnológico Vale (ITV) foi acionado para dar continuidade ao projeto. Além da reestruturação de *hardware* e *software*, foi planejada a adição de vários outros recursos ao robô original, com o objetivo de transformar a plataforma móvel teleoperada em um sistema robótico com capacidades estendidas de sensoriamento e processamento computacional embarcados. Na Figura 2 são apresentados os dois modelos supracitados.



Figura 2: (a) Modelo RHex: Inspiração para o dispositivo de monitoramento de cavidades.

Fonte: www.bostondynamics.com/robot_rhex.html
(b) Modelo comercial adquirido.

Este artigo tem como objetivo descrever os desenvolvimentos realizados para a adequação do robô. Na Seção 2 é apresentada uma visão geral das funcionalidades do robô e os principais desafios do mesmo; na Seção 3 são descritas as configurações originais do dispositivo e suas limitações; nas três seções seguintes são apresentados

os principais desenvolvimentos realizados em relação à mecânica, elétrica e software, respectivamente. Por fim, as últimas duas seções trazem os resultados e conclusões apresentando os testes em campo e avaliando a performance no cumprimento dos objetivos propostos.

2 Visão Geral

Segundo (Siciliano et al., 2010), robôs podem ser classificados em: manipuladores, que têm a base fixa; e móveis, que têm a base móvel, permitindo locomoção em ambientes. Manipuladores são usados geralmente em atividades industriais que demandam robustez. Robô móveis são dispositivos teleoperados ou autônomos, projetados para missões específicas em que a mobilidade é requerida.

A teleoperação é necessária quando não há tecnologia suficiente para dar autonomia ao robô, ou ainda quando a cognição humana é essencial para operação do dispositivo. Robôs móveis são geralmente empregados em situações que apresentam dificuldade de acesso ou risco para humanos, de forma que os dispositivos sejam capazes de realizar as funções que seriam feitas por uma pessoa, se tornando uma extensão de suas capacidades. Estes dispositivos são utilizados para diversos fins, tais como busca e salvamento (Casper et al., 2000), operações militares (Hill and Bodt, 2007), exploração espacial (Atherton et al., 2006) e outros.

O robô descrito por este trabalho consiste em uma plataforma teleoperada através de uma base de controle, que envia comandos do operador para a ação do dispositivo. A locomoção é realizada por meio de 6 motores elétricos, que transmitem torque através de correias dentadas até os eixos de rotação. Para a sincronização dos eixos são utilizados sensores *hall*, que detectam a presença de campos magnéticos. Com o auxílio de um pequeno ímã acoplado aos eixos de rotação, é possível identificar a posição zero dos mesmos e realizar a sincronização. Os motores e *drivers* de controle são da marca Maxon, modelo MCD EPOS 60W com caixa de redução planetária (33:1) e podem ser acionados por comunicação serial ou CAN.

A carcaça da plataforma originalmente pesava 19,66 kg, incluindo duas baterias de padrão militar de 1,45 kg, e dimensões minimizadas para adequar o dispositivo às cavidades a serem monitoradas: 548 mm x 250 mm x 124 mm (comprimento x largura x altura, respectivamente). Com as pernas, a altura durante operação pode chegar a 350 mm, considerando uma perna tocando o solo e outra totalmente levantada (Figura 2b). O dispositivo ainda conta com dois sistemas de iluminação e câmeras. Peso e dimensões são fatores importantes, visto que o robô deve ser carregado por longas distâncias por um único operador.

Além dos riscos para as atividades de ins-

peção, o ambiente de cavidades naturais apresenta características que desafiam a performance do robô. Dentre estas, podem ser citadas: terrenos irregulares; presença de umidade e poeira; baixa ou nenhuma luminosidade; e más condições de transmissão de sinais de comunicação. Para contornar estes problemas, adaptações no robô se fazem necessárias.

3 Descrição do Robô Original

A seguir serão detalhadas as características originais do dispositivo, divididas em três subseções: Mecânica, Instalação Elétrica e Software.

3.1 Mecânica

Saranli et al. (2001) abordam a mesma arquitetura mecânica usada no robô móvel de seis pernas RHex. Esta estrutura tem o intuito de fazer o dispositivo percorrer escombros e terrenos irregulares sem a necessidade de sistemas de controle e/ou sensoriamento sofisticados. O EspeleoRobô original (modelo comercial adquirido), que possui esta arquitetura, é mostrado na Figura 2b.

A estrutura mecânica original do robô era composta por diferentes subsistemas, incluindo: estrutura, sistema de transmissão, locomoção e suportes. Utilizando pernas, o robô possuía três tipos de marchas para se locomover. Marchas são o acionamento sequencial das pernas, que é configurado de acordo com terreno ou obstáculo.

A configuração estrutural e tipos de marcha apresentaram limitações, como instabilidade, baixa eficiência energética e dificuldade do robô rotacionar em torno do próprio eixo. Na figura 3, é possível observar que a locomoção com pernas não se apresentou eficiente, devido à má sincronização das pernas, resultando em quedas do robô. Para corrigir o problema, foi estudado o sistema de locomoção original, e detectado os seguintes problemas: folga entre planetária e engrenagem sincronizadora; limite de torque dos motores; e falha de sincronização via *software*.



Figura 3: Problemas de locomoção apresentados no robô original.

3.2 Instalação Elétrica

A seguir serão detalhadas as características das instalações elétricas originais referentes à plataforma e à base de controle.

3.2.1 Plataforma

O processamento da instalação elétrica original da plataforma era composto basicamente por nove Arduinos®. O principal, modelo Mega2560, chamado "Mestre", era responsável por: receber os comandos da base (liga/desliga, modo de operação e direção através do *joystick*); enviar os comandos de direção, via serial, para outros seis Arduinos Uno ligados aos motores; enviar comandos de iluminação para duas placas OSD (Arduinos Uno modificados) via I²C (protocolo de comunicação); e realizar a leitura da posição dos eixos através dos sensores *hall*.

Como o sistema de comunicação com a base não era integrado, a transmissão das imagens das câmeras era feita de forma separada do canal de recepção de comandos vindos da base. Para isso, era utilizado um rádio receptor e dois transmissores de vídeo, um por câmera. A transmissão ainda era limitada a apenas uma câmera por vez e a escolha era feita com auxílio de um acelerômetro, que indicava qual lado do robô estava para cima. A gravação das imagens das câmeras era feita utilizando dois cartões SD, um por câmera.

Na figura 4 é esquematizado, de forma simplificada, a configuração elétrica do robô original.

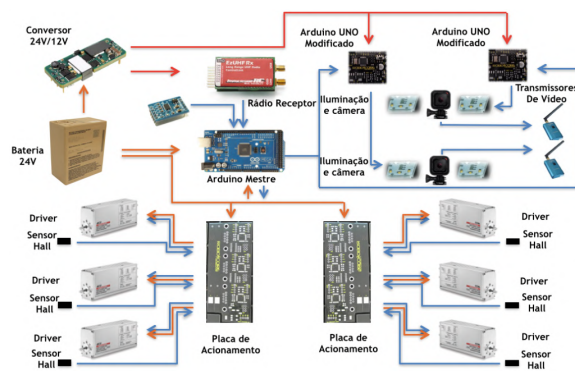


Figura 4: Esquematização de funcionamento do Robô original.

3.2.2 Base de controle

A base de controle, mostrada na figura 12, consistia em uma maleta (*Pelican Case*), provida de tela, onde são transmitidas as imagens das câmeras, um encaixe para bateria, e os demais controles para comando remoto do robô. Os controles são um *joystick* para direcionar o robô; dois *switches* on/off para ligar ou desligar o robô; uma chave seletora para escolha do modo de iluminação; e um botão, auxiliado de um display de 7 segmentos, para escolha e identificação da marcha da ativa.

A base antiga apresentava tamanho e peso desproporcionais, visto que deveria ser transportada em campo por apenas um operador. Além disso, o sistema de comunicação era analógico e não se mostrava adequado para receber as ima-

gens das câmeras e enviar os comandos do operador. Isto se deve ao fato de que o sistema de comunicação unidirecional era composto por um equipamento de aeromodelismo, que apenas envia dados e não recebe nenhum retorno; e um receptor, que recebia imagem de apenas uma das câmeras. Dessa forma, era impossível implantar um sistema de telemetria, que permitiria uma melhor operação e preservação do dispositivo.

3.3 Software

Todo o processamento de dados feito na configuração original se resume aos programas embarcados nos Arduinos. Logo, todo o software foi desenvolvido utilizando-se o ambiente de programação Arduino IDE, e a linguagem *Processing*.

As unidades de processamento responsáveis pelo acionamento dos motores eram Arduinos Uno modificados, com memória reduzida. Isso impossibilitava a implementação de novas funcionalidades, como o controle por torque, velocidade e posição, simultaneamente.

4 Adaptações Mecânicas

Visando solucionar as limitações descritas na seção 3.1, é proposto o estudo e a implementação de modos alternativos de locomoção, além das pernas. Esta proposta tem como objetivo a operação do robô em diferentes tipos de terreno, aumentando assim a flexibilidade e mobilidade do dispositivo. O intuito das implementações consiste em construir dispositivos intercambiáveis para locomoção, incluindo as pernas e novos mecanismos de locomoção, como pneus *off-road*, esteiras e rodas do tipo estrela, mostrados na Figura 5. Dessa forma, diferentes modos são configurados, utilizando-se mecanismos alternativos, escolhidos de acordo com o terreno a ser percorrido. Com o objetivo de aumentar ainda mais a adaptabilidade do dispositivo à diferentes tipos de solo, foram propostos modos híbridos de locomoção, que combinam diferentes mecanismos, como é mostrado na Figura 6.



Figura 5: Mecanismos de locomoção alternativos: pernas, rodas, esteiras e rodas tipo estrela.

Com a finalidade de proporcionar a troca rápida de mecanismos de locomoção, sem o uso de ferramentas, é proposto um sistema de engate rápido com pino de trava, que se encontra em processo de patenteação (Brandi, 2017) (Figura 7). O uso dos novos modos de locomoção, em conjunto com o engate, aumenta consideravelmente a flexi-

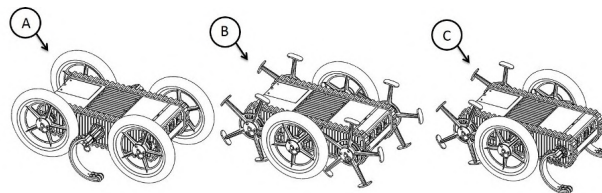


Figura 6: Modos de Locomoção Híbridos.

bilidade do dispositivo durante uma operação que apresente diferentes tipos de terreno e obstáculos.

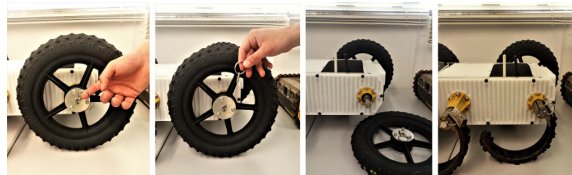


Figura 7: Troca de mecanismos utilizando o sistema de Engate Rápido com Pino de Trava.

Para a alocação dos novos periféricos instalados no robô, foram fabricados suportes utilizando a Técnica de Protipagem Rápida por Depósito de Material Fundido (FDM), popularmente conhecida como Impressão 3D. Este método resulta em um melhor aproveitamento do volume total do robô, e ainda colabora para a redução do peso total do dispositivo.

Considerando novamente o fato de que o operador deveria carregar o robô por longas distâncias, e ainda devido à instalação de novos componentes, foi observada a necessidade da redução no peso total do robô. Primeiramente foi substituída parte das peças do chassi fabricados originalmente em Liga de magnésio AZ31B por peças de poliacetal. Isso resultou em uma diminuição de massa de 2,014 kg, devido à diferença de massa específica dos materiais ($1,73 \text{ g/cm}^3$ liga de magnésio; $1,41 \text{ g/cm}^3$ poliacetal). A estrutura não foi inteiramente substituída por poliacetal, porque este material não é um bom dissipador de calor. Logo, ao redor de componentes que precisam de dissipação, foi utilizado alumínio.

5 Adaptações Elétricas

A seguir serão especificadas as adaptações realizadas na plataforma, na base de controle e apresentada a proposta do desenvolvimento de uma torre de instrumentação, capaz de aumentar a capacidade de sensoriamento do robô.

5.1 Plataforma

O comando central do robô passou a ser executado em um mini computador modelo NUC da Intel®, equipado com processador Core I5 de 6^a geração, 16GB de memória RAM, 1TB de espaço de armazenamento e dimensões inferiores a 12cm, o que o fez adequado para a utilização dentro do robô.

O comando dos drivers de motores passou a ser realizado através de barramento CAN, utilizando o protocolo CANopen. Esta adaptação permitiu o comando centralizado dos motores por um único controlador, o que facilita o diagnóstico e a programação do sistema. Além disso, a comunicação CAN permite a modificação das configurações dos motores e a leitura dos seus estados e parâmetros, como velocidade, posição e corrente. O acionamento ainda tornou-se quase 10 vezes mais rápido devido à velocidade de transmissão de dados do barramento CAN, 1Mb por segundo contra 0,115 Mb da comunicação serial.

O Arduino Mega 2560 passou a ser dedicado apenas a realizar a leitura da posição zero dos eixos de rotação, através de sensores hall, e a comunicação com as placas OSD para acionamento da iluminação.

Visando maior eficiência nas conversões de tensão necessárias, foram escolhidos conversores da marca Vicor®. Para uma melhor captação e armazenamento das imagens adquiridas, foi adotada uma câmera IP Vanxse® CCTV CMOS Sony® de 2.0 MP e possibilidade de compressão de vídeo em H.264. A qualidade de vídeo atinge 1080P à 30fps e as dimensões da câmera são adequadas para a sua alocação nos suportes do robô. A outra câmera IP empregada é a Axis P1224-E, que possui amplo campo de visão horizontal de 145°.

Com o intuito de interligar equipamentos via rede Ethernet, foi adicionado ao robô um *switch* NETGEAR®. Este dispositivo possui 5 portas *gigabit*, que podem ser espelhadas, e dimensões proporcionais ao projeto. Além disso, a transmissão de sinais passou a ser feita via rádio (Ubiquiti Rocket M900) e antena omnidirecional (ASA-900CI).

Para facilitar a interação de alguns componentes com a placa do Arduino, foi projetada uma placa auxiliar no software Proteus®. A placa, mostrada na Figura 8, foi desenhada para ser acoplada por cima da placa do Arduino Mega, e assim, realizar o interfaceamento de todas as ligações que têm este dispositivo envolvido. Conectores integrados à placa auxiliar foram projetados para receber os cabos que fazem conexão com as placas OSD e sensores *hall*.

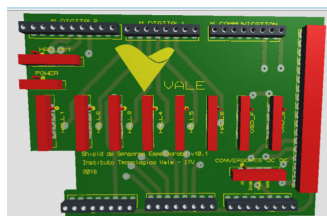


Figura 8: Projeto da placa auxiliar desenvolvida para ser acoplada ao Arduino Mega 2560.

Outros circuitos projetados para serem utilizados no robô são as placas de interfaceamento, responsáveis pela alimentação e acionamento dos

motores. Estas placas contam com banco de capacitores para fornecer descargas rápidas de energia, quando os motores precisam de muito torque. Os projetos foram enviados ao laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Federal de Ouro Preto para serem impressos utilizando uma máquina de CNC (Controle Numérico Computadorizado) com software MAC3®. As placas impressas destes circuitos são mostradas nas Figura 9 e 10. Na Figura 11 é apresentado, de forma simplificada, o esquema geral da nova estrutura eletrônica do robô.

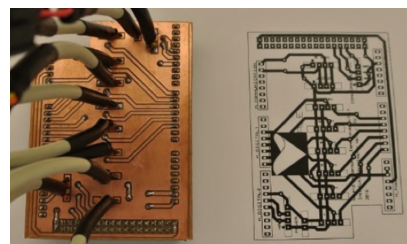


Figura 9: Placa auxiliar desenvolvida para ser acoplada ao Arduino Mega 2560.



Figura 10: Placas de alimentação e acionamento dos motores.

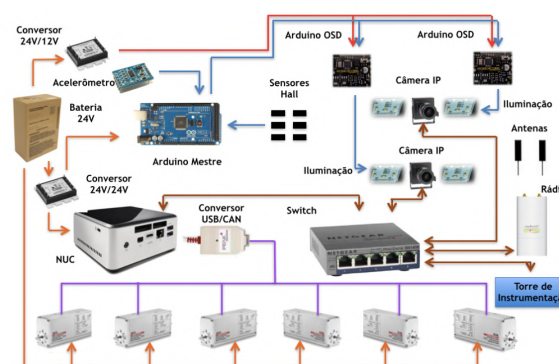


Figura 11: Esquema geral da nova estrutura eletrônica do robô.

5.2 Base de controle

A nova base de controle consiste basicamente em: um notebook *rugged*; um *joystick* para controlar o robô; um rádio e antena bidirecional, que fazem a transmissão de informação entre base e robô.

O notebook selecionado é o Dell® Latitude 14 Rugged, modelo ATG 5404, com tela de 14", processador Intel i7, 16GB de memória RAM e 1TB de espaço de armazenamento. Além da alta performance proporcionada pela excelente configuração de hardware, este dispositivo apresenta

alta robustez e resistência consideradas essenciais para as operações em campo.

O rádio utilizado para efetuar a comunicação entre base e robô é o Ubiquiti Rocket M900, que possui frequência de operação de 900MHz, trabalha com potência de saída de até 28dBm, interface RJ-45 10/100 e sistema MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), o que aumenta a confiabilidade da transmissão e recepção do sinal, devido aos múltiplos transmissores e múltiplos receptores. A antena escolhida para ser empregada ao rádio é a Antena Yagi AMY-9M16, que também trabalha com a mesma faixa de operação, sistema MIMO e ainda possui alto ganho (16 dBi). A utilização desse novo sistema de rádio, de forma genérica, aumenta a capacidade de comunicação em até 10x, se comparado ao sistema antigo, projetado para aeromodelismo.

Com esta combinação de antena de alto ganho e rádio Ethernet, pôde ser proporcionada uma melhor qualidade na comunicação de modo geral, aumentando a estabilidade, mesmo em grandes distâncias. Como o novo sistema de comunicação é bidirecional, foi possível implementar o sistema de telemetria, que permite ao usuário o recebimento de informações relevantes, como velocidade, torque dos motores e nível de bateria, durante a operação do robô. A transmissão de imagens passou a ser realizada através do mesmo meio de comunicação dos comandos e telemetria, que ainda permite a visualização das imagens das duas câmeras ao mesmo tempo. Caso ainda seja necessário melhorar a comunicação em determinada operação, o sistema de rádio permite a utilização de redes *mesh*, possibilitando o uso de repetidores de sinal, que podem ser distribuídos dentro da cavidade.

Na figura 12 é apresentado um resumo esquemático da nova base de controle e seu funcionamento. O usuário envia os comandos através do *joystick*, que transmite tais instruções para o notebook. O notebook interpreta os sinais de comando com o auxílio do *middleware* ROS e os envia para o sistema de rádio através da rede Ethernet. O sinal recebido pelo rádio é enviado para o robô através da antena Yagi. As informações de funcionamento do robô fazem o caminho inverso até o notebook, auxiliando o operador a realizar a atividade de inspeção ou monitoramento.



Figura 12: Bases de controle original (esquerda) e esquema da nova implementação (direita).

O uso de comunicação via cabo (fibra ótica) foi inicialmente proposto, porém, visto que o cabo estaria exposto a ambientes acidentados e com obstáculos, haveria a possibilidade de rompimento do mesmo. Dessa forma, visando a segurança e a melhor mobilidade do robô, foram feitos apenas esforços no sentido de realizar comunicação sem fio de forma mais eficiente.

5.3 Torre de Instrumentação

A construção de uma torre de instrumentação, para ser acoplada sobre o robô tem como objetivo aumentar a capacidade de sensoriamento do robô, realizando também o mapeamento tridimensional das cavidades. A torre de instrumentação (Figura 13) está sendo projetada e desenvolvida em parceria com o SENAI/CIMATEC da Bahia.

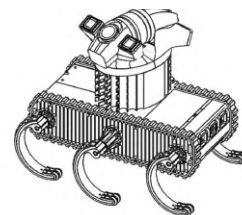


Figura 13: Modelagem tridimensional da torre de instrumentação acoplada sobre o robô.

O mapeamento de cavidades através de nuvem de pontos 3D coloridos foi proposto, utilizando câmeras de alta resolução e sensor Velodyne LiDAR VLP-16. Este sensor é capaz de captar 300 mil pontos por segundo, varrendo o ambiente em 360 graus horizontais e 15 graus verticais, em um raio de até 100m.

6 Reestruturação de *software*

O maior diferencial da nova configuração de *software* do robô é a utilização do ROS - *Robot Operating System*. Segundo Quigley et al. (2009), ROS é uma plataforma que permite o desenvolvimento rápido de aplicações robóticas, fornecendo um meio estruturado de comunicação entre processos heterogêneos. Esta plataforma oferece um mecanismo estruturado para a troca de informações entre diferentes nós, equivalente a processos de um sistema executando em paralelo. A troca de informações é feita através mensagens subscritas e publicadas em tópicos, equivalentes a memórias dinâmicas compartilhadas.

Este *middleware* apresenta pacotes e estruturas próprias para o desenvolvimento de robôs, incluindo desde *drivers* até algoritmos considerados como estado-da-arte. Com o ROS, a modularização é feita de forma simples. Além disso, é possível encontrar suporte na comunidade de desenvolvedores na internet e o reaproveitamento de códigos é feito de forma simplificada, facilitando a integra-

ção de dispositivos e o próprio desenvolvimento de novas funcionalidades.

Para a comunicação do Notebook Rugged com o NUC, utilizam-se *sockets* encapsulados pelo ROS, que abstraem a implementação dos detalhes da comunicação. Para o acionamento dos motores foi desenvolvida uma biblioteca de comunicação CAN, que define os padrões de comando para inicializar, resetar, controlar e monitorar os *drivers* dos motores. No código embarcado no Arduino Mestre foram implantados os conceitos de ROS através da ferramenta Rosserial. Os valores de leitura dos sensores hall e os comandos de iluminação são informações que passaram a ser manipuladas através de tópicos do ROS, o que otimiza o processamento de informações.

Outra modificação em relação ao *software* foi a criação da interface gráfica integrada à base de controle. Como o ROS pode ser programado em C++ e permite integração com várias IDEs com interface gráfica, este apresenta uma série de possibilidades para o desenvolvimento de uma interface para o operador. A ideia desta implementação consiste em proporcionar ao usuário uma ferramenta de comando do robô intuitiva e informativa, através do uso da telemetria. A interface foi desenvolvida no ambiente de programação Qt, que é uma IDE *open-source*, multiplataforma, de design simplificado (*drag-and-drop*), que utiliza C++ e é empregado por diversas grandes empresas. Na Figura 14 é mostrado o esquema de troca de informações, durante funcionamento, de todos os nós e tópicos criados, com destaque para a interação de várias destas estruturas com o nó da interface, chamado *gui*. Na Figura 15 é mostrada a interface durante teste realizado em uma mina subterrânea desativada, situada em área de risco, no município de Ouro Preto-MG.

Além dos desenvolvimentos de *software* implementados, a simulação tem se mostrado uma ferramenta importante para que não sejam desperdiçados esforços em testes de campo equivocados. Neste sentido, os *softwares* Gazebo e V-REP, têm sido utilizados para determinar a eficácia mecânica do robô (Figura 16).

7 Resultados

Antes das implementações realizadas, devido aos problemas de mobilidade mencionados anteriormente, não se fazia possível a realização de testes de campo relevantes, pois o robô não percorria distâncias superiores à 50m. Até o momento, testes preliminares de campo foram realizados com o objetivo de verificar a performance de locomoção e qualidade de comunicação entre base e plataforma. Em dois testes realizados no campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto, foram testados os modos de locomoção utilizando 6 rodas e 4 rodas combina-

das com 2 pernas. Com ambos os modos, o robô conseguiu transpor terrenos não estruturados. Na configuração com 4 rodas e 2 pernas, foi possível superar, com mais facilidade, pequenos obstáculos como pedras e pedaços de madeira. Em outro teste realizado na Mina subterrânea de Passagem (Mariana-MG), foi verificada comunicação entre base (fora da mina) e plataforma (dentro da mina) a uma distância de 175m. Em parceria com a Prefeitura de Ouro Preto, o robô foi utilizado em uma inspeção de cavidades em área de risco de desmoronamento. Nesta ocasião, o dispositivo superou terreno lamacento e com poças d'água. Na figura 17 é mostrado o robô durante testes de campo.

Os resultados alcançados têm se mostrado satisfatórios. A sincronização das pernas tem se mostrado mais eficaz, o que pode melhorar a locomoção do dispositivo com pernas; o uso de rodas e rodas combinadas com pernas também tem se mostrado uma boa opção para determinados tipos de terreno; o uso de ROS faz com que o sistema seja mais robusto e o próprio desenvolvimento mais eficiente; e a comunicação está mais estável, além de permitir o acesso de informações importantes pelo operador durante operação, com o sistema de telemetria. Através do link <https://youtu.be/xn728n0CQqA> é possível observar os resultados nos testes de simulação e de campo. Durante o vídeo é possível observar um cabo de segurança, utilizado para garantir o resgate do robô caso a comunicação falhe. Esta é uma medida provisória, utilizada durante as fases de desenvolvimento e testes.

8 Conclusões

O desenvolvimento descrito por este trabalho consiste em adaptações e melhorias para um robô móvel teleoperado, usado para monitoramento de cavidades naturais. As implementações envolvem toda a reestruturação da base de controle e *software*, bem como adaptações mecânicas e elétricas na plataforma. O projeto EspeleRobô tem grande importância para o Instituto Tecnológico Vale, devido ao grande número de pessoas envolvidas, à relevância do tema de sua aplicação e à própria aplicabilidade dos desenvolvimentos.

Ainda faltam ser desenvolvidos os modos de locomoção com rodas estrela e esteira, e a torre de instrumentação. No entanto, os testes têm se mostrado favoráveis ao uso do robô para aplicações reais de inspeção e monitoramento de cavidades realizadas pela equipe de espeleologia da Vale.

Como trabalhos futuros, além da consolidação dos novos modos de locomoção propostos, tem-se o desenvolvimento de sistemas de geolocalização adaptados para cavidades, visto que GPS e magnetômetros não funcionam bem nestes ambientes; e a implementação de um sistema de navegação autônoma.

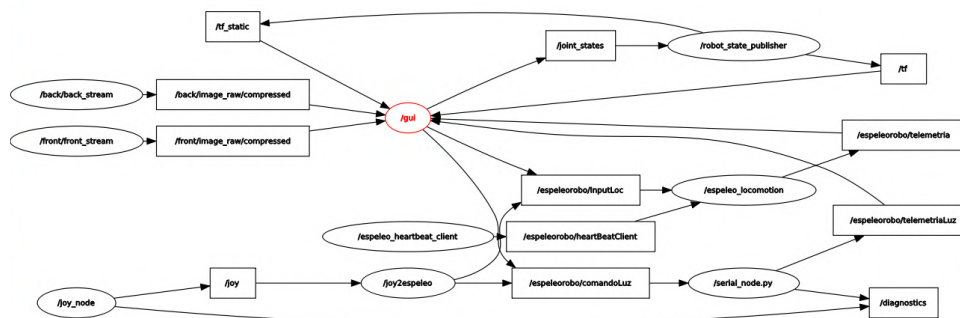


Figura 14: Nós do ROS do sistema em funcionamento.

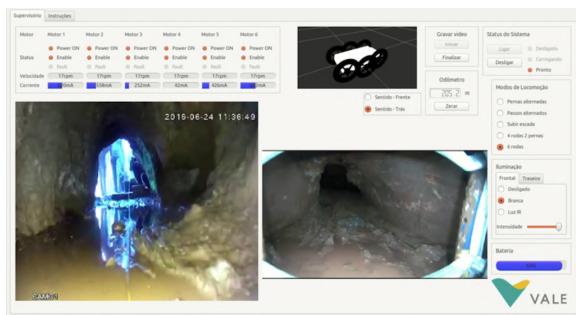


Figura 15: Interface Gráfica durante operação.

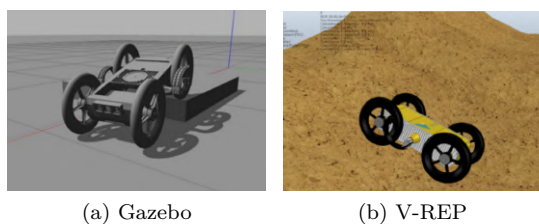


Figura 16: Simulações com modo de locomoção híbrido roda/perna.



Figura 17: Testes de campo em terrenos não-estruturados inclinados e cavidades em área de risco.

9 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à equipe do Laboratório de Robótica do Instituto Tecnológico Vale e ao SENAI/CIMATEC. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, CAPES e Vale S.A.

Referências

Atherton, J. A., Hardin, B. and Goodrich, M. A. (2006). Coordinating a multi-agent team using a multiple perspective interface paradigm., *AAAI Spring Symp.: To Boldly Go*

Where No Human-Robot Team Has Gone Before, pp. 47–51.

Brandi, I. V. (2017). Terrestrial mobile platform.

Casper, J. L., Micire, M. and Murphy, R. R. (2000). Issues in intelligent robots for search and rescue, *AeroSense 2000*, Int. Soc. for Optics and Photonics, pp. 292–302.

Cunha Jr., W. R., von Atzingen, N. and Crescencio, G. (2007). Estudos espeleológicos na serra dos Carajás, *ANAIS do XXIX Cong. Brasileiro de Espeleologia*, Ouro Preto, pp. 97–103.

Figueiredo, L. A. V. D., Rasteiro, M. A. and Rodrigues, P. C. (2010). Legislação Para a Proteção Do Patrimônio Espeleológico Brasileiro : Mudanças , Conflitos E O Papel da Sociedade Civil, *Espeleo-Tema* 21(1): 49–65.

Hill, S. G. and Bodt, B. (2007). A field experiment of autonomous mobility: operator workload for one and two robots, *Pro. of the ACM/IEEE int. conf. on Human-robot interaction*, ACM, pp. 169–176.

Monteiro, F. A. D. (2011). Projeto de implantação de conhecimentos, práticas e legislação pertinentes à espeleologia na superintendência estadual do meio ambiente – SEMACE, *Anais do 31º Cong. Brasileiro de Espeleologia*, pp. 263–267.

Quigley, M., Faust, J., Foote, T. and Leibs, J. (2009). Ros: an open-source robot operating system.

Ruchkys, U., Travassos, L., Rasteiro, M. and Faria, L. (2015). Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conservação no quadrilátero ferrífero, minas gerais.

Saranli, U., Buehler, M. and Koditschek, D. E. (2001). RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot, *The Int. Journal of Robotics Research* 20(July): 616–631.

Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. and Oriolo, G. (2010). *Robotics: modelling, planning and control*, Springer Science & Business Media.

5. ESPELEOROBÔ - INSPEÇÃO DA TUBULAÇÃO DE REJEITOS DA USINA DE SALOBO

PROD. TEC. ITV. MI- N004 / 2018

DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2018.4.Torre

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV MI

ESPELEOROBÔ - INSPEÇÃO DA TUBULAÇÃO DE REJEITOS DA USINA DE SALOBO

Relatorio final do projeto de inspeção da tubulação de rejeito da Usina
de Salobo

Autores:

Marcos Paulo Torre
Gabriel Carvalho Garcia
Jacó Dias Domingues
Amauri Coelho
Jhonson Santos
Uidson Silva
Gildean Marcal
Cleyton Dias
Ramon Araújo
Iuri Brandi
Philip Von Pritzelwitz
Amilton Sinatora
Gustavo Medeiros Freitas

Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil

Mairo/2018

Título: EspeleoRobô - Inspeção da tubulação de rejeitos da Usina de Salobo	
PROD. TEC. ITV. MI- N004 / 2018	Versão 05
Classificação: () Confidencial () Restrita (X) Uso interno () Publico	

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)

T723e

Torre, Marcos Paulo

EspeleoRobô - Inspeção da tubulação de rejeitos da Usina de Salobo/
Marcos Paulo Torre... [et al] – Ouro Preto, MG:
Instituto Tecnológico Vale, maio de 2018.
32 p.:il

1. Espaços confinados. 2. EspeleoRobô. 3. Inspeção de tubulações

CDD 23. ed 670.427

RESUMO EXECUTIVO

Este relatório descreve a inspeção realizada com um dispositivo robótico, no mês de maio de 2018, em uma tubulação de rejeitos localizada na Usina de Salobo, no município de Marabá-PA. Os rejeitos provenientes do beneficiamento do minério de cobre são direcionados para a barragem por meio de uma tubulação de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), que apresentou vazamentos em alguns pontos, indicando a necessidade de avaliação das condições internas do duto. A tubulação mencionada é um espaço confinado e apresenta riscos aos inspetores, motivo pelo qual uma plataforma robótica foi utilizada para gerar um registro fotográfico das condições internas do mesmo, auxiliando na prevenção de vazamentos que possam colocar em risco o patrimônio ambiental no qual a unidade está instalada. O dispositivo forneceu um registro de imagens das superfícies internas da tubulação, no qual foi possível identificar marcas de desgaste que contribuirão para a avaliação da causa principal do problema. Apesar do conteúdo do relatório ser informativo, foram sugeridas algumas ações que visam a redução do problema enfrentado, por meio da comparação das imagens obtidas com padrões de desgaste disponíveis na literatura.

RESUMO

Este documento apresenta os procedimentos e resultados obtidos com um dispositivo robótico durante a inspeção da tubulação de rejeitos de Salobo, uma usina produtora de concentrado de cobre que pertence à mineradora Vale S.A., localizada no município de Marabá - PA. Após a ocorrência de vazamentos em pontos específicos da tubulação, foi realizado um registro fotográfico do interior do duto em uma região crítica, onde o material escoado ganha velocidade devido ao desnível do terreno. Por se tratar de um espaço confinado, a inspeção foi realizada utilizando uma plataforma móvel teleoperada, o EspeleoRobô, que possui câmeras na parte frontal e traseira. O dispositivo é capaz de enviar as imagens em tempo de execução para uma base de controle, realizando também a filmagem dos trechos inspecionados. Ao final da inspeção, as imagens obtidas permitiram identificar os trechos e marcar aqueles que apresentam maior ocorrência de desgaste.

ABSTRACT

This document presents the procedures and results of a robotic device during the Salobo's tailings pipeline inspection, which is a copper-producing plant located in Marabá-PA, owned by the mining company Vale S.A. After leaks occurrences at specific points of the pipeline, a photographic record of the pipe interior was carried out in a critical region, where the fluid material speeds-up due to the terrain slope. As it is a confined space, the inspection was performed by a teleoperated mobile platform, the EspeleoRobô, which has cameras on the front and rear sides. The device is capable of transmitting the images at runtime to a control base, also filming the inspected sections. At the end of the inspection, the images allowed to identify and mark the sections with a higher occurrence of wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Tubulação de rejeitos da Usina de Salobo	7
Figura 2 -	Configurações: hexápode original, apenas com rodas e híbrida, respec- tivamente.	9
Figura 3 -	Interface Gráfica para comando do EspeleoRobô.	9
Figura 4 -	Localização, distância e caminho para chegar a Usina de Salobo. . . .	10
Figura 5 -	Trecho crítico de inspeção.	10
Figura 6 -	Abertura de janelas de visita.	13
Figura 7 -	Montagem de base móvel em caminhonete.	13
Figura 8 -	Torre de filmagem com duas câmeras e LEDs de iluminação.	14
Figura 9 -	Etapas de inserção do robô na tubulação.	15
Figura 10 -	Detalhes dos trechos 1 e 2.	16
Figura 11 -	Detalhes dos trechos 3 e 4.	17
Figura 12 -	Detalhes dos trechos 5 e 6.	18
Figura 13 -	Detalhes dos trechos 7 e 8.	19
Figura 14 -	Detalhes dos trechos 9 e 10.	20
Figura 15 -	Detalhes dos trechos 11 e 12.	21
Figura 16 -	Detalhes dos trechos 13 e 14.	22
Figura 17 -	Detalhes dos trechos 15 e 16.	23
Figura 18 -	Detalhes dos trechos 16 e 17.	24
Figura 19 -	Detalhes dos trechos 17 e 18.	25
Figura 20 -	Detalhes dos trechos 19 e 20.	26
Figura 21 -	Detalhes dos trechos 21 e 22.	27
Figura 22 -	Detalhes dos trechos 23.	27
Figura 23 -	Marcação dos trechos comprometidos da tubulação	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de identificação dos autores 11

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

° - graus

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

IP - Protocolo de Internet (*Internet Protocol*)

ITV - Instituto Tecnológico Vale

MG - Minas Gerais

PA - Pará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	EspeleoRobô	8
1.2	Data e Localização da Inspeção	10
1.3	Trecho crítico de inspeção	10
1.4	Identificação dos autores	11
2	OBJETIVO	12
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	13
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

Salobo é o segundo projeto de cobre desenvolvido pela Vale no Brasil. A mina está localizada em Marabá, sudeste paraense, e entrou em operação em novembro de 2012. O empreendimento tem capacidade nominal estimada de 100 mil toneladas anuais de cobre em concentrado. Com a expansão da operação, o Salobo II, a capacidade de produção do empreendimento será duplicada para 200 mil toneladas anuais do produto (VALE, 2015).

A mina do Salobo está dentro da Floresta Nacional Tapirapé-Aquiri, que possui uma área superior a 190 mil hectares e completou 25 anos de fundação em 2014. A Vale protege este importante patrimônio natural, promovendo a conservação da biodiversidade desta área, juntamente com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, o ICMBio (VALE, 2015).

Salobo envolve a operação integrada de lavra a céu aberto, beneficiamento, transporte e embarque. O escoamento da produção é feito por rodovia, da mina até terminal ferroviário existente da Vale em Parauapebas (PA), de onde é transportada pela Estrada de Ferro Carajás até o terminal marítimo de Ponta da Madeira, no Maranhão (VALE, 2015).

Os rejeitos gerados pelo processamento do minério de cobre são direcionados para uma barragem de rejeitos, por meio de um duto de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), cujo diâmetro é de 1200 mm. A tubulação tem um comprimento total de 800 metros, sendo constituída pela junção de vários trechos de 12 metros de comprimento, como ilustrado na Figura 1).

Figura 1 – Tubulação de rejeitos da Usina de Salobo



Fonte: O Autor

Devido a ocorrência de vazamentos em alguns pontos críticos da tubulação, especifica-

mente localizados em um trecho que apresenta grande desnível, percebeu-se a necessidade de uma inspeção detalhada para avaliação de danos internos aparentes, tais como desgastes, furos e defeitos de fabricação.

A tubulação em questão é um espaço confinado, e seu interior não pode ser acessado por inspetores sem que seja feita uma abertura em sua superfície, conhecida como janela de visita. Para inspeção de todos os trechos de interesse, seria necessária a abertura de várias janelas para avaliação, inviabilizando o procedimento.

Para realizar a inspeção de maiores extensões da tubulação sem a abertura de várias janelas de visita, foi utilizado o EspeleoRobô, um dispositivo teleoperado para inspeção de cavernas naturais e espaços confinados, que será descrito nas próximas seções.

1.1 EspeleoRobô

É recorrente nas áreas de exploração mineral o descobrimento de cavidades naturais. Por questões legais e ambientais, não é permitida a exploração econômica destas áreas sem antes haver um estudo destes ambientes. Certos cenários podem levar ao impedimento exploratório, como por exemplo, a presença de uma espécie vegetal ou animal inédita (ROCHA et al., 2017).

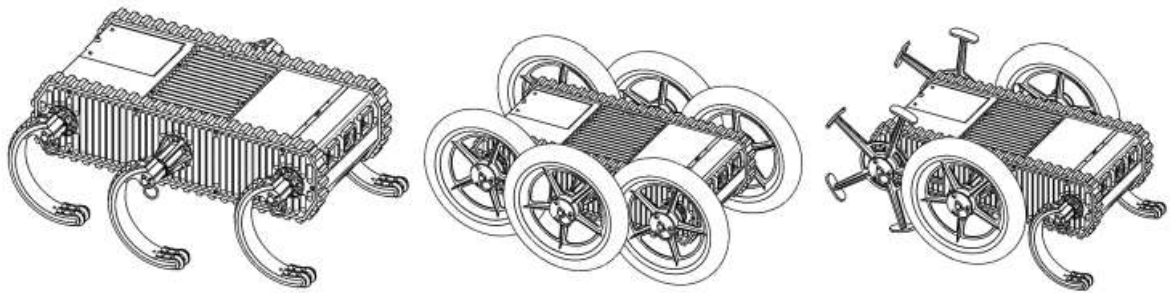
A equipe de Espeleologia da Vale iniciou o projeto de um dispositivo robótico operado remotamente, com câmeras frontais e traseiras e sistema de iluminação, capaz de se locomover em terrenos acidentados e realizar a inspeção de cavernas naturais. O objetivo consiste em evitar, ao máximo, a presença do espeleólogo dentro destes locais. O robô conta com um sistema intercambiável de locomoção, mais uma torre capaz de realizar o mapeamento das cavidades.

Com o intuito de estender as funcionalidades e as capacidades de locomoção do robô, o Instituto Tecnológico Vale (ITV) foi acionado para dar continuidade ao projeto. Além da reestruturação de *hardware* e *software*, foi planejada a adição de vários outros recursos ao robô original, com o objetivo de transformar a plataforma móvel teleoperada em um sistema robótico com capacidades estendidas de sensoramento e processamento computacional embarcados (COTA et al., 2017).

Após as transformações realizadas, incluindo o desenvolvimento de um sistema intercambiável de locomoção, foi percebido que a aplicação do robô vai além da inspeção de cavernas naturais e esse poderia também ser utilizado para inspeção de outros ambientes confinados que apresentem riscos aos operadores, tais como dutos e galerias de barragem.

A plataforma móvel do EspeleoRobô é capaz de se locomover utilizando pernas, rodas, rodas do tipo estrela e esteiras, dependendo das condições do terreno. Configurações híbridas também podem ser utilizados para aproveitar as características mais fortes de cada método de locomoção, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Configurações: hexápode original, apenas com rodas e híbrida, respectivamente.

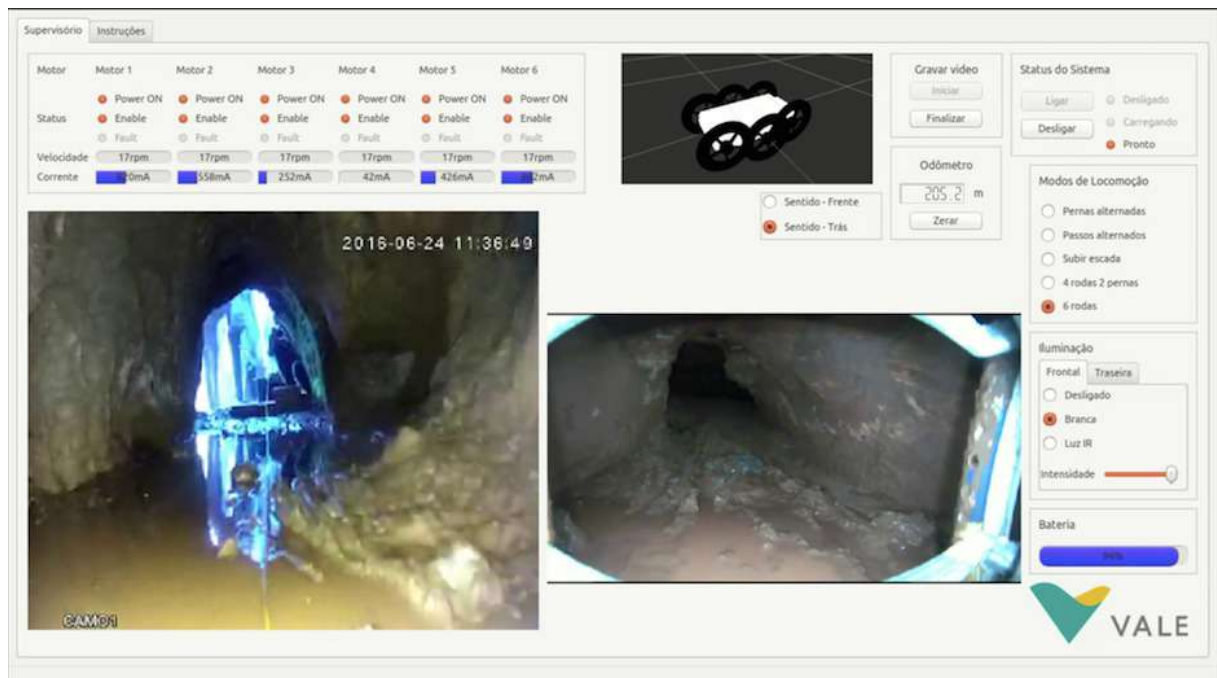


Fonte: Rocha et al. (2017).

A base de comando é composta por um notebook, utilizando ROS como sistema de controle. Um *joystick* similar ao de um vídeo game foi escolhido para controlar o robô. O sistema de comunicação utiliza um rádio Ethernet de 900MHz. Ainda, para uma melhor comunicação, foi escolhida uma antena direcional de alto ganho que permita a estabilidade da comunicação na maior distância possível (COTA, 2017).

A interface gráfica desenvolvida tem o objetivo de fornecer ao usuário uma ferramenta intuitiva para comando do robô, onde são disponibilizadas as imagens das câmeras, telemetria dos motores e *faceplates* para acionamento das luzes de iluminação artificial (Figura 3).

Figura 3 – Interface Gráfica para comando do EspeleoRobô.



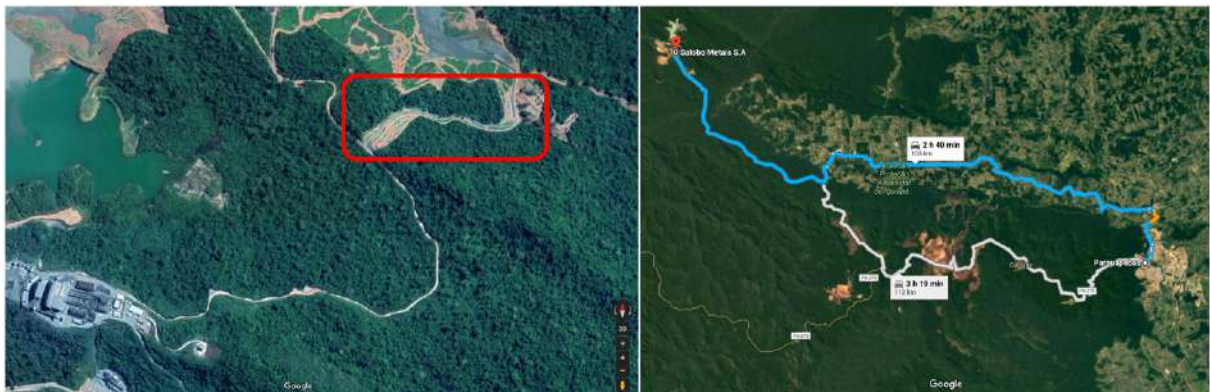
Fonte: O Autor.

1.2 Data e Localização da Inspeção

A inspeção foi realizada nos dias 18 e 19 de abril de 2018, na Usina de Salobo, localizada no município de Marabá - PA. A região fica a aproximadamente 100km do município de Parauapebas - PA, como ilustrado na Figura 4.

Coordenadas aproximadas do local: -5.796051° , -50.515224° .

Figura 4 – Localização, distância e caminho para chegar a Usina de Salobo.

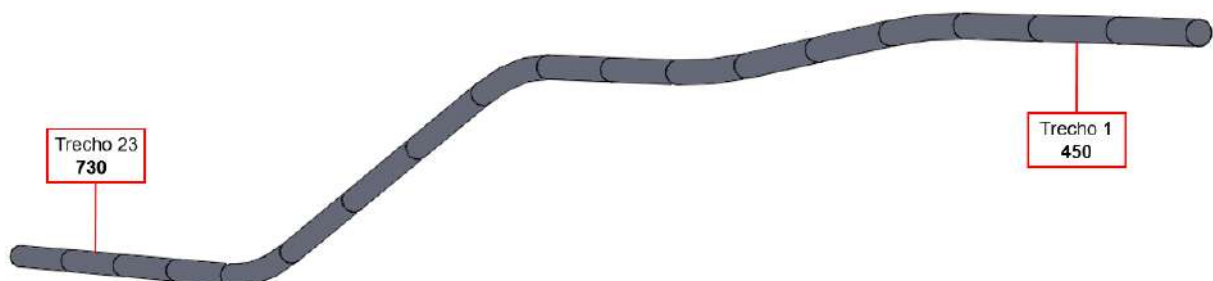


Fonte: Google Maps.

1.3 Trecho crítico de inspeção

O segmento da tubulação de maior interesse para inspeção é localizado em uma região cujo terreno apresenta grande desnível. Para melhorar as condições de inspeção, foram tomados 23 trechos de 12 metros, cuja região crítica está posicionada, aproximadamente, no centro desse segmento. A Figura 5 ilustra um esquema aproximado da região a ser inspecionada.

Figura 5 – Trecho crítico de inspeção.



Fonte: O Autor.

1.4 Identificação dos autores

Os autores e instituições vinculadas podem ser identificados por meio da Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de identificação dos autores

Nome	Instituição	Departamento
Marcos Paulo Torre	Instituto Tecnológico Vale	Controle e Robótica
Gabriel Garcia	Instituto Tecnológico Vale	Controle e Robótica
Jacó Domingues	Instituto Tecnológico Vale	Controle e Robótica
Amaury Coelho	Instituto Tecnológico Vale	Controle e Robótica
Jhonson Santos	Vale - Salobo Metais	Manutenção Preditiva
Uudson Silva	Vale - Salobo Metais	Manutenção Preditiva
Gildean Marcal	Vale - Salobo Metais	Manutenção Preditiva
Cleyton Dias	Vale - Salobo Metais	Manutenção Preditiva
Ramon Araújo	Vale - Mina de Águas Claras	Espeleologia
Iuri Brandi	Vale - Mina de Águas Claras	Espeleologia
Philip Von Pritzelwitz	Instituto Tecnológico Vale	Tribologia
Amilton Sinatora	Instituto Tecnológico Vale	Tribologia
Gustavo Freitas	Instituto Tecnológico Vale	Controle e Robótica

Fonte: O Autor.

2 OBJETIVO

O objetivo da inspeção é obter um registro fotográfico do interior da tubulação de rejeitos da Usina de Salobo, em um trecho crítico altamente propenso ao desgaste devido ao aumento de velocidade do material escoado. As imagens auxiliam na identificação dos trechos com maior ocorrência de desgaste e que apresentam riscos de vazamentos, a fim de evitar acidentes ambientais que possam prejudicar o patrimônio natural onde a usina está localizada.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para viabilizar a inspeção do interior da tubulação de rejeitos, foi necessária a abertura de janelas de visita ao longo da região de interesse, que no caso eram os 300 metros finais de sua extensão. As janelas foram abertas com espaçamento de 250 metros, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Abertura de janelas de visita.



Fonte: O Autor.

Em missões de inspeção de tubulações, a base do EspeleoRobô é normalmente montada no final do duto, onde uma antena direcional de alto ganho é apontada para seu interior com o objetivo de estabelecer a comunicação com o dispositivo. Como a tubulação de rejeitos da usina de Salobo é exposta, com material não metálico e ainda conta com uma estrada ao longo de sua extensão, uma base móvel foi montada em uma caminhonete, que acompanhava o robô a medida que o mesmo avançava, como ilustrado na Figura 7.

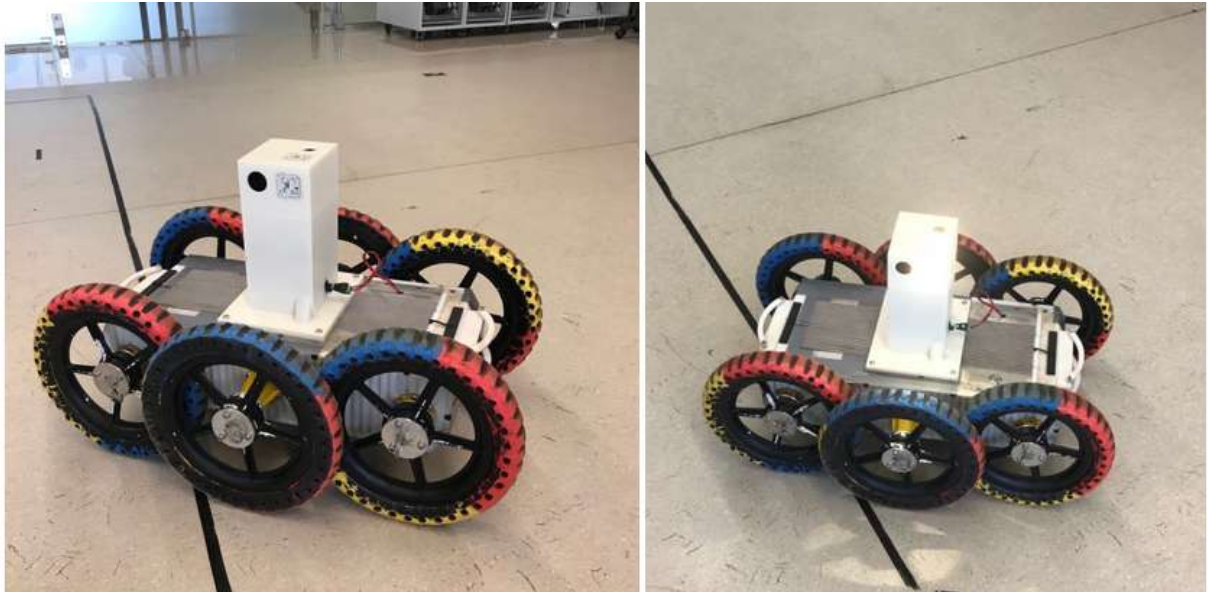
Figura 7 – Montagem de base móvel em caminhonete.



Fonte: O Autor.

Devido ao diâmetro da tubulação, foi desenvolvida uma torre de instrumentação com duas câmeras adicionais, com o objetivo de obter maiores detalhes que permitam realizar uma análise mais apropriada do desgaste presente nas paredes do duto. A torre (Figura 8) também conta com LEDs de iluminação artificial devido a falta de iluminação no interior da tubulação.

Figura 8 – Torre de filmagem com duas câmeras e LEDs de iluminação.



Fonte: O Autor.

As inspeções iniciaram-se com a inserção do robô pelas janelas de visita. Para evitar que eventuais falhas de comunicação ou outros tipos de defeito impeçam que o robô seja resgatado de dentro do tubo, o mesmo foi amarrado com o auxílio de uma corda, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Etapas de inserção do robô na tubulação.

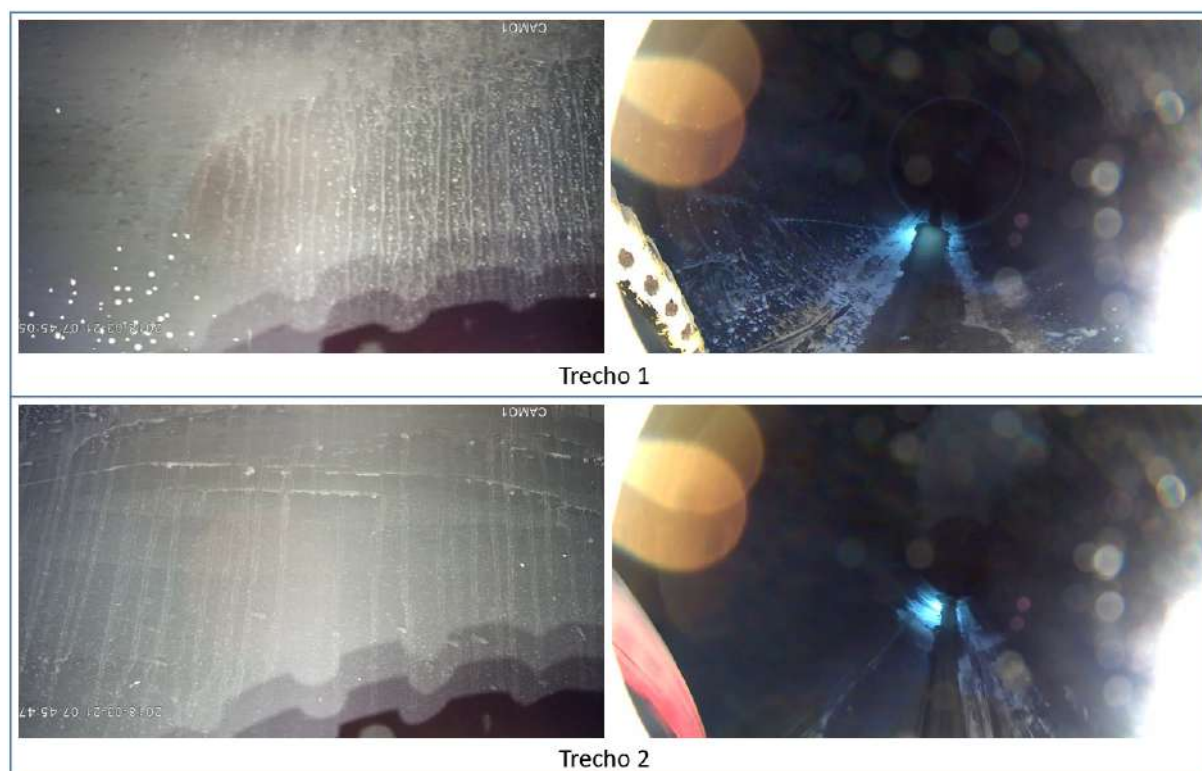


Fonte: O Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A medida que o robô avançava no segmento de tubulação, as imagens obtidas pelas câmeras foram gravadas. Dessa forma, foi gerado um registro de fotos contendo a imagem frontal e lateral de cada trecho da tubulação, conforme o esquema apresentado na Figura 5, a fim de observar o padrão de desgaste apresentado.

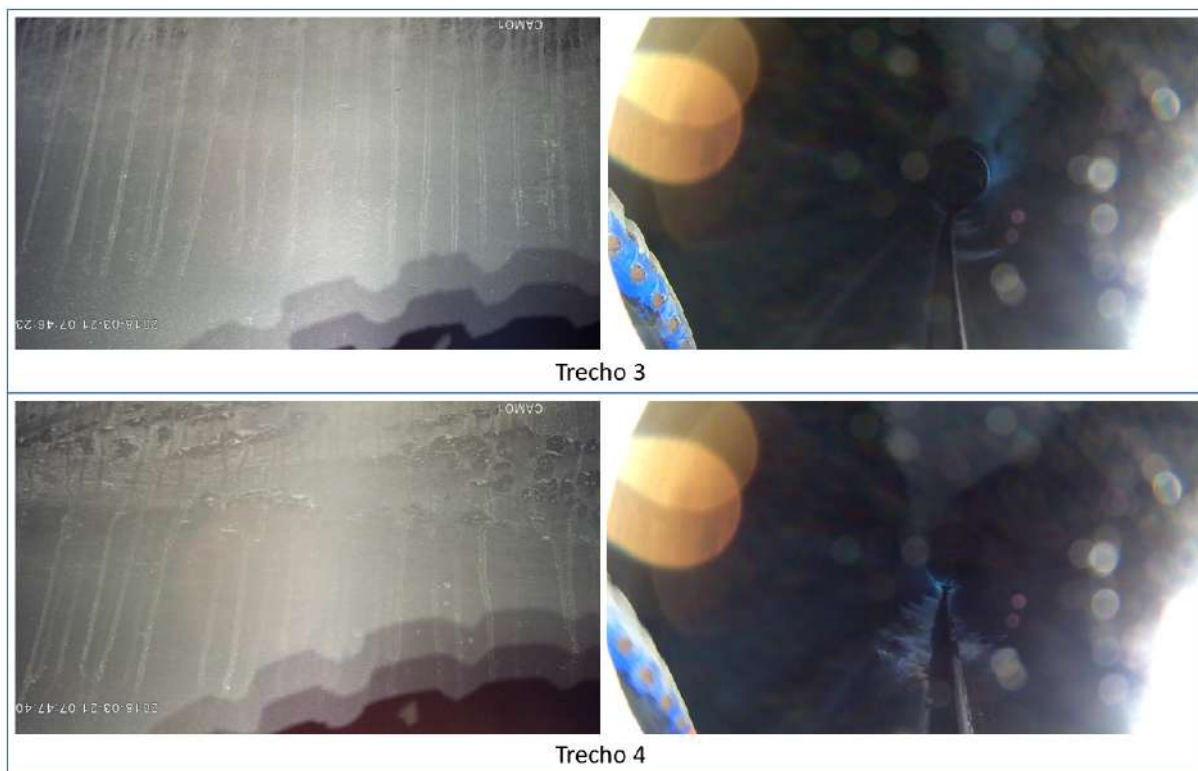
Figura 10 – Detalhes dos trechos 1 e 2.



Fonte: O Autor.

No trechos 1 e 2, registrados pela Figura 10, é possível identificar marcas verticais ocasionadas por sujeira no interior do tubo, aparentemente não relacionadas a desgaste.

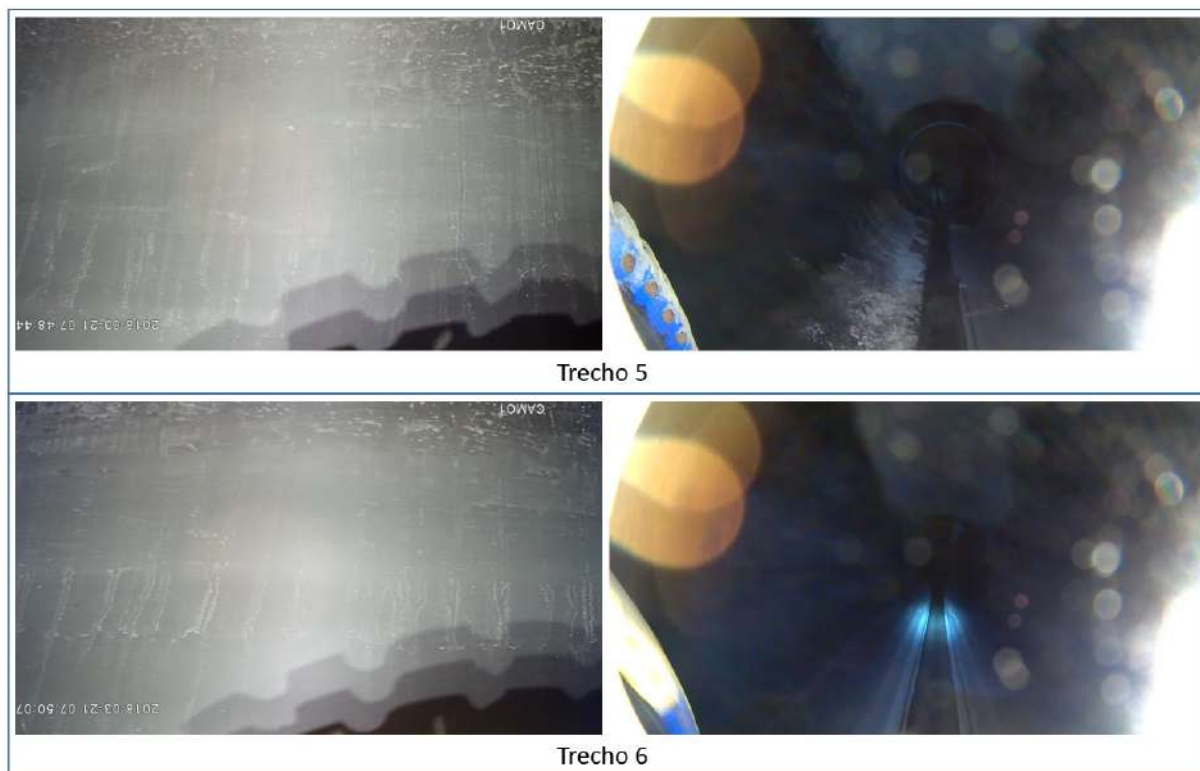
Figura 11 – Detalhes dos trechos 3 e 4.



Fonte: O Autor.

No trechos 3 e 4, registrados pela Figura 11, é possível identificar marcas verticais e horizontais ocasionadas por sujeira no interior do tubo, aparentemente não relacionadas a desgaste.

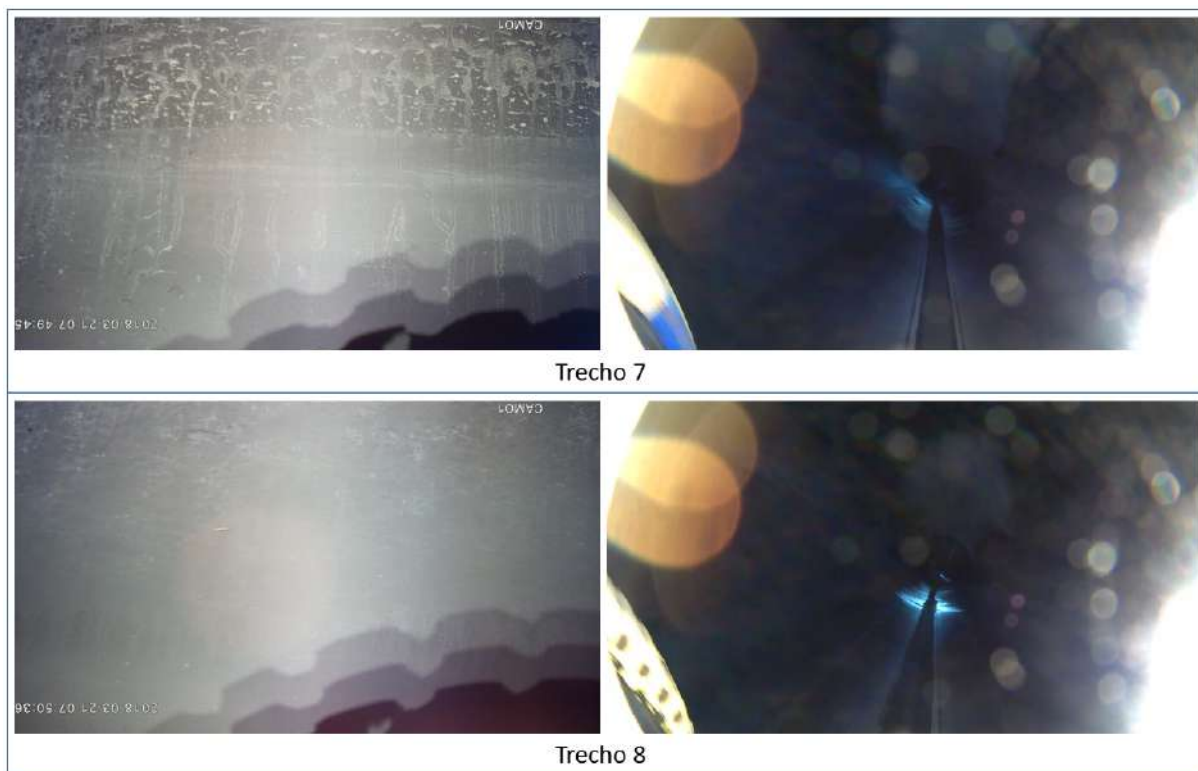
Figura 12 – Detalhes dos trechos 5 e 6.



Fonte: O Autor.

No trechos 5 e 6, registrados pela Figura 12, é possível identificar marcas ocasionadas por sujeira no interior do tubo, aparentemente não relacionadas a desgaste.

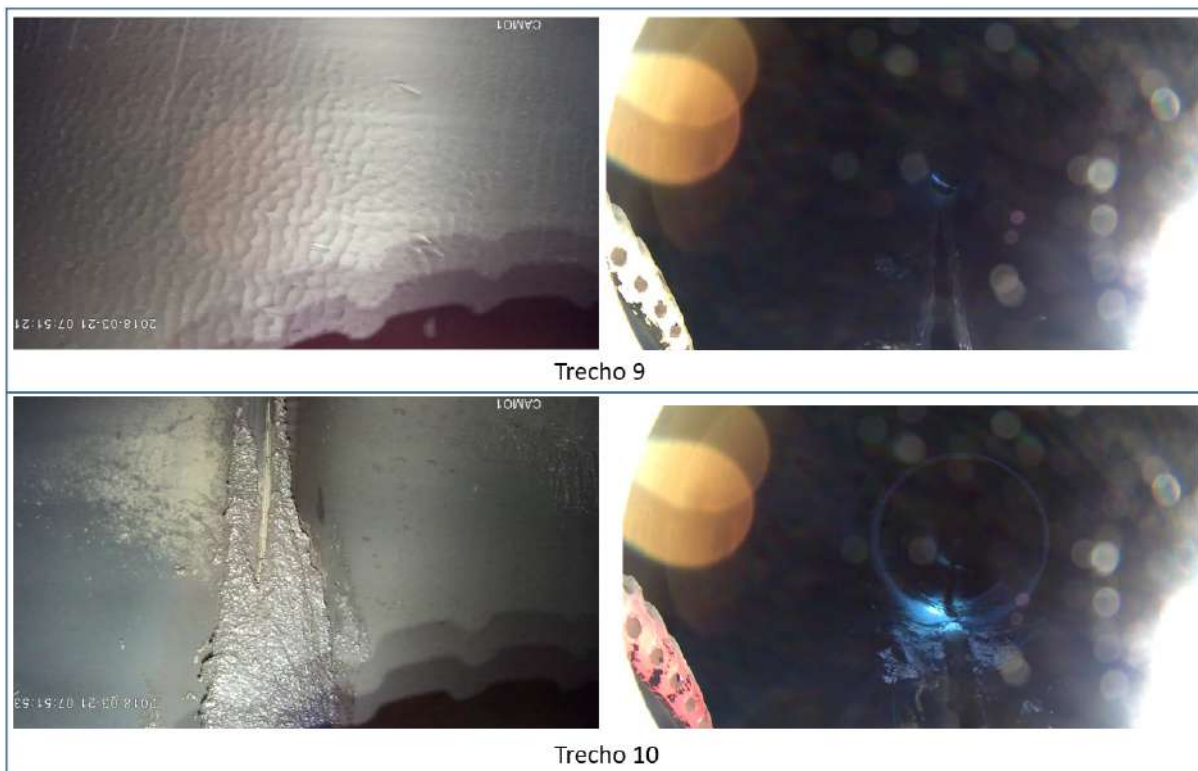
Figura 13 – Detalhes dos trechos 7 e 8.



Fonte: O Autor.

No trechos 7 e 8, registrados pela Figura 13, é possível identificar marcas ocasionadas por sujeira no interior do tubo, aparentemente não relacionadas a desgaste.

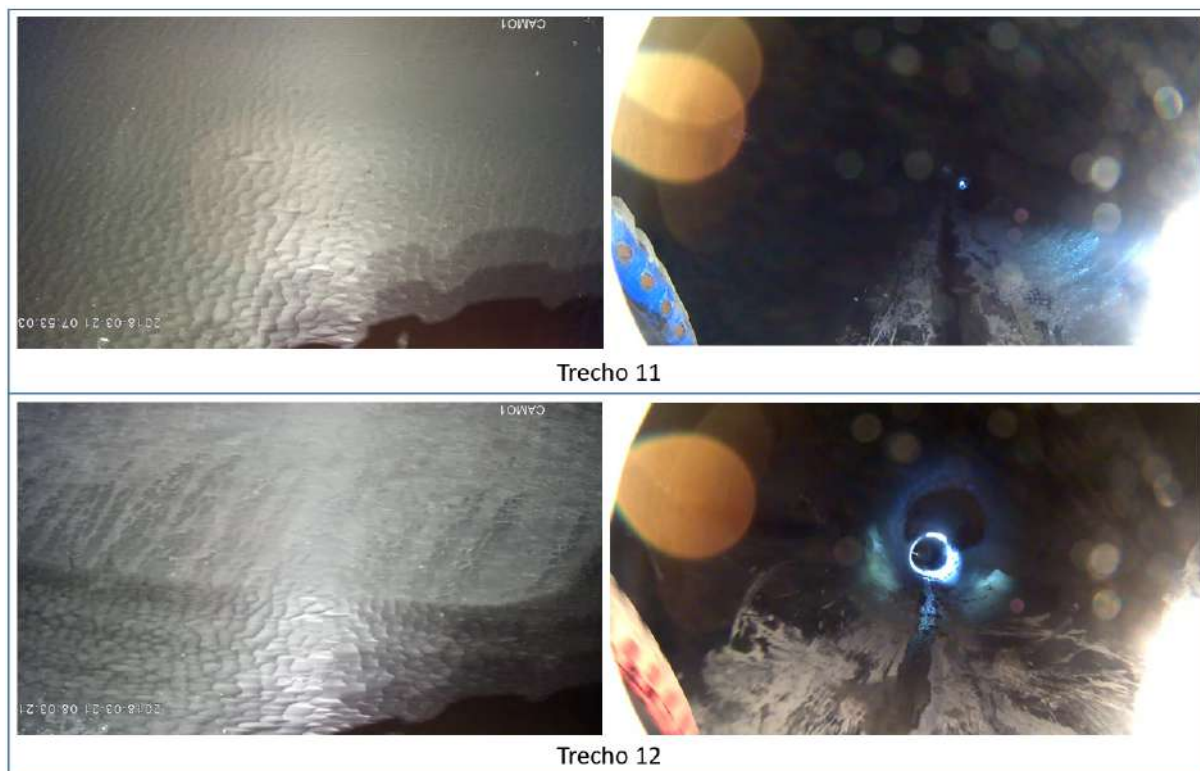
Figura 14 – Detalhes dos trechos 9 e 10.



Fonte: O Autor.

No trechos 9 e 10, registrados pela Figura 14, é possível identificar marcas de desgaste ocasionadas pelo escoamento do particulado contra o interior do duto, bem como um reparo realizado na solda entre dois trechos.

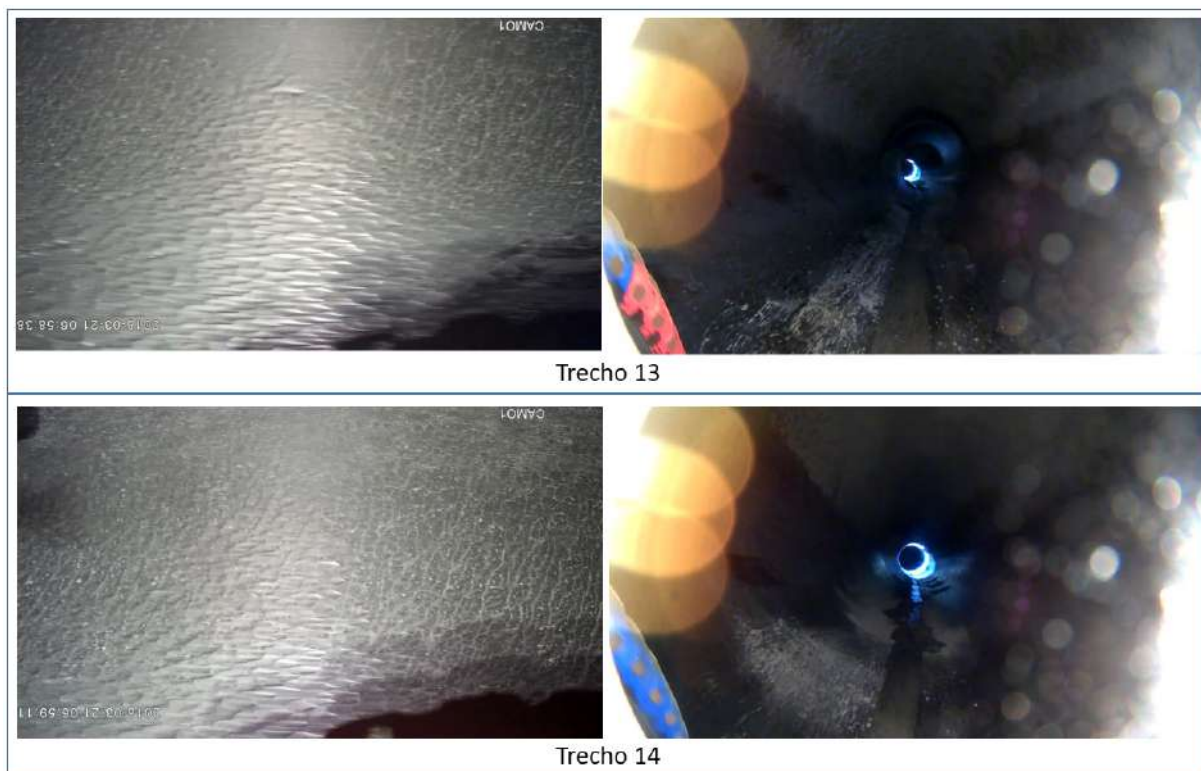
Figura 15 – Detalhes dos trechos 11 e 12.



Fonte: O Autor.

No trechos 11 e 12, registrados pela Figura 15, é possível identificar marcas mais profundas de desgaste pelo escoamento do particulado contra o interior do duto.

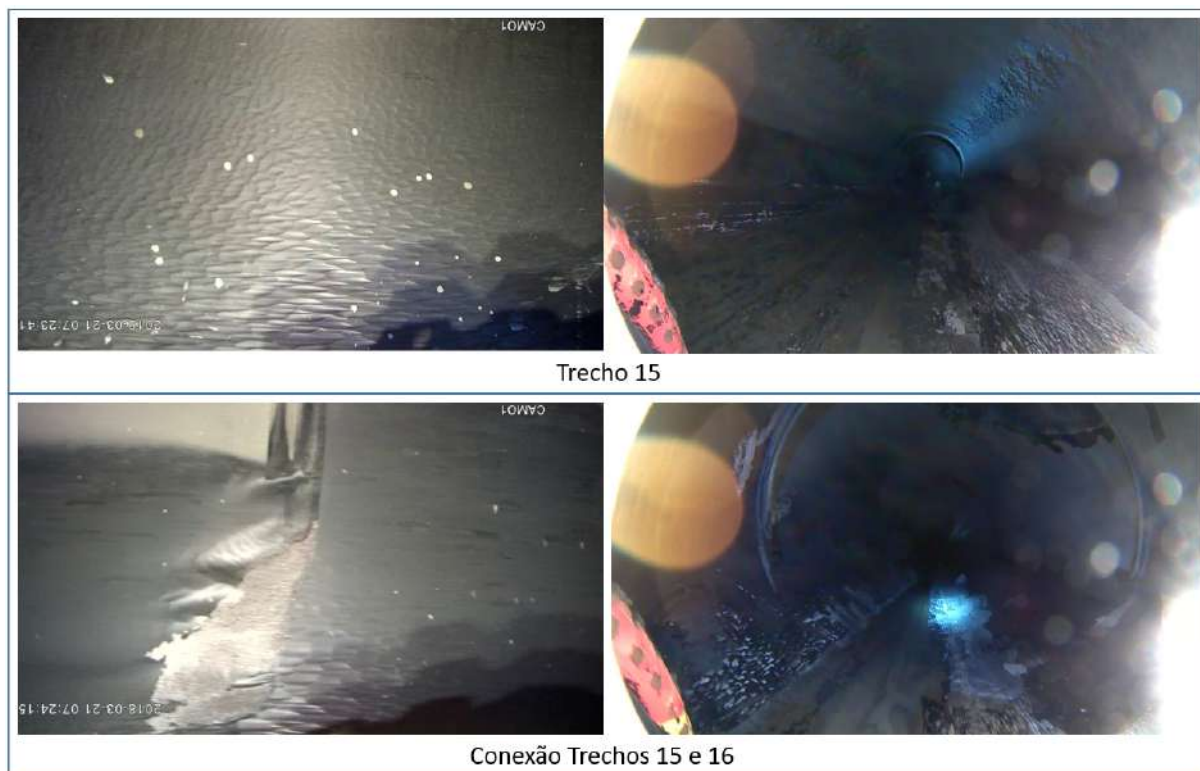
Figura 16 – Detalhes dos trechos 13 e 14.



Fonte: O Autor.

No trechos 13 e 14, registrados pela Figura 16, é possível identificar marcas ainda mais profundas de desgaste pelo escoamento do particulado contra o interior do duto.

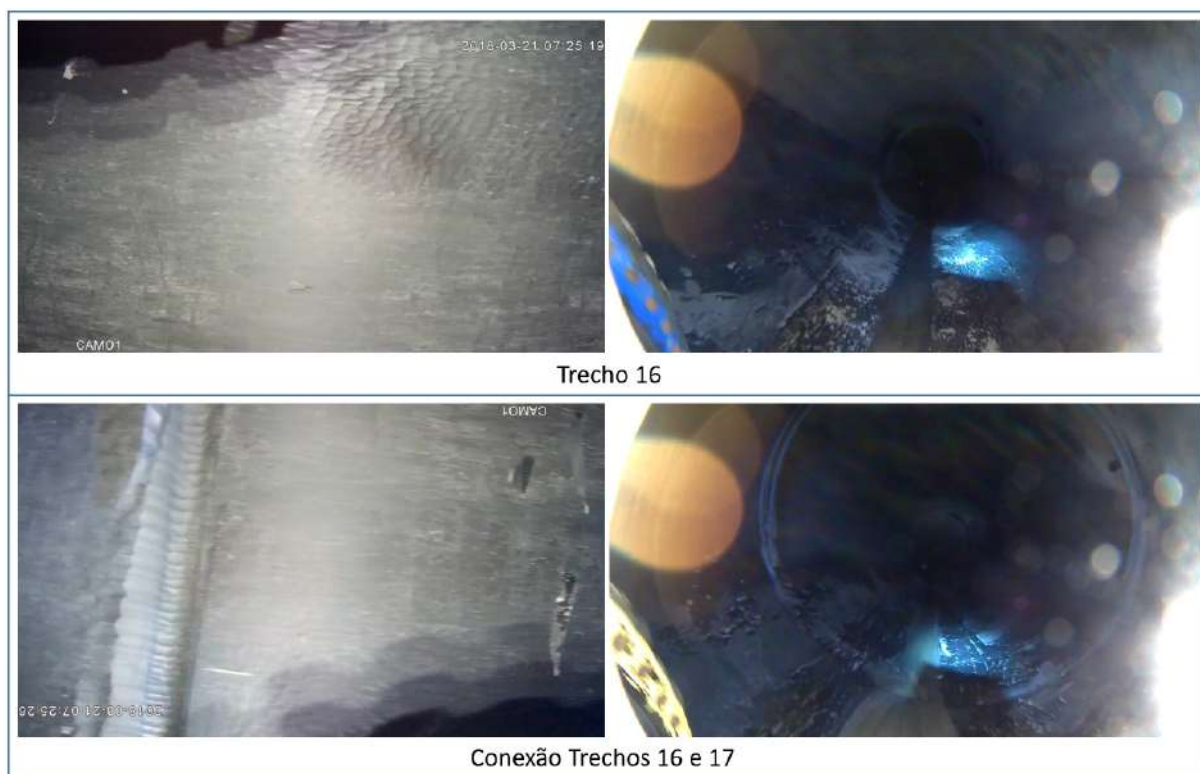
Figura 17 – Detalhes dos trechos 15 e 16.



Fonte: O Autor.

Nos trechos 15 e 16, registrados pela Figura 17, ainda é perceptível a presença de desgaste nos dutos e também na região de solda.

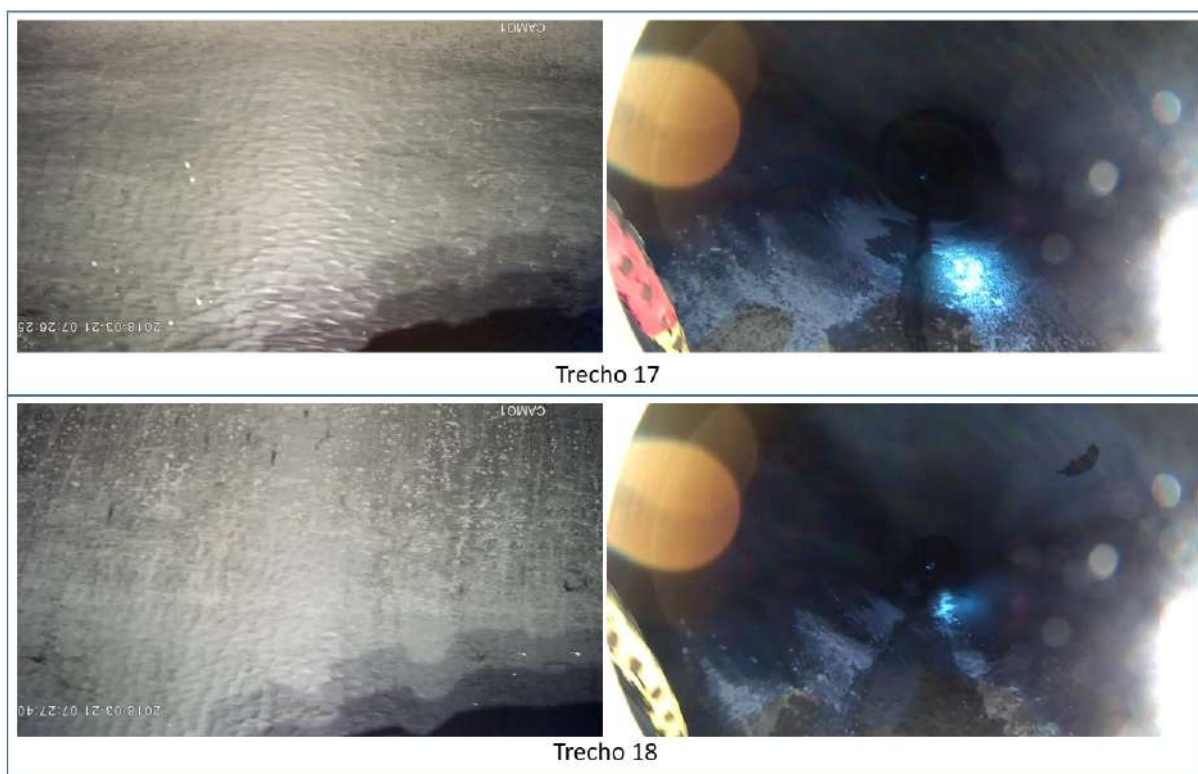
Figura 18 – Detalhes dos trechos 16 e 17.



Fonte: O Autor.

Nos trechos 16 e 17, registrados pela Figura 18, ainda é possível perceber a ocorrência de desgaste nos dutos e na região de solda.

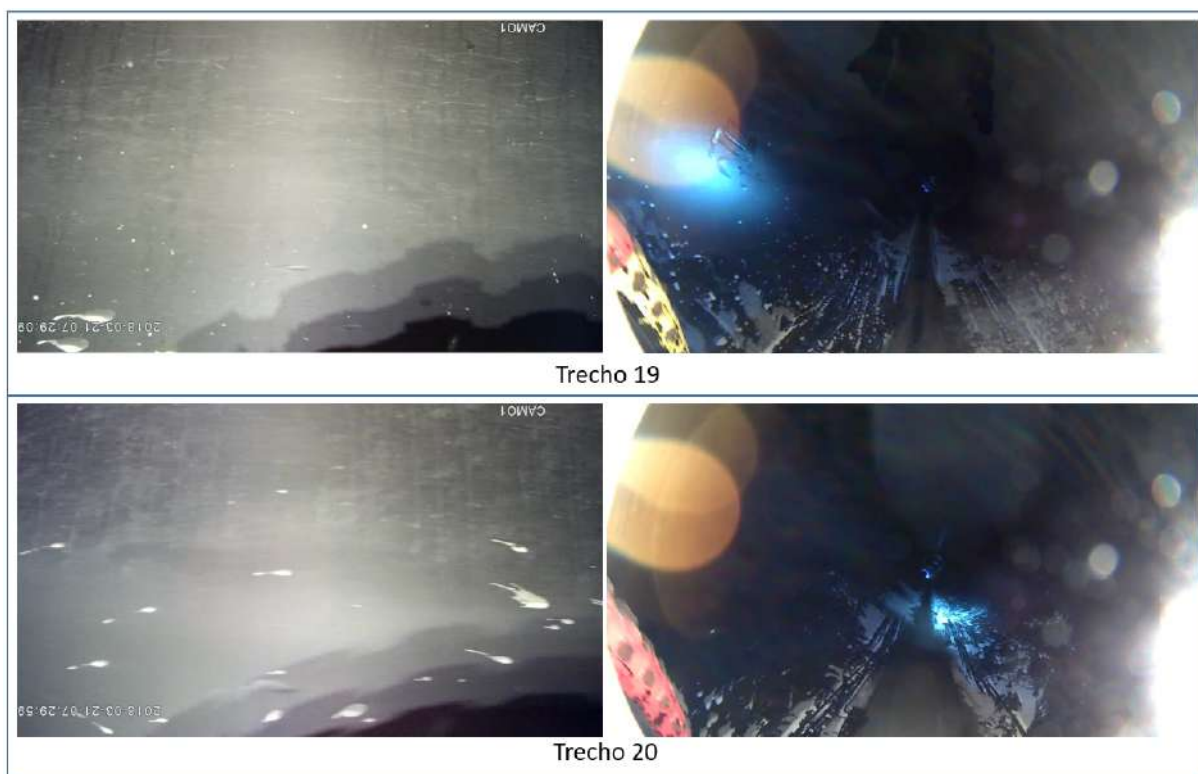
Figura 19 – Detalhes dos trechos 17 e 18.



Fonte: O Autor.

Nos trechos 17 e 18, registrados pela Figura 19, ainda é perceptível a ocorrência de desgaste nos dutos.

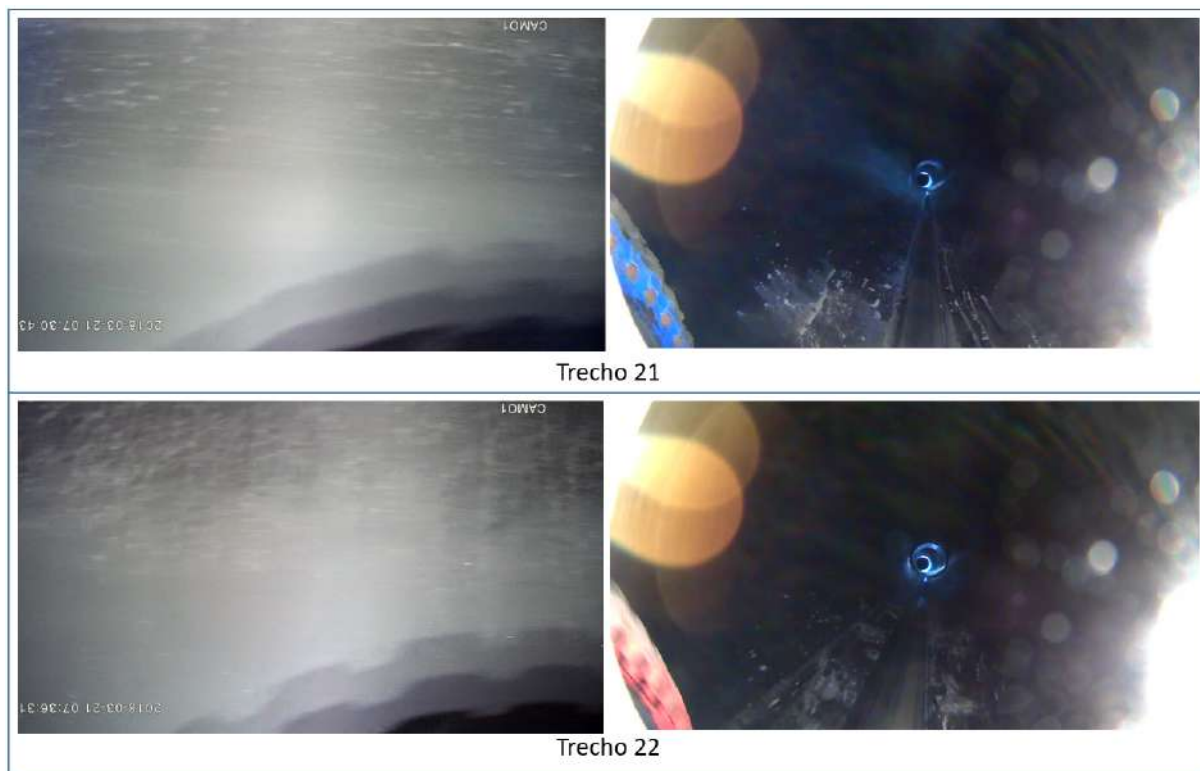
Figura 20 – Detalhes dos trechos 19 e 20.



Fonte: O Autor.

Nos trechos 19 e 20, registrados pela Figura 20, as marcas de desgaste são aparentemente menos intensas que nas regiões anteriores e as marcas de sujeira são mais evidentes.

Figura 21 – Detalhes dos trechos 21 e 22.



Fonte: O Autor.

Nos trechos 21 e 22, registrados pela Figura 21, são percebidas marcas tênues de sujeira.

Figura 22 – Detalhes dos trechos 23.



Fonte: O Autor.

No trecho 23, registrado pela Figura 22, não foram detectados depósitos de sujeira nem marcas de desgaste.

Como pode ser visto por meio da galeria de fotos, existem sinais claros de desgaste entre os trechos 9 e 18. Esses trechos foram localizados em campo, fazendo uso do vídeo transmitido pela plataforma robótica para a base de controle. A medida que o dispositivo

robótico avançava, os anéis de solda dos dutos foram contados, possibilitando relacionar a imagem visualizada com o trecho correspondente da tubulação .

A ação imediata foi utilizar um marcador industrial para sinalização em campo dos trechos comprometidos, como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Marcação dos trechos comprometidos da tubulação



Fonte: O Autor

Com a marcação dos dutos, foi possível observar que o trecho comprometido está localizado em uma região em que o terreno apresenta desnível. É possível perceber,

visualmente, que a intensidade do desgaste na parede dos tubos aumenta nas regiões mais baixas do declive, pontos onde a velocidade do fluido escoado é maior.

Os dados levantados por meio da inspeção, em conjunto com as características da infraestrutura observadas em campo, permitem sugerir a ocorrência de desgaste erosivo nas paredes dos tubos. Segundo Hutchings e Shipway (2017), o fenômeno de desgaste por erosão ocorre quando partículas sólidas discretas se chocam contra uma superfície, sendo que a intensidade do desgaste depende da quantidade e da massa das partículas individuais, bem como da velocidade de impacto.

Especificamente, a velocidade de impacto é uma variável que apresenta grande contribuição para o aumento do desgaste por erosão, como descrito pela Equação 4.1:

$$E = \frac{K_1 \rho U^n}{H} f_1(\theta) \quad (4.1)$$

Onde:

- E = razão entre massa de material removido da superfície e a massa das partículas erosivas;
- K_1 = Coeficiente de desgaste;
- ρ = Densidade do material do tubo;
- U = velocidade da partícula erosiva;
- H = Dureza do material do tubo;
- n = Expoente de velocidade que usualmente varia entre 2 e 2.5;
- $f_1(\theta)$ = Função de dependência angular.

A equação mostra que a erosão é proporcional a potência da velocidade ($E \propto U^n$), justificando as marcas mais intensas nos pontos de maior velocidade do material escoado, tornando o fenômeno apresentado uma potencial causa do problema em questão.

5 CONCLUSÃO

Este relatório apresentou os procedimentos e resultados da inspeção da tubulação de rejeitos da Usina de Salobo. O resultado da atividade foi um registro de fotos do interior da tubulação, no qual foi possível identificar os trechos com maior ocorrência de desgaste.

Também foi possível executar uma ação imediata, que consistiu na marcação em campo dos dutos aparentemente comprometidos. Essa ação teve o objetivo de alertar a equipe responsável pela manutenção desse segmento de tubulação e indicar necessidade de avaliações mais detalhadas, ou até mesmo substituição da estrutura.

A marcação imediata dos tubos só foi possível devido a transmissão de imagens em tempo de execução para a base de controle, e por meio da contagem do número de soldas, no qual pudemos relacionar o trecho em que o robô estava posicionado com a imagem visualizada.

Ao analisar a galeria de imagens, foi identificado que o segmento onde ocorre maior incidência de desgaste fica entre os trechos 9 e 18, especificamente localizados em uma região em que o terreno apresenta desnível, no qual o material escoado ganha velocidade.

Foi possível identificar marcas de desgaste nas uniões dos dutos (trechos 15, 16 e 17), especificamente localizados nos ressaltos, onde ocorre choque de partículas. Essas quinas podem ser resultado do processo de solda dos dutos, por meio da ocorrência de deslocamento relativo entre os trechos, diâmetros diferentes ou excesso de solda.

O conjunto de imagens presente nesse relatório contribuirá para que a equipe responsável pela manutenção identifique a causa principal do problema. Entretanto, para um diagnóstico mais efetivo do fenômeno, devem ser retiradas amostras de pelo menos duas posições da tubulação, com intensidades de desgaste distintas, e submetê-las a um exame de caracterização.

Apesar da característica do relatório ser informativa, servindo de apoio para que conclusões sejam tiradas por pessoa especialista em abrasividade e erosão, o fenômeno por trás do problema é aparentemente o desgaste erosivo, cuja intensidade aumenta com a velocidade do fluido. Uma sugestão seria a instalação de *loops* ao longo do trecho localizado na região de declive do terreno, a fim de reduzir a velocidade da polpa e, conseqüentemente, reduzir a intensidade do desgaste e aumentar a vida útil dos dutos. É importante ratificar que a sugestão acima só é válida caso o aumento de velocidade do material escoado seja identificado como causa principal do problema.

REFERÊNCIAS

COTA, Eduardo. **Infraestrutura de comando e controle para um dispositivo robótico remoto de inspeção e monitoramento de cavidades**. 2017. 82 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

COTA, Eduardo et al. Dispositivo de monitoramento remoto de cavidades - EspeleoRobô. **In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 8., 2017, Porto Alegre, RS. Anais...**, 2017. Porto Alegre, RS: XIII SBAI, 2017. p. 1759-1766.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2 ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2017.

ROCHA, Filipe Augusto Santos et al. Análise de mobilidade de um dispositivo robótico para inspeção remota de cavidades. **In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 8., 2017, Porto Alegre, RS. Anais...**, 2017. Porto Alegre, RS: XIII SBAI, 2017. p. 711-718.

VALE. **Conheça Salobo, o maior projeto de cobre da Vale**. 2015. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/conheca-salobo-maior-projeto-cobre-vale.aspx>>. Acesso em: 03 maio 2018.

6. 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 sensível, 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.

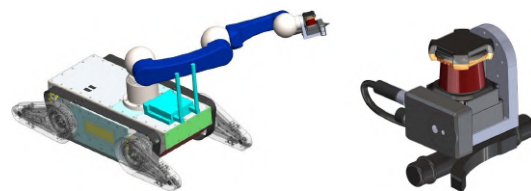
Para controlar o dispositivo proposto, foi desenvolvida uma estratégia de controle cinemático baseada em sua matriz jacobiana considerando seu corpo completo. A estratégia de controle foi va-

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 supracitados, 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.

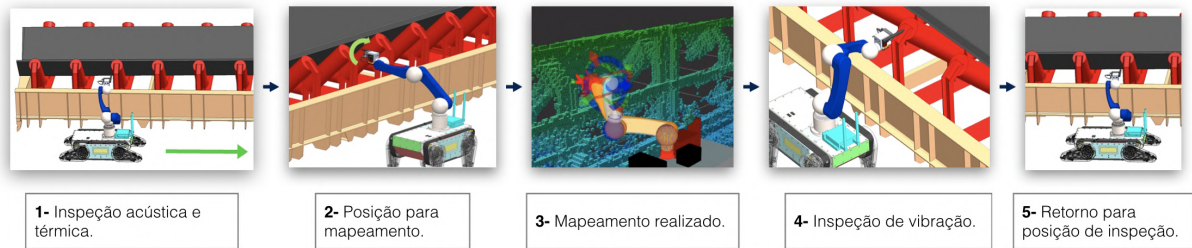


Figura 2: Fluxo proposto para inspeção de rolos.

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 traçado 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):

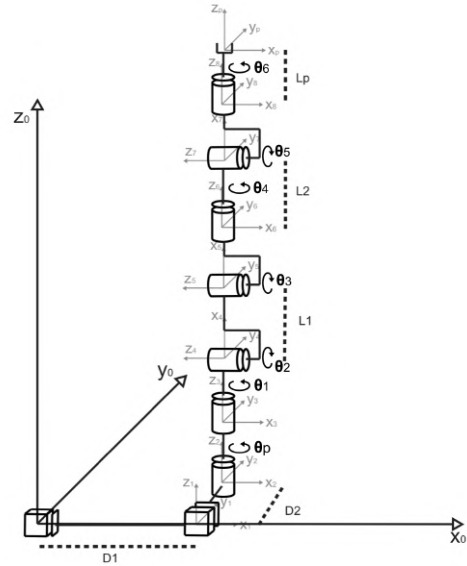


Figura 3: Esquemático do manipulador móvel simplificado.

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

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:

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

onde $\dot{\theta}_r$ e $\dot{\theta}_l$ representam a velocidade de rotação da esteira direita e esquerda, e $\dot{\theta}_{1...6}$ são as velocidades das juntas do braço.

Buscando usar a matriz Jacobiana (4) na Equação (3), é necessário realizar uma conversão de $\dot{\theta}_s$ para $\dot{\theta}$.

A cinemática diferencial da plataforma móvel é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos(\theta_p) & \frac{R}{2} \cos(\theta_p) \\ \frac{R}{2} \sin(\theta_p) & \frac{R}{2} \sin(\theta_p) \\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix}, \quad (7)$$

onde L é a distância entre as rodas e R é o raio das esteiras.

A relação entre $\dot{\theta}_s$ e $\dot{\theta}$ é obtida, então, pela matriz $M \in \mathbb{R}^{9 \times 8}$, como:

$$\dot{\theta}_s^{(9 \times 1)} = \overbrace{\begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos(\theta_p) & \frac{R}{2} \cos(\theta_p) & 0 & \dots & 0 \\ \frac{R}{2} \sin(\theta_p) & \frac{R}{2} \sin(\theta_p) & 0 & \dots & 0 \\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}}^M \dot{\theta}^{(8 \times 1)}. \quad (8)$$

Por fim, a cinemática diferencial de corpo completo do manipulador móvel é definida, em acordo com os oito graus efetivos de liberdade, por:

$$\dot{x}^{(6 \times 1)} = J_s(\theta)^{(6 \times 9)} M^{(9 \times 8)} \dot{\theta}^{(8 \times 1)} = J(\theta)^{(6 \times 8)} \dot{\theta}^{(8 \times 1)}. \quad (9)$$

4.3 Controle cinemático do manipulador móvel

O objetivo de controle é levar o efetuador da pose atual x_c para uma pose desejada variante no tempo $x_d(t)$:

$$x_c \rightarrow x_d(t), \quad e = x_d(t) - x_c \rightarrow 0, \quad (10)$$

onde e é o erro da pose do efetuador. O erro da posição é calculado como $e_p = p_d(t) - p$. Enquanto que o erro da orientação e_o utiliza da representação em *unit-quaternion* e é calculado como:

$$e_o = \Delta \epsilon = \eta(\theta) \epsilon_d - \eta_d \epsilon(\theta) - S(\epsilon_d) \epsilon(\theta), \quad (11)$$

onde η_d, ϵ_d representam a parte escalar e vetorial da orientação desejada, e S é o operador anti-simétrico (*skew-symmetric*).

Considerando o problema de cinemática diferencial onde a entrada de controle $u = \dot{\theta}$ e um sistema não redundante, isto é, onde $J(\theta)$ é uma matriz quadrada, é possível calcular as velocidades das juntas usando a inversa da matriz Jacobiana e uma lei de controle baseada em uma ação proporcional com *feed-forward*:

$$\dot{\theta} = u = J(\theta)^{-1}(\dot{x}_d + K e), \quad (12)$$

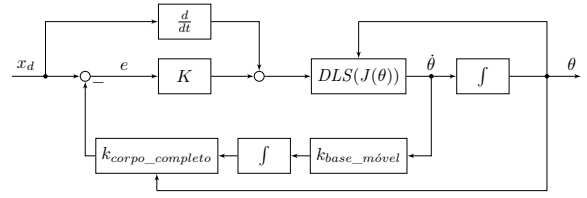


Figura 4: Diagrama de blocos do controle cinemático do sistema.

onde $K > 0$ é a matriz de ganho positivo definido. A dinâmica do erro da pose é governada por $\dot{e} + K e = 0$, e a escolha de $K > 0$ garante a estabilidade exponencial do equilíbrio $e = 0$.

Entretanto, a redundância existente no sistema leva a uma matriz Jacobiana não quadrada (Equação 9). Então, a simples inversão desta matriz não é possível. A abordagem convencional para superar esse problema é a utilização da pseudo-inversa. Porém, a pseudo-inversa apenas pode ser computada quando a matriz Jacobiana possuir posto completo, o que não é válido em configurações singulares. Logo, é utilizada a inversa *Damped Least-Squares* (DLS), proposta em (Nakamura and Hanafusa, 1986). A DLS é definida como:

$$DLS(J) = J^T (J J^T + \lambda I)^{-1}, \quad (13)$$

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

$$\lambda = \begin{cases} 0, & w \geq w_0 \\ \lambda_0 (1 - \frac{w}{w_0})^2, & w < w_0 \end{cases}, \quad (14)$$

onde $w = \sqrt{\det J(\theta) J^T(\theta)}$ é a manipulabilidade do sistema robótico, λ_0 define o comportamento da solução na vizinhança de uma singularidade e w_0 define os limites desta vizinhança.

A lei de controle final $u = \dot{\theta}$ para comandar as velocidades das juntas é dada por:

$$u = DLS(J(\theta))(\dot{x}_d + K e). \quad (15)$$

A Figura 4 ilustra o diagrama de blocos que representa o algoritmo de controle definido pela Equação (15). A função K_{base_movel} representa a cinemática diferencial para o manipulador móvel como definido na Equação (7). Então, a sua saída é integrada para calcular a cinemática direta em corpo completo do manipulador móvel ($K_{corpo_completo}$) e a pose do efetuador. O manipulador móvel é simplificado como um integrador simples partindo do preceito que as juntas do robô são capazes de responder a qualquer velocidade imposta.

4.4 Simulação do controle de corpo completo

A estratégia de controle cinemático proposta é validada por meio de simulações utilizando SIMU-

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 outra 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.

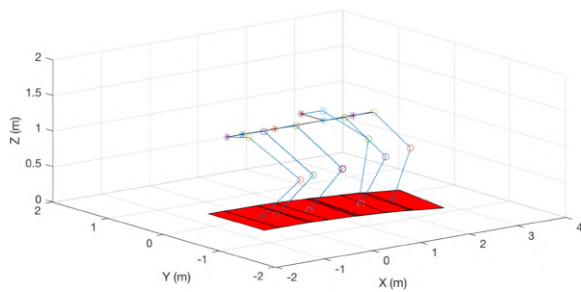


Figura 5: Simulação do sistema realizando uma rotina de inspeção.

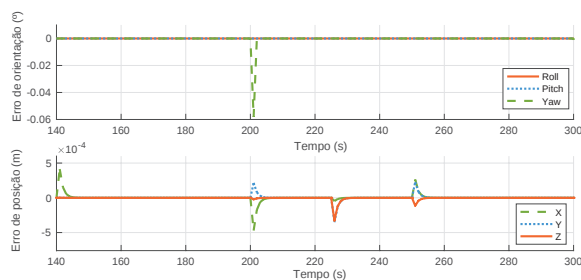


Figura 6: Erro obtido durante missão simulada.

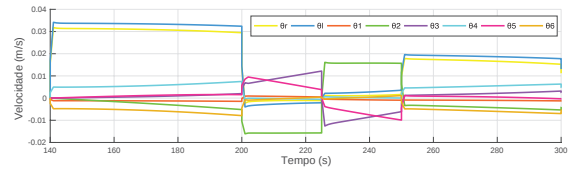


Figura 7: Velocidade das juntas para missão simulada.

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 do 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 efetuator 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 dos 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

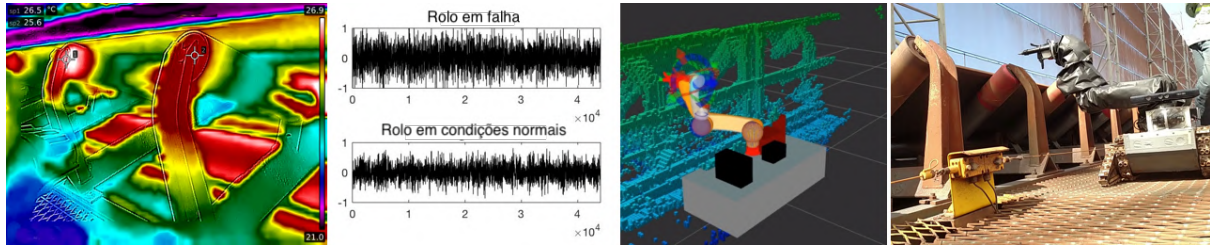


Figura 9: Dados obtidos durante um rotina de inspeção. A figura apresenta a imagem térmica e o gráfico da resposta acústica de um rolo; uma imagem da interface do *MoveIt!*, composta por um mapa tridimensional do TC; e a ponteira de toque se aproximando ao eixo de um rolo.

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., Sucan, 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.

7. 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 Espíúca 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- No05 / 2018	Versão 01
Classificação: () Confidential (X) Restrito () Internal use () Publico	

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

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 disso, 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).

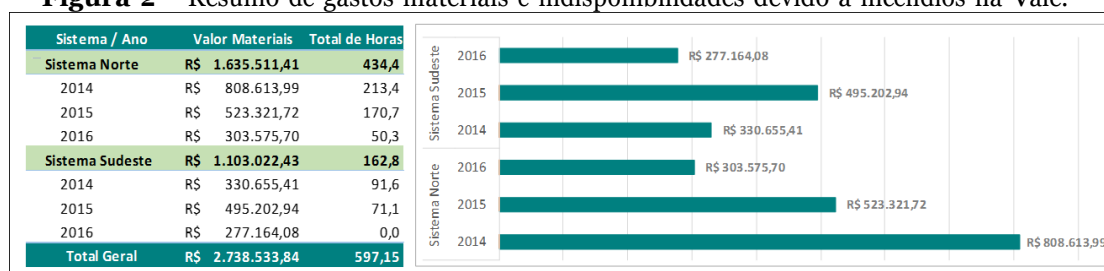
Alguns dos componentes do TC não representam desafios significativos de inspeção por já existirem tecnologias de monitoramento de condições consolidadas, caso do sistema de acionamento, ou por estarem agrupados em uma pequena região, caso dos raspadores e sistema de esticamento (LODEWIJKS et al., 2016). 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 sobreaquecimento. 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 sensível, 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 sensível, 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 μm 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 rodízios 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

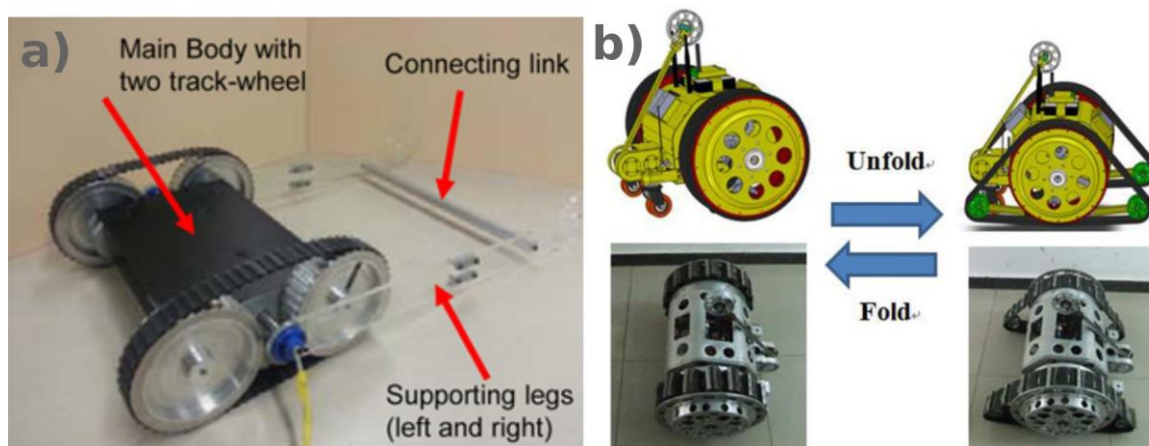
a realização de inspeção com um VANT multi-rotor, com sistema de navegação autônoma, que identifica as rotas e zonas de inspeção por meio de adesivos refletivos instalados no corpo do TC e em outras estruturas, permitindo orientação vertical e horizontal da rota. O VANT realiza a inspeção com uso de 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).

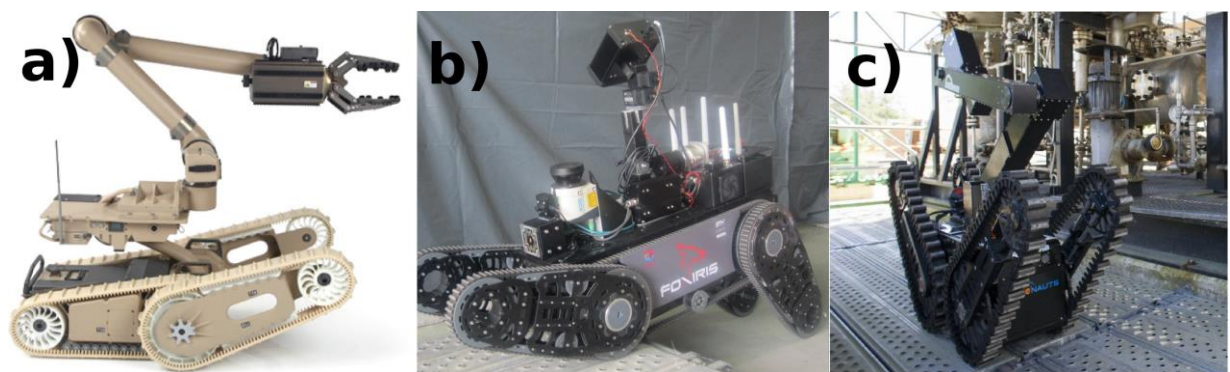
Analisando a literatura, diversos dispositivos robóticos concebidos visando a transposição de obstáculos podem ser encontrados.

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).

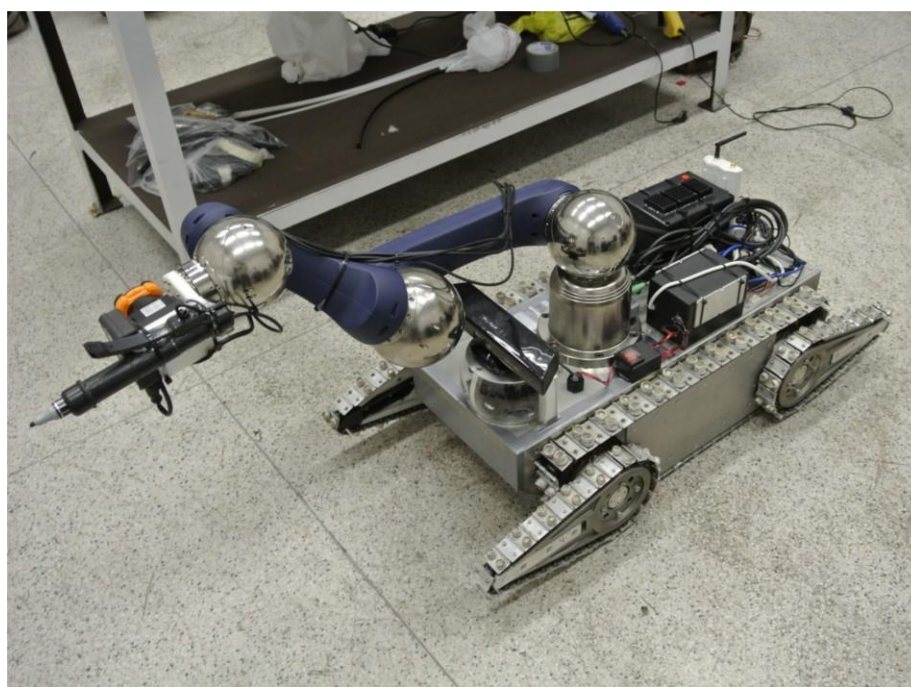
3 Teste de Conceito

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.

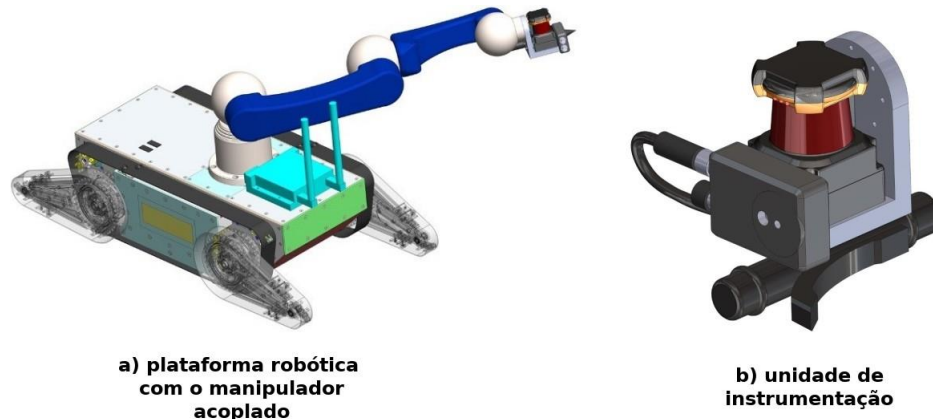
Figura 6 – Integração entre a plataforma móvel, braço manipulador e sensores.



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 efetuator 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.

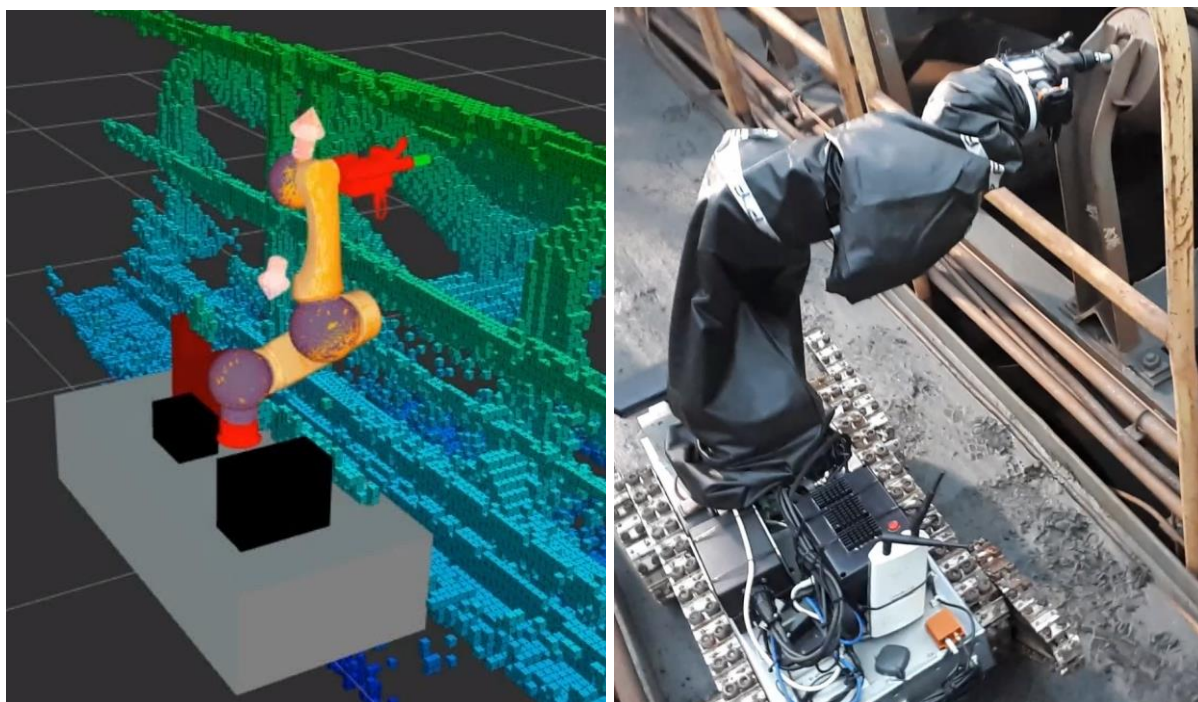
O MoveIt! é um pacote que incorpora diversos algoritmos para o planejamento de movimento, geração de trajetórias e monitoramento de ambiente, permitindo que estas técnicas sejam intuitivamente aplicadas a robôs fixos (manipuladores) e móveis. Foi então utilizada a biblioteca Open Motion Planning Library (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 as 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

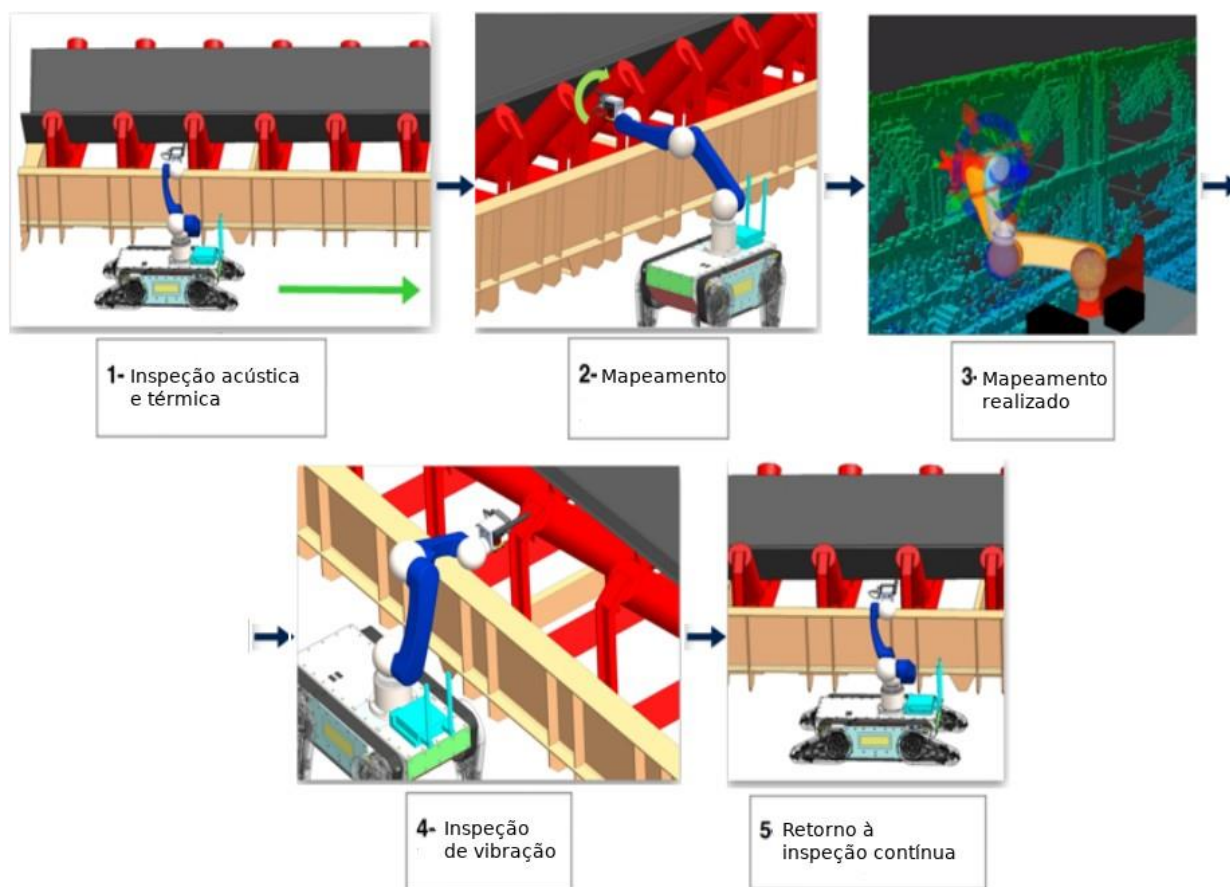
A primeira parte dos testes de campo visou avaliar a mobilidade do robô na região onde as inspeções acontecem. Foi requisitado ao dispositivo transpor diversos obstáculos, como escadas, trilhos de trem, trechos lamacentos e terrenos não estruturados (Figura 9).

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 'íngremes 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.

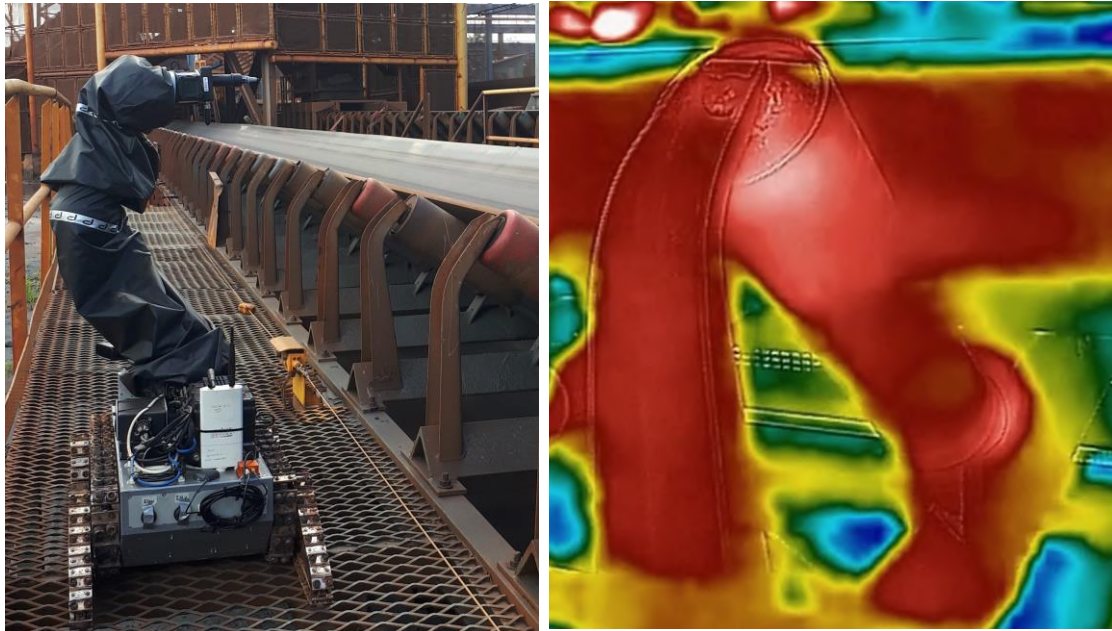
3.4 Inspeção dos TC

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.

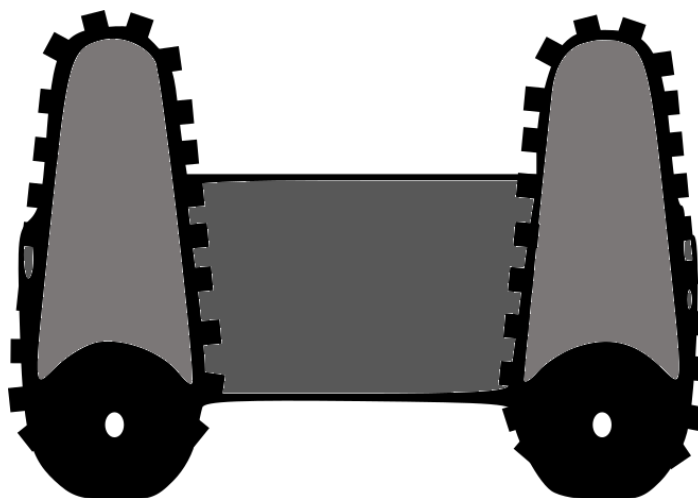
A velocidade de translação da plataforma (em torno de 0,3 m/s) é considerada abaixo da desejada para a finalidade em questão. Tendo em vista o exemplo citado no Capítulo 1, sobre a inspeção de 300 m de correia, o robô levaria cerca de 17 minutos para percorrer continuamente esta extensão, enquanto um 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, bolas 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.

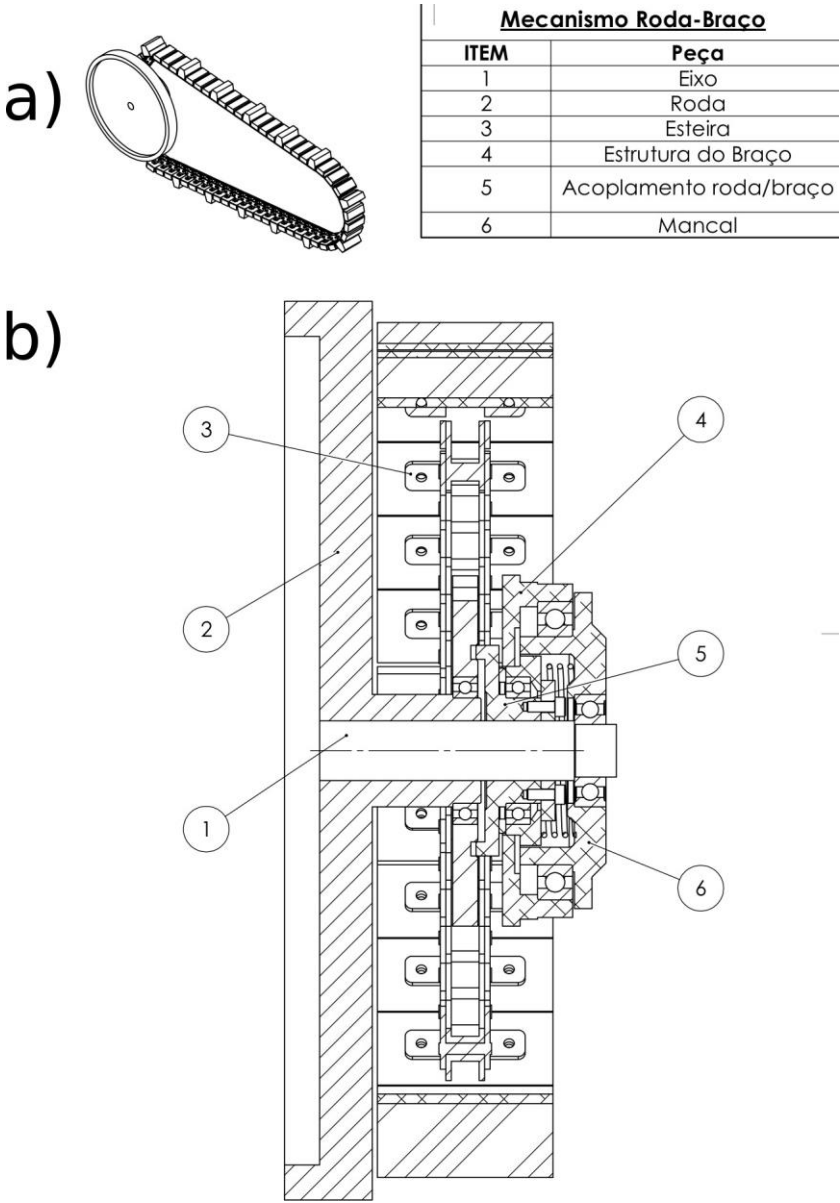
Em qualquer uma das duas situações, assume-se que o robô se comporta como um dispositivo *Skid-steering* (KOZŁOWSKI; PAZDERSKI, 2004). Mesmo não possuindo rodas esterçáveis, esta arquitetura permite que o veículo realize curvas explorando o derrapamento lateral dos mecanismos de locomoção (ROCHA; FREITAS;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

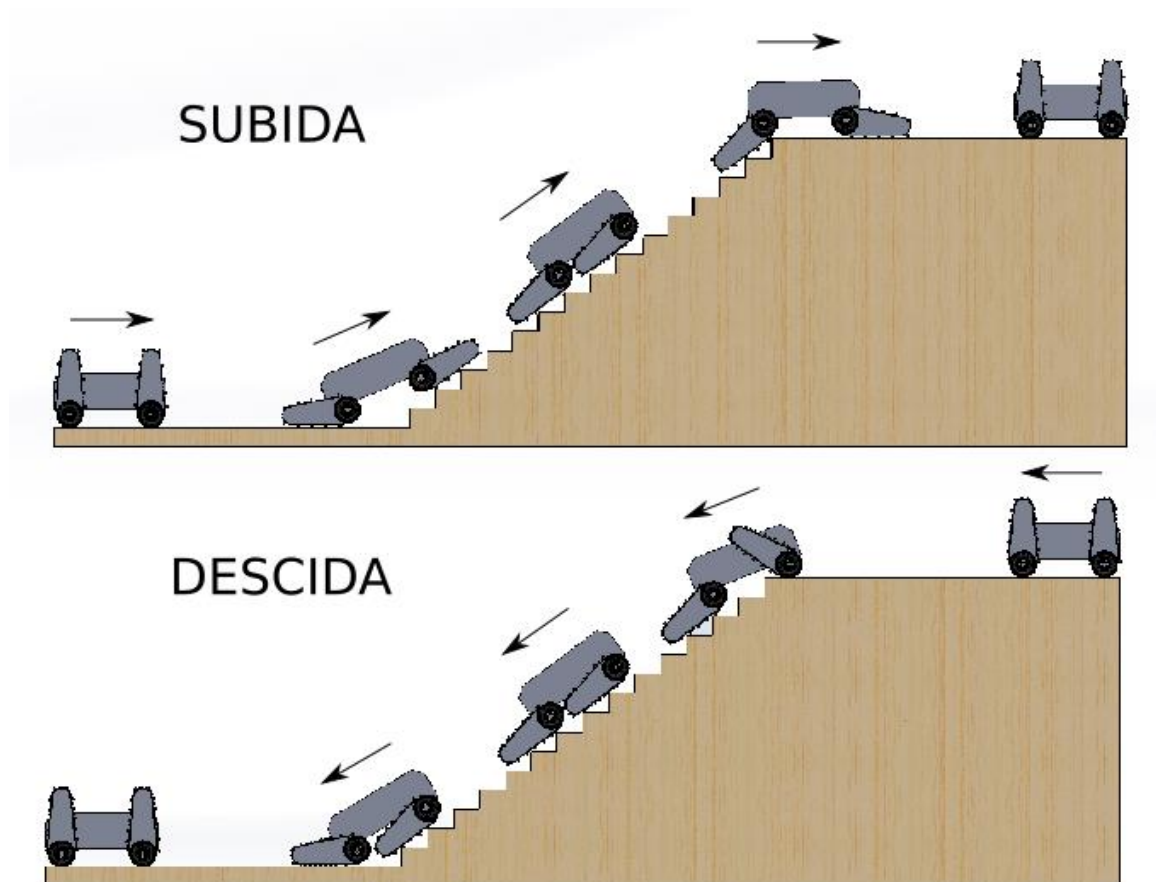


Fonte: do próprio autor.

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 (SOPOT), 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 4993912A 1989. 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. **Inspeção 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 Inspeção 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.

8. Conclusão

Nesta dissertação, foram abordados três diferentes temas relacionados à automação e robotização de processos de mineração.

Especificamente, foi abordada uma metodologia para robotização de um processo de manipulação de amostras de minério de ferro em um laboratório físico da empresa Vale S.A.. Algumas dificuldades foram encontradas devido à aquisição dos equipamentos em períodos diferentes, fazendo que os controladores das máquinas possuíssem protocolos de comunicação distintos. As alterações realizadas viabilizaram o sincronismo de tarefas e troca de informações entre os equipamentos. Houve, inclusive, um aumento significativo na performance do laboratório, com a integração de um segundo pulverizador e pela diminuição do trabalho manual no processo de amostragem.

Ainda neste mesmo tema, foi também apresentada uma proposta de sistema padronizado para integração de células robóticas baseado no framework ROS. Todos os testes foram realizados em laboratório, entretanto, utilizando equipamentos industriais e plantas didáticas com a mesma estrutura dos encontrados na aplicação real. O sistema ainda fornece um modelo mais flexível para as células por meio da aplicação de percepção 3D, podendo, por exemplo, detectar alterações de layout e correção de posicionamento do braço manipulador.

Para inspeções em espaços confinados, foram propostas melhorias em uma plataforma móvel previamente utilizada exclusivamente para inspeções em cavernas naturais. Métodos alternativos de locomoção foram abordados, como o uso de pernas, rodas e esteiras, que podem ser intercambiados dependendo da aplicação. Durante este projeto de pesquisa, a plataforma robótica foi praticamente reconstruída, com melhorias de hardware e software, visando dar maior robustez ao dispositivo e uma melhor experiência gráfica ao usuário.

Como aplicação prática na área operacional, foi realizada uma inspeção no interior da tubulação de rejeitos da Usina de Salobo, em Marabá-PA. O teste foi motivado pela ocorrência de vazamentos pontuais na tubulação. O registro fotográfico sugeriu a ocorrência de desgaste erosivo nas paredes do tubo, especificamente nas área de declive, onde o fluido escoava com maior velocidade. Apesar da característica informativa, a inspeção permitiu sugerir a implementação de loops nos trechos comprometidos, visando aumentar a vida útil da tubulação e evitar vazamentos com potencial de causar danos ambientais.

Finalmente, esta dissertação também aborda a modelagem e aplicação de uma plataforma robótica na atividade de inspeção de correias transportadoras. Um dispositivo do tipo EOD, normalmente utilizado para desarme de bombas, foi escolhido devido sua robustez e centro de gravidade mais baixo, visando superar os obstáculos presentes no ambiente industrial.

Como resultado, o dispositivo foi capaz de se locomover em terrenos lamacentos e cobertos por pelotas, transpor trilhos ferroviários, subir escadas e se deslocar pela mesma passarela onde os operadores realizam as inspeções. Os dados de temperatura, ruído e vibração também foram adquiridos com sucesso. O sistema possibilitará remover os operadores de áreas

insalubres e de risco, sem exigir a modificação da estrutura existente dos transportadores.

8.1. Contribuições da dissertação

As contribuições do trabalho estão descritas nas próximas subseções.

8.1.1. Integração entre ROS e Equipamentos Industriais

Uma contribuição importante dessa dissertação foi o desenvolvimento da plataforma de integração entre o ROS e equipamentos industriais, como PLCs e um manipulador robótico.

A plataforma ainda oferece maior flexibilidade para aplicação de algoritmos de alto nível nos processos industriais, como por exemplo, a aplicação de percepção 3D para detectar eventuais eventos fora do fluxo normal de operação.

8.1.2. Automação da célula de preparação de amostras de minério

Um produto importante da pesquisa abordada nessa dissertação foi a automação e robotização da célula de preparação de amostras do Laboratório Físico de Vargem Grande. As atividades colocaram o laboratório em patamares jamais atingidos de saúde, segurança e produtividade.

8.1.3. Capacitação de funcionários Vale

Durante o período da dissertação, foram ministrados 7 cursos de operação e manutenção de manipuladores robóticos industriais ABB e 1 curso de programação de controladores Siemens da família S7-300.

Os cursos foram ofertados com o objetivo de manter um quadro qualificado de profissionais para manutenção das células. No total, 36 profissionais foram treinados, gerando uma economia aproximada de R\$130.000,00.

8.1.4. Provas de conceito e validação de plataformas robóticas

O autor da dissertação teve contribuição direta e ativa na concepção da demanda, construção, desenvolvimento e aplicação de duas plataformas robóticas de inspeção em ambientes industriais.

Vários testes de campo foram realizados em diferentes setores e localidades. Como resultado, as plataformas móveis geraram uma série de publicações e dois pedidos de patente, conforme descrito na Subseção 8.1.5.

8.1.5. Publicações e apresentações

Durante o período de elaboração desta dissertação, além das publicações mencionadas nos capítulos anteriores, vários outros relatórios técnicos, artigos, pedidos de patente, resumos e apresentações foram elaborados visando contribuir tanto com a comunidade acadêmica, quanto com o setor produtivo de mineração.

Artigos Completos

- Teleoperation of an ABB IRB 120 Robotic Manipulator and BarrettHand BH8-282 Using a Geomagic Touch X Haptic Device and ROS (LIMA *et al.*, 2018).

Artigo oriundo da co-orientação da aluna de graduação Amanda Tonel Lima, publicado no 15th Latin American Robotics Symposium (2018), com os resultados de um trabalho teleoperação de um manipulador robótico industrial utilizando um dispositivo háptico.

- Robótica na Mineração (COTA *et al.*, 2017).

Artigo publicado e apresentado na ABM Week 2017, descrevendo o EspeleoRobô e demais dispositivos robóticos do Instituto Tecnológico Vale.

Resumos

- A Novel Robotic Inspection System for Belt Conveyor Idlers (GARCIA *et al.*, 2018).

Resumo expandido sobre o Robô de Inspeção de Transportadores de Correia, publicado e apresentado no IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2018) em Brisbane, Austrália, 2018.

- Espeleorobo: A novel method for caves and confined environment inspection (ROCHA *et al.*, 2018b).

Resumo sobre o EspeleoRobô publicado em Aachen International Mining Symposia - Mines of the Future, em Aachen, Alemanha, 2018.

- A novel robotic device for inspection of belt conveyor idler rolls (GARCIA *et al.*, 2018).

Resumo sobre o Robô de Inspeção de Correias publicado em Aachen International Mining Symposia - Mines of the Future, em Aachen, Alemanha, 2018.

- Current trends in Vale's mining robotics operations (COTA *et al.*, 2018).

Resumo sobre tendências atuais de dispositivos robóticos em operações de mineração

publicado em Aachen International Mining Symposia - Mines of the Future, em Aachen, Alemanha, 2018.

Pedidos de Patente

- Multi-terrain inspection robotic device and methods for configuring and guiding the same (FREITAS *et al.*, 2018).

Participação no pedido de patente do EspeleoRobô, depositado no Instituto Nacional da Propriedade Intelectual.

- Dispositivo robótico e método para inspeção de componentes de um transportador de correia (FREITAS *et al.*, 2018).

Participação no pedido de patente do Robô de Inspeção de Correias, depositado no Instituto Nacional da Propriedade Intelectual.

Relatórios Técnicos

- Estado da arte, teste de conceito e estudo técnico do dispositivo robótico para inspeção de rolos de correias transportadoras (ROCHA *et al.*, 2018a).

Relatório técnico sobre o Robô de Inspeção de Correias Transportadoras publicado pelo Instituto Tecnológico Vale.

- Experimentos de campo de detecção de sucata em Itabira (AZPURUA *et al.*, 2018).

Relatório técnico de campo de sobrevoo utilizando drone e magnetômetro para identificação de sucatas metálicas, publicado pelo Instituto Tecnológico Vale.

8.2. Sugestão de trabalhos futuros

O processo de manipulação de amostras de minério de ferro na célula robótica estudada se enquadra em um interessante problema de sequenciamento de tarefas chamado Flowshop Híbrido e Flexível.

Visando auxiliar os trabalhos futuros, foi inserido um estudo no Apêndice A contemplando um referencial teórico em problemas de sequenciamento de tarefas e técnicas de otimização. Posteriormente, o problema foi caracterizado na linguagem do sequenciamento, bem como as restrições do processo.

Como complemento, o desenvolvimento de um sistema capaz de oferecer o sequenciamento ótimo das amostras dentro da célula seria muito relevante. Foi também sugerido o uso de

algoritmos ILS e IGS devido a necessidade de re-otimização em intervalos curtos. Obviamente, outras abordagens são bem-vindas e um estudo comparativo com outras classes de algoritmos pode ser realizado.

Para as plataformas móveis, melhorias no hardware podem ser implementadas visando torná-las impermeáveis e aumentar o grau de proteção das mesmas. Ao mesmo tempo, a capacidade de sensoriamento pode ser ampliada.

Estudos exploratórios podem ser direcionados para o monitoramento acústico dos rolos de correias transportadoras. É sabido que rolamentos defeituosos emitem ruídos característicos, entretanto, a criação de uma assinatura confiável demanda uma base de dados extensa.

Por fim, ainda existe um campo extenso de oportunidades de aplicação de sistemas robóticos a ser explorado na cadeia da mineração. Seguindo na mesma linha dos sistemas de inspeção, porém com um conceito um pouco diferente, é possível citar os processos de inspeção de vagões de minério e locomotivas em ferrovias de carga pesada. As ferrovias de classe mundial possuem sistemas fixos de inspeção de defeitos e perfis de roda de vagões e locomotivas, onde imagens são adquiridas por câmeras de alta resolução e anomalias são detectadas por meio de algoritmos de tratamento de imagem.

Devido ao alto custo de implantação dessas soluções, alguns componentes menos críticos, porém não menos importantes, são deixados em segundo plano e sem detecção automática de defeitos. Esforços podem ser concentrados no desenvolvimento de algoritmos de inspeção automática de componentes de menor criticidade, mas que em longo prazo possam causar problemas em materiais rodantes. Este direcionamento iria, inclusive, contribuir para a diminuição da lacuna existente em pesquisas relacionadas a processos ferroviários no Brasil, onde somos, atualmente, importadores de tecnologia.

Referências Bibliográficas

- AZPURUA, H., TORRE, M. P., FERNANDES, E. Z., et al.. “EXPERIMENTOS DE CAMPO DE DETECCÃO DE SUCATA EM ITABIRA”. 2018. Relatório Técnico de Campo.
- BOMFIM, M. “Remanufatura de Manipuladores Robóticos Industriais Utilizando Arquitetura Aberta”. 2013.
- COTA, E., TORRE, M. P., FERREIRA, J., et al.. “Robótica na Mineração”, *Anais da ABM Week*, 2017.
- COTA, E., TORRE, M. P., FERREIRA, J. A. T., et al.. “Current trends in Vale’s mining robotics operations”. Em: *Abstracts of the First International Conference Mines of the Future*, 2018.
- DE OLIVEIRA, O. A. B. “Aspectos geológicos relacionados às cavernas no Quadrilátero Ferrífero-MG”. Em: *Congresso Brasileiro de Espeleologia*, v. 31, pp. 103–109, 2011.
- DE SIQUEIRA, E. C., DIANA, R. O. M., SOUZA, M. J. F., et al.. “A Study concerning the Application of Genetic Algorithms for solving the Multi-Objective Hybrid Flowshop Scheduling Problem”. Em: *Anais do XIII Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional*, pp. 301–312, Recife, 2016. SBC. Disponível em <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/eniac/2016/026.pdf>. Acessado em 01/05/2018.
- DE SOUZA, N. A. F. *Análise crítica de rotas de processamento de minérios de ferro itabiríticos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- DUDEK, R. A., PANWALKAR, S. S., SMITH, M. L. “The Lessons of Flowshop Scheduling Research”, *Operations Research*, v. 40, n. 1, pp. 7–13, 1992. doi: 10.1287/opre.40.1.7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/opre.40.1.7>>.
- FEO, T. A., RESENDE, M. G. C. “Greedy Randomized Adaptive Search Procedures”, *Journal of Global Optimization*, v. 6, n. 2, pp. 109–133, Mar 1995. ISSN: 1573-

2916. doi: 10.1007/BF01096763. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF01096763>>.

FRAMINAN, J. M., LEISTEN, R. “A multi-objective iterated greedy search for flowshop scheduling with makespan and flowtime criteria”, *OR Spectrum*, v. 30, n. 4, pp. 787–804, Oct 2008. ISSN: 1436-6304. doi: 10.1007/s00291-007-0098-z. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00291-007-0098-z>>.

FREITAS, G., TORRE, M. P. ; GARCIA, G., ROCHA, F. A. S., et al.. “DISPOSITIVO ROBÓTICO E MÉTODO PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES DE UM TRANSPORTADOR DE CORREIA”. 2018. BR1020180102133.

FREITAS, G. M., ROCHA, F. A. S., TORRE, M. P., et al.. “MULTI-TERRAIN INSPECTION ROBOTIC DEVICE AND METHODS FOR CONFIGURING AND GUIDING THE SAME”. 2018. BR2018050025.

GARCIA, G., TORRE, M. P., MONTEIRO, J. C. E., et al.. “A novel robotic device for inspection of belt conveyor idler rolls”. Em: *Abstracts of the First International Conference Mines of the Future*, 2018.

GARCIA, G. C., TORRE, M. P., MONTEIRO, J. C. E., et al.. “A Novel Robotic Inspection System for Belt Conveyor Idlers”. Em: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2018)*. IEEE, 2018.

GOES, M. A. C. D., POSSA, M. V., LUZ, A. B. D. “Amostragem de minérios”, 1991.

HAOUARI, M., M’HALLAH, R. “Heuristic algorithms for the two-stage hybrid flowshop problem”, *Operations Research Letters*, v. 21, n. 1, pp. 43 – 53, 1997. ISSN: 0167-6377. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-6377\(97\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6377(97)00004-7). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637797000047>>.

HENDERSON, J., SPENCER, J. “Autonomous vehicles and commercial real estate”, *Cornell Real Estate Review*, v. 14, n. 1, pp. 14, 2016.

JOHNSON, S. M. “Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included”, *Naval Research Logistics (NRL)*, v. 1, n. 1, pp. 61–68, 1954.

KAWAMURA, K., PACK, R. T., BISHAY, M., et al.. “Design philosophy for service robots”, *Robotics and Autonomous Systems*, v. 18, n. 1-2, pp. 109–116, 1996.

KWON, Y.-S., YI, B.-J. “Design and motion planning of a two-module collaborative indoor pipeline inspection robot”, *IEEE Transactions on Robotics*, v. 28, n. 3, pp. 681–696, 2012.

- LIMA, A. T., ROCHA, F. A. S., TORRE, M. P., et al.. “Teleoperation of an ABB IRB 120 Robotic Manipulator and BarrettHand BH8-282 Using a Geomagic Touch X Haptic Device and ROS”. Em: *2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pp. 188–193. IEEE, 2018.
- LIN, H.-T., LIAO, C.-J. “A case study in a two-stage hybrid flow shop with setup time and dedicated machines”, *International Journal of Production Economics*, v. 86, n. 2, pp. 133 – 143, 2003. ISSN: 0925-5273. doi: [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00011-2). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527303000112>>.
- LINN, R., ZHANG, W. “Hybrid flow shop scheduling: A survey”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 37, n. 1, pp. 57 – 61, 1999. ISSN: 0360-8352. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00023-6). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835299000236>>. Proceedings of the 24th international conference on computers and industrial engineering.
- LOTT, G., GADELHA, F., EUZÉBIO, T. “Method for Dynamically Adjusting the Parameters of an Iron Ore Mill in a Chemical Analysis Laboratory”, *Proceedings of the 6th International Congress on Automation in Mining*, pp. 326–334, 2018.
- LOURENÇO, H. R., MARTIN, O. C., STÜTZLE, T. “Iterated Local Search”. Em: Glover, F., Kochenberger, G. A. (Eds.), *Handbook of Metaheuristics*, pp. 320–353, Boston, MA, Springer US, 2003. ISBN: 978-0-306-48056-0. doi: 10.1007/0-306-48056-5_11. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/0-306-48056-5_11>.
- MCKAY, K., PINEDO, M., WEBSTER, S. “Practice-focused research issues for scheduling systems”, *Production and Operations Management*, v. 11, n. 2, pp. 249–258, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2002.tb00494.x>>.
- MESQUITA, P. P. D., CARVALHO, P. S. L. D., OGANDO, L. D. “Desenvolvimento e inovação em mineração e metais”, 2016.
- MOREIRA, N. E. B., DE SOUZA, S. R., DE FRANÇA FILHO, M. F. “Minimização do makespan em Flowshop Híbrido e Flexível com tempo de setup dependente da sequência”. Em: *XX Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 4286–4293, Belo Horizonte, MG, 2014. Disponível em <http://www.swge.inf.br/cba2014/anais/PDF/1569935713.pdf>, acesso em 01/05/2018.
- NADERI, B., RUIZ, R. “The distributed permutation flowshop scheduling problem”, *Computers & Operations Research*, v. 37, n. 4, pp. 754 – 768, 2010. ISSN: 0305-

0548. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.06.019>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054809001786>>.
- NADERI, B., RUIZ, R., ZANDIEH, M. “Algorithms for a realistic variant of flowshop scheduling”, *Computers & Operations Research*, v. 37, n. 2, pp. 236 – 246, 2010. ISSN: 0305-0548. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.04.017>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054809001221>>.
- OH, J.-K., JANG, G., OH, S., et al.. “Bridge inspection robot system with machine vision”, *Automation in Construction*, v. 18, n. 7, pp. 929–941, 2009.
- PAN, Z., POLDEN, J., LARKIN, N., et al.. “Recent progress on programming methods for industrial robots”. Em: *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, pp. 1–8. VDE, 2010.
- PINEDO, M. L. *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Springer, 2016.
- ROCHA, F. A. S., FREITAS, G., TORRE, M. P., et al.. “ESTADO DA ARTE, TESTE DE CONCEITO E ESTUDO TÉCNICO DO DISPOSITIVO ROBÓTICO PARA A INSPEÇÃO DE ROLOS DE CORREIAS TRANSPORTADORAS”. 2018a. Relatório Técnico de Campo.
- ROCHA, F. A. S., TORRE, M. P. ; GARCIA, G., COTA, E., et al.. “Espeleorobo: A novel method for caves and confined environment inspection”. Em: *Abstracts of the First International Conference Mines of the Future*, 2018b.
- RUIZ, R., MAROTO, C. “A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics”, *European Journal of Operational Research*, v. 165, n. 2, pp. 479 – 494, 2005. ISSN: 0377-2217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.017>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221704002553>>. Project Management and Scheduling.
- RUIZ, R., MAROTO, C. “A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility”, *European Journal of Operational Research*, v. 169, n. 3, pp. 781 – 800, 2006. ISSN: 0377-2217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.038>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221705001451>>.
- RUIZ, R., ŞERİFOĞLU, F. S., URLINGS, T. “Modeling realistic hybrid flexible flowshop scheduling problems”, *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 4, pp. 1151 – 1175, 2008. ISSN: 0305-0548. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.07.014>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054806001560>>.

- SHUKLA, A., KARKI, H. “Application of robotics in offshore oil and gas industry— A review Part II”, *Robotics and Autonomous Systems*, v. 75, pp. 508 – 524, 2016. ISSN: 0921-8890. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.09.013>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889015002018>>.
- YUSOF, A. A., SAADUN, M. N. A., SULAIMAN, H., et al.. “Modern practical application and research on teleoperated excavators control, feedback and perception issues in post disaster recovery operation”. Em: *2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*, pp. 179–185. IEEE, 2015.

Apêndice A: Modelagem do problema de sequenciamento da Célula Robótica

Neste capítulo, será brevemente introduzido o conceito de sequenciamento de tarefas e apresentado o modelo do problema de otimização no qual a célula robótica se enquadra.

.1. Sequenciamento de tarefas

Os problemas de sequenciamento tratam da alocação de recursos para tarefas em máquinas, respeitando certos períodos de tempo, envolvendo a otimização de um ou mais objetivos. Em todos os problemas de sequenciamento considerados, o número de tarefas e o número de máquinas são assumidamente finitos. Como notação, o número de tarefas é denotado por n e, o número de máquinas, por m . Se uma tarefa é constituída por um certo número de estágios, então o par (i,j) se refere ao estágio da tarefa j na máquina i Pinedo (2016).

Outros parâmetros com suas devidas notações, envolvendo a relação entre tarefas e máquinas, são descritos a seguir de acordo com Pinedo (2016):

- **Tempo de processamento** (p_{ij}): tempo de processamento da tarefa j na máquina i . O índice i pode ser omitido se o tempo de processamento da tarefa j não depende da máquina ou se a tarefa j só pode ser processada em uma determinada máquina.
- **Data de entrada** (r_j): data na qual a tarefa j entra no sistema e se encontra disponível para iniciar seu processamento.
- **Data de vencimento** (d_j): data na qual a tarefa j deve ser entregue, ou seja, a data de entrega prometida ao cliente.
- **Peso** (w_j): fator de prioridade que denota a importância da tarefa j em relação às outras. Pode representar, por exemplo, o custo atual para manter a tarefa no sistema.

De acordo com de Siqueira *et al.* (2016), os problemas de sequenciamento de tarefas podem ser descritos por uma tripla $\alpha | \beta | \gamma$, em que:

- α : parâmetro que descreve o ambiente de máquinas, possuindo apenas uma entrada.

- β : fornece detalhes sobre as características e restrições de processamento, podendo conter nenhuma, única ou múltiplas entradas.
- γ : descreve o objetivo a ser otimizado, podendo conter uma (mono-objetivo) ou mais de uma (multi-objetivo) entrada.

Ainda segundo Pinedo (2016), as definições e notações para alguns ambientes de máquina (α) são:

- **Máquina única (1)**: Têm-se apenas uma máquina para processar as tarefas, caracterizando-o como o problema mais simples entre os ambientes de máquina;
- **Máquinas idênticas em paralelo (P_m)**: ambiente com m máquinas paralelas idênticas. O tempo de processamento de uma tarefa j é idêntico em todas as máquinas;
- **Máquinas uniformes em paralelo (Q_m)**: ambiente com m máquinas paralelas que possuem velocidades de processamento diferentes, nas quais qualquer tarefa j alocada na máquina i é processada na mesma velocidade. A velocidade de processamento da máquina i é denotado por v_i . Logo, o tempo p_{ij} em que a tarefa j é processada na máquina i é dado por p_j/v_i ;
- **Máquinas em paralelo não relacionadas (R_m)**: ambiente com m máquinas independentes em paralelo, nas quais a velocidade de processamento de uma tarefa j é diferente para cada máquina i . A máquina i pode processar a tarefa j com velocidade v_{ij} . Logo, o tempo p_{ij} em que a tarefa j é processada na máquina i é dado por p_j/v_{ij} ;
- **Flow shop (F_m)**: existem m máquinas em série, nas quais cada tarefa deve ser processada em cada uma das m máquinas e seguir o mesmo fluxo. Logo, após ser processada pela máquina 1, a tarefa deve seguir para a máquina 2, e assim sucessivamente, até ser processada pela máquina m ;
- **Flow shop flexível (FF_c)**: É uma generalização do *flow shop* e do ambiente de máquinas paralelas. Em vez de m máquinas em série, existem c estágios em série com determinado número de máquinas idênticas em paralelo. Logo, após ser processada pelo estágio 1, a tarefa deve seguir para o estágio 2, e assim sucessivamente, até ser processada pelo estágio c . Em cada estágio, a tarefa j pode ser processada por qualquer máquina m e apenas uma delas pode fazê-lo;
- **Job shop (J_m)**: existem m máquinas nas quais cada tarefa possui seu próprio fluxo pré-determinado;
- **Job shop flexível (FJ_c)**: É uma generalização do *job shop* e do ambiente de máquinas paralelas. Em vez de m máquinas em série, existem c centros de trabalho com determinado número de máquinas idênticas em paralelo. Cada tarefa possui sua própria rota

pré-definida. Em cada centro de trabalho, a tarefa j pode ser processada por apenas uma máquina e qualquer uma delas pode fazê-lo;

- **Open shop (O_m):** existem m máquinas nas quais cada tarefa pode ser processada em qualquer sequência, sem restrições com relação à ordem de operação das mesmas.

Em relação às restrições do problema de sequenciamento (β), as características mais comuns e suas respectivas notações são:

- **Data de entrada (r_j):** quando presente no campo de restrição, a tarefa j não pode iniciar seu processamento antes da data de entrada r_j ;
- **Precedência ($prec$):** informa que uma ou mais tarefas devem ser completadas antes do início de processamento de outra tarefa. Existem alguns casos especiais de restrição de precedência; se cada tarefa possuir, no máximo, um antecessor e um sucessor, as restrições são chamadas de cadeia. Nos outros casos, se as tarefas possuírem apenas um sucessor, as restrições são chamadas de *intree*. Caso possuam apenas um antecessor, as restrições são chamadas *outtree*;
- **Tempos de setup dependentes da sequência (S_{jk}):** O termo S_{jk} representa o tempo de setup necessário entre as tarefas j e k . Se o tempo de setup entre as tarefas depende da máquina, então o índice i precisa ser incluído e a notação muda para S_{ijk} ;
- **Elegibilidade de máquinas (M_j):** é o conjunto que indica quais máquinas são capazes de executar a tarefa j ;
- **Permutação ($prmu$):** restrição que mantém a ordem de passagem das tarefas, no primeiro estágio, em todos os outros estágios (sistema FIFO);
- **No-wait (nwt):** restrição que impõe a condição de que a tarefa j , quando iniciada, não pode esperar para ser processada entre duas máquinas consecutivas. Essa restrição retarda o início de processamento da tarefa para garantir que a mesma flua sem esperar por alguma máquina no ambiente de produção.

As funções objetivo usualmente contidas no campo γ são:

- **Minimização do Makespan ($C_{\max}$):** O *makespan* é o tempo em que a última tarefa é completada, sendo definido como $\max(C_1, \dots, C_n)$;
- **Minimização do maior Lateness ($L_{\max}$):** O maior *lateness* é o tempo que mede a pior violação da data de entrega (maior tempo de atraso), sendo definido como $\max(L_1, \dots, L_n)$, onde:
 - $L_j = C_j - d_j$, sendo C_j o instante em que a tarefa j é concluída e d_j a data em que a tarefa deve ser entregue.

É importante observar que um valor positivo de L_j indica que a tarefa foi entregue depois do prazo, e valores negativos mostram que a tarefa foi entregue com antecedência;

- **Minimização do *Tardiness* (T_j):** o conceito de *tardiness* é semelhante ao de *lateness*. A principal diferença é que o *tardiness* nunca assume valores negativos, sendo definido por $T_j = \max(L_j, 0)$;
- **Minimização do somatório ponderado do *Tardiness* ($\sum w_j T_j$):** no caso do somatório ponderado do *tardiness*, um peso w_j é atribuído a cada tarefa atrasada, de acordo com a sua importância.

Segundo Ruiz *et al.* (2008), o primeiro estudo em relação ao sequenciamento de tarefas surgiu na década de 50 com um artigo publicado por Johnson (1954), e desde então diversos aspectos e variações do problema vêm despertando o interesse da comunidade científica. Entretanto, os autores afirmam que sempre existiu um distanciamento entre a teoria e a aplicação prática de sequenciamento.

O trabalho de Dudek *et al.* (1992) critica a falta de artigos de sequenciamento na literatura com aplicações industriais, sendo que os problemas usualmente abordados não existem no mundo real ou apresentam restrições não condizentes com o que é efetivamente praticado. Outros problemas em relação a aplicações práticas de sequenciamento são abordadas em McKay *et al.* (2002), onde os autores apontam que as abordagens adotadas não levam em conta as capacidades e estratégias de produção, produção em lotes, níveis de estoque e até situações nas quais a intervenção humana é necessária.

Recentemente, alguns estudos foram publicados visando suprir a falta de aplicações reais de sequenciamento. Por exemplo, os trabalhos publicados por Ruiz *et al.* (2008) e de Siqueira *et al.* (2016) abordam ambientes de máquinas com restrições largamente encontradas em sistemas de produção reais, como máquinas paralelas não-relacionadas em certos estágios, tempos de *release*, tempos de *setup* dependentes da sequência, elegibilidade de máquinas e tempos de latência entre operações.

Haouari e M'Hallah (1997) propõem dois algoritmos baseados em *Simulated Annealing* e Busca Tabu para resolução do *flowshop* híbrido com dois centros de trabalho e diversas máquinas paralelas idênticas em cada um deles. Os resultados mostraram que os algoritmos baseados em Busca Tabu encontraram a solução ótima em 35% dos problemas, com erro relativo médio de 0,82%.

Naderi e Ruiz (2010) propõem uma generalização para o *flowshop*, assumindo um ambiente com diversas fábricas idênticas, onde cada uma delas apresenta uma quantidade finita de máquinas em série. As tarefas devem ser distribuídas entre as diferentes fábricas com o objetivo de se minimizar o *makespan*. Os autores propuseram seis algoritmos de programação linear inteira mista (MILP) distintos para resolver o problema, que se limitam à instâncias pequenas, mostrando análises computacionais e estatísticas para cada método proposto. Para resolver pro-

blemas com instâncias maiores, os autores também propõem quatorze heurísticas baseadas em regras de despacho e métodos de descida em vizinhança variável (VND).

Lin e Liao (2003) apresentaram uma solução para uma aplicação real de produção de etiquetas, caracterizada por um *flowshop* híbrido de dois estágios com tempos de *setup* dependentes da sequência. O trabalho apresentou nove heurísticas distintas para minimização do atraso máximo ponderado, combinando técnicas de sequenciamento com regras de despacho. A heurística que apresentou melhor resultado combinava o uso de TST como método de sequenciamento e FIFO como regra de despacho, apresentando resultados, em média, 47% melhores que método de sequenciamento previamente adotado pela empresa.

Outra proposta de solução para o problema de *flowshop* híbrido é apresentada por Ruiz e Maroto (2006). Os autores abordam um problema real usualmente encontrado na indústria de elementos cerâmicos, com restrições como tempos de *setup* dependentes da sequência e elegibilidade de máquinas. O objetivo é minimizar o *makespan* por meio do uso de algoritmos genéticos, que se diferem de outras metaheurísticas pelo fato de utilizar um conjunto de soluções codificadas, chamada população, que evolui ao longo do tempo até que um critério de parada seja satisfeito. Para instâncias pequenas (32 tarefas), o algoritmo superou o sequenciamento manual da empresa num intervalo entre 2.32% and 16.95%.

O artigo de Naderi *et al.* (2010) aborda o mesmo tipo de problema estudado nessa dissertação, que é a resolução *Flowshop* Híbrido e Flexível (HFFS). Os autores propõem o uso de ILS (*Iterated Local Search*), uma metaheurística simples que já produziu resultados estado-da-arte para resolução de *flowshops* regulares (RUIZ e MAROTO, 2005). Já Moreira *et al.* (2014) abordam o uso de uma metaheurística híbrida baseada em GRASP (FEO e RESENDE, 1995) e ILS, cujos resultados mostraram a superioridade técnica da solução apresentada quando comparada a soluções da literatura aplicadas para as mesmas famílias de instâncias.

.2. Caracterização do problema

Apesar das cinco famílias de produtos processados possuírem propriedades químicas e físicas diferentes, principalmente em relação a granulometria, atualmente o tempo de processamento em cada máquina é o mesmo, conforme indicado na Tabela 1.

Processo	Tempo de Processamento (min)
Secagem	60
Pesagem	1
Britagem	5
Pulverização	9
Dosagem	3.5

Tabela 1: Tempo médio de processamento em cada estágio

Segundo de Souza (2010), o tamanho das partículas de um material granulado pode va-

riar de 32mm a 6mm, enquanto o *pellet feed* possui distribuição granulométrica entre 0mm e 0.15mm. Dessa forma, existe um desperdício de recursos no momento em que o tempo de processamento entre materiais de granulometrias diferentes são idênticos. Logo, testes deverão ser feitos para aferir o tempo efetivo necessário para adequação da granulometria de cada material em específico, e o problema de sequenciamento será tratado levando em consideração tempos de processamento diferentes para cada tipo de produto.

De acordo com os conceitos introduzidos na Seção .1 e com o que pode ser observado na Figura ??, o processamento das amostras possui as seguintes características:

- O fluxo tomado por cada amostra não depende do tipo de produto em processamento;
- O tipo de produto influencia apenas no tempo em que cada amostra é processada em cada equipamento;
- Os produtos podem seguir por duas rotas distintas, de acordo com o tipo da análise. No caso da análise química, a amostra deve passar por todos os processos do laboratório (secagem, britagem, pulverização e dosagem). Na análise de umidade, a amostra será submetida apenas ao processo de secagem e saltará os estágios posteriores.
- Assim que finalizado o processamento da amostra em um equipamento, ela já deve ser direcionada imediatamente para processamento na máquina seguinte. Em outras palavras, não pode haver tempo de espera entre máquinas consecutivas;
- Não existem tempos de *setup* entre equipamentos;
- A estufa possui capacidade para secar até quarenta amostras ao mesmo tempo;
- Existem dois moinhos pulverizadores idênticos em paralelo;
- O manipulador industrial é responsável por toda a movimentação de amostras entre os equipamentos.

Segundo Linn e Zhang (1999), o ambiente de máquinas *Flowshop* Híbrido (HFS) consiste em uma série de estágios nos quais as tarefas são processadas em um fluxo unidirecional, e pelo menos um desses estágios deve possuir múltiplas máquinas idênticas em paralelo. Em cada estágio, as tarefas são processadas em apenas uma máquina e seguem sempre o mesmo fluxo.

O problema real estudado se diferencia do ambiente HFS pelo fato da tarefa saltar os estágios de cominuição e seguir diretamente para o fim, no caso da análise de umidade.

Uma variação do ambiente de máquinas HFS é o *Flowshop* Híbrido e Flexível (HFFS) Moreira *et al.* (2014). Neste caso, nem todos os estágios devem ser executados obrigatoriamente, abrangendo a necessidade do problema real.

Considerando que a estufa possui capacidade de processamento de até 40 amostras simultaneamente, é possível considerar que seu estágio possui 40 máquinas idênticas em paralelo. Considerando ainda que existem dois moinhos pulverizadores idênticos, o ambiente de máquinas do laboratório pode ser representado de acordo com a Figura 1.

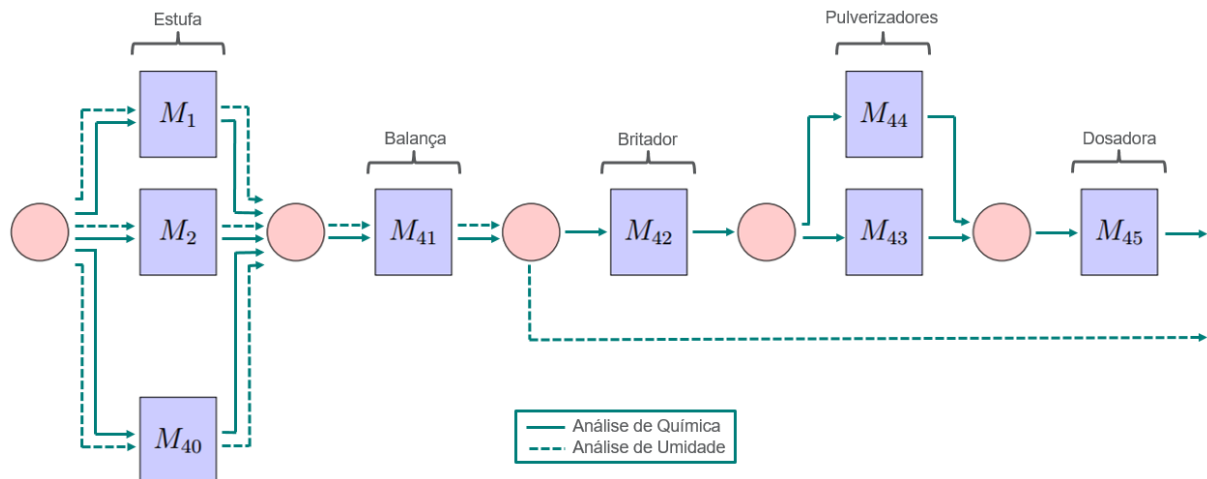


Figura 1: Fluxo das amostras no laboratório.

Atualmente, são processadas, em média, 60 amostras por dia no Laboratório Físico de Vargem Grande. A expectativa é que o número de amostras aumente consideravelmente com a unificação de algumas diretorias da empresa, com a estimativa de um processamento médio de 200 amostras diárias. Esse número ainda é relativamente baixo quando comparado a outros laboratórios da Vale, como o de Itabira, que segundo Lott *et al.* (2018) processa uma média de 900 amostras por dia.

As amostras são introduzidas no sistema de forma aleatória e em diferentes momentos do dia. Por exemplo, três conjuntos de amostras diferentes, contendo 20 amostras cada, podem ser disponibilizados para processamento pela manhã, pela tarde e pela noite. Dessa forma, o sistema de otimização deverá considerar a entrada dinâmica de amostras na célula.

Como o objetivo principal do trabalho é evitar que atrasos ocorram, o tempo final de execução da última tarefa (*makespan*) deixa de ser relevante caso ela esteja sendo entregue no prazo. Logo, este trabalho deve considerar a resolução de um problema mono-objetivo, cujo dever é reduzir o atraso máximo encontrado.

Levando em consideração as notações e convenções disponíveis em Pinedo (2016) e pela análise do problema realizada neste capítulo, o sequenciamento de tarefas a ser resolvido neste trabalho pode ser representado pela tripla $HFFS_5 | nwt | T_{\max}$.

.2.1. Sistema de otimização

Com base na revisão bibliográfica realizada na Seção .1 e pela característica do problema ilustrado na Seção .2, o sistema de otimização proposto abordará a resolução de um problema

de sequenciamento de tarefas em um ambiente *flowshop* híbrido e flexível (HFFS), que leva em consideração as restrições reais do processo.

O problema HFFS é, segundo Ruiz *et al.* (2008), da classe NP-Difícil, devendo então ser resolvido por métodos heurísticos devido a impossibilidade de resolução ótima utilizando métodos exatos em tempo de tomada de decisão. Apesar de não garantir o resultado ótimo, os métodos heurísticos apresentam bons resultados em um tempo computacional pequeno, que são características desejáveis para o processo da célula robótica.

Dessa forma, o sistema de otimização proposto será baseado na resolução do problema HFFS por meio da utilização de heurísticas construtivas gulosas e aleatórias, e nas metaheurísticas ILS (LOURENÇO *et al.*, 2003) e IGS (FRAMINAN e LEISTEN, 2008).

A escolha dos métodos citados se justifica devido a eficiência percebida, por meio da literatura, na resolução de problemas combinatórios de diferentes classes.