



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



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

Dissertação

ESTUDO PROSPECTIVO E TESTES DE CONCEITO PARA A  
PROGRAMAÇÃO DE EQUIPAMENTOS AUTÔNOMOS  
APLICADOS À NAVEGAÇÃO E MANIPULAÇÃO NO  
CARREGAMENTO DE EXPLOSIVOS

Jhony Alan Tavares Ferreira

Ouro Preto  
Minas Gerais, Brasil  
2018

**Jhony Alan Tavares Ferreira**

**ESTUDO PROSPECTIVO E TESTES DE CONCEITO PARA A  
PROGRAMAÇÃO DE EQUIPAMENTOS AUTÔNOMOS  
APLICADOS À NAVEGAÇÃO E MANIPULAÇÃO NO  
CARREGAMENTO DE EXPLOSIVOS**

Dissertação de Mestrado apresentado ao curso de Mestrado Profissional 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: Gustavo Medeiros Freitas

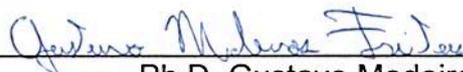
Ouro Preto  
2018

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

Estudo Prospectivo e Testes de Conceito Para a Programação de  
Equipamentos Autônomos Aplicados à Navegação e Manipulação no  
Carregamento de Explosivos

Jhony Alan Tavares Ferreira

Dissertação defendida e aprovada em 13 de abril de 2018 pela banca  
examinadora constituída pelos professores:



---

Ph.D. Gustavo Medeiros Freitas  
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)



---

D.Sc. Paulo Henrique Vieira Magalhães  
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



---

D.Sc. Agnaldo José da Rocha Reis  
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



---

D.Sc. Bruno Nazário Coelho  
Membro externo – Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)

F383e

Ferreira, Jhony Alan Tavares.

Estudo prospectivo e testes de conceito para a programação de equipamentos autônomos aplicados à navegação e manipulação no carregamento de explosivos [manuscrito] / Jhony Alan Tavares Ferreira. - 2018.

105f.:

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais. Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

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

1. Automação. 2. Robótica. 3. Navegação autônoma. 4. Manipulação autônoma. I. Freitas, Gustavo Medeiros. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5:622.2

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)

# Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer primeiramente às instituições ITV e UFOP pela qualidade do ensino e excelente infraestrutura oferecidos no programa de mestrado profissional PROFICAM.

Agradeço aos companheiros do laboratório de automação do ITV pelo suporte nos experimentos práticos e ao meu orientador Gustavo Medeiros Freitas por toda a ajuda no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço também a amigos e familiares pela paciência e apoio durante o período do mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à Escola de Minas/UFOP e ao ITV como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO PROSPECTIVO E TESTES DE CONCEITO PARA A PROGRAMAÇÃO  
DE EQUIPAMENTOS AUTÔNOMOS APLICADOS À NAVEGAÇÃO E  
MANIPULAÇÃO NO CARREGAMENTO DE EXPLOSIVOS

Jhony Alan Tavares Ferreira

Abril/2018

Orientador: Gustavo Medeiros Freitas

O desenvolvimento de tecnologias aplicadas à mineração tem crescido significativamente nos últimos anos. Para as mineradoras, a adoção de novas tecnologias em automação e operação remota representa uma grande oportunidade para ganhos em produtividade e segurança. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma solução integrada para navegação e manipulação autônomas que pode ser utilizada em processos de mineração. A solução proposta é validada através de simulações e testes reais; a aplicação alvo escolhida foi o carregamento autônomo de explosivos. Essa aplicação pode reduzir e até eliminar os riscos a que os operadores estão expostos em ambientes como área de desmonte com presença de explosivos. Para validação experimental foram utilizados uma plataforma móvel de porte médio com um braço robótico acoplado. O teste de conceito proposto consiste em 3 etapas - navegação autônoma, processamento de imagens e manipulação - para emular um carregamento autônomo de explosivos em laboratório.

**Palavras-chave: Automação, Robótica, Navegação e Manipulação Autônoma**

Abstract of Dissertation presented to Escola de Minas/UFOP and ITV as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PROSPECTIVE STUDY AND CONCEPT TESTS FOR THE PROGRAMMING OF  
AUTONOMOUS EQUIPMENT APPLIED TO NAVIGATION AND MANIPULATION  
IN EXPLOSIVES LOADING.

Jhony Alan Tavares Ferreira

April/2018

Advisor: Gustavo Medeiros Freitas

The development of mining technologies has grown significantly in recent years. For mining companies, the adoption of new technologies on automation and remote operation represents a great opportunity for gains in productivity and safety. This paper describes the development of an integrated solution for autonomous navigation and manipulation that can be applied to mining processes. The proposed solution was validated with simulated and real tests; the target application is the autonomous explosive charging. This solution can reduce or eliminate the risks to which operators are exposed in environments such as rock blast areas. The experimental validation was performed using a mobile platform with a robotic arm. The proposed concept test consists in 3 steps - autonomous navigation, image processing and manipulation - in order to emulate an autonomous explosives charging in laboratory.

**Keywords: Automation, Robotics, Autonomous Navigation and Manipulation**

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Perfuração de rocha para carregamento de explosivos em mina a céu aberto. . . . .	14
Figura 2 – Arremesso de fragmentos de rocha provocado por desmonte com explosivos. . . . .	15
Figura 3 – Emissão de gases tóxicos provocada por desmonte com explosivos. . . .	15
Figura 4 – Caminhonete atingida por fragmento de rocha em operação com explosivos: o fragmento penetrou no teto do veículo e atingiu a vítima. . . .	16
Figura 5 – Hot Metal Carrier manipulando um cadinho de alumínio. . . . .	19
Figura 6 – Caminhão de carregamento de explosivos com manipulador mecânico. .	20
Figura 7 – Sistema de escaneamento e mapeamento baseado em lasers acoplados no efetuador: (a) perfil 3D gerado pelo mapeamento, (b) detecção de furo através da diferença na distância dos pontos alcançados. . . . .	20
Figura 8 – Sistema de localização do furo com respeito ao efetuador: (a) detecção de bordas canny, (b) posição relativa entre efetuador e furo. . . . .	21
Figura 9 – Sistema de navegação do robô Dynamaid: (a) Base com 4 rodas direcionais e laser range finder, (b) mapeamento do ambiente com Gmapping. .	22
Figura 10 – Reconhecimento de objetos: detecção de retângulos e características SURF. . . . .	22
Figura 11 – Postura do DRC-HUBO+ ao navegar através de pernas (walking mode) e rodas (wheel mode). . . . .	23
Figura 12 – Sistema de percepção do DRC-HUBO+: Detecção e localização de uma válvula através do processamento de imagens com informações de profundidade obtidas por um laser planar. . . . .	24
Figura 13 – Estrutura de arquivos do ROS. . . . .	25
Figura 14 – Configurações do elo ( <i>link</i> ) de um robô no formato URDF. . . . .	27
Figura 15 – Configuração da junta ( <i>joint</i> ) de um robô no formato URDF. . . . .	27
Figura 16 – Exemplo de Circuito Hamiltoniano para n=7 vértices. . . . .	28
Figura 17 – Operador inserindo dispositivos de detonação no furo de forma manual. .	32
Figura 18 – Diagrama de alto nível da metodologia proposta: (a) Descrição das atividades executadas no teste de conceito e (b) métodos aplicados para realizar as atividades associadas. . . . .	33
Figura 19 – Robô usado como base da implementação: Seekur Jr, equipado com braço manipulador <i>Schunk Powerball</i> . . . . .	33
Figura 20 – Arquitetura do Seekur Jr. . . . .	34
Figura 21 – Modelo URDF da plataforma Seekur Jr. . . . .	36
Figura 22 – Simulação em ambiente não estruturado no Gazebo. . . . .	37
Figura 23 – Exemplos de geometria em malhas de perfuração. . . . .	38

Figura 24 – Perfuração de alta precisão baseada em sistemas de posicionamento por satélite. . . . .	38
Figura 25 – Estrutura do conjunto de pacotes ROS para navegação ( <i>Navigation Stack</i> ). . . . .	40
Figura 26 – Simulação de avanço das velocidades amostradas. . . . .	42
Figura 27 – Navegação autônoma: planejamento de trajetória em um ambiente com obstáculos. . . . .	43
Figura 28 – Posição $(p_x, p_y)$ do furo com respeito ao sistemas de coordenadas do robô. . . . .	44
Figura 29 – Interpolação dos valores de coordenadas da câmera estéreo (Coord) e distância do furo com respeito ao eixo Y do Seekur Jr ( $d_y$ ). . . . .	44
Figura 30 – Manipulação autônoma: interface gráfica e bibliotecas disponíveis no pacote <i>Moveit!</i> . . . . .	45
Figura 31 – Modelo cinemático do manipulador <i>Schunk</i> de acordo com padronização <i>Denavit-Hatenberg</i> . . . . .	47
Figura 32 – Modelo cinemático utilizado para calcular espaço de trabalho do manipulador <i>Schunk</i> . . . . .	48
Figura 33 – Espaço de trabalho projetado para o manipulador nas perspectivas XZ, YZ e XY. . . . .	50
Figura 34 – Visão geral sobre os principais processos implementados no ROS para integrar as diferentes etapas: navegação autônoma, processamento de imagens e manipulação. . . . .	51
Figura 35 – Integração do Sistema: etapas realizadas de forma autônoma para simular o carregamento de explosivos em laboratório. . . . .	52
Figura 36 – Mapeamento do ambiente não estruturado com obstáculos. . . . .	53
Figura 37 – Localização e numeração de furos no mapa. . . . .	54
Figura 38 – Coordenadas dos furos inseridos no mapa e matriz de distâncias calculada. . . . .	55
Figura 39 – Resultados gerados pelos algoritmos propostos de otimização de rotas. . . . .	55
Figura 40 – Demonstração visual (linha azul) da ordem de navegação dos furos. . . . .	56
Figura 41 – Navegação Autônoma do Seekur Jr em direção aos furos de acordo com a rota calculada. . . . .	56
Figura 42 – Comparativo da simulação de ambiente com furos distribuídos conforme exemplo de plano de fogo disponibilizado pela Vale. . . . .	57
Figura 43 – Otimização de rota para malhas de perfuração com grande quantidade de furos. . . . .	57
Figura 44 – Quantidade de elementos calculados em uma matriz de distâncias. . . . .	59
Figura 45 – Relação entre quantidade de operações e tempo necessário para calcular matriz de distâncias. . . . .	59
Figura 46 – Etapas da navegação no teste real . . . . .	61

Figura 47 – Trajetória executado pelo robô para atingir o furo. . . . .	61
Figura 48 – Imagens da câmera estéreo . . . . .	62
Figura 49 – Posicionamento do manipulador sobre o furo. . . . .	62
Figura 50 – Algoritmo de Matlab para cálculo do espaço de trabalho do manipu- lador <i>Schunk</i> : utiliza a cinemática direta e a triangulação de pontos para plotar o espaço tridimensional de trabalho do manipulador. . . . .	71
Figura 51 – Análise Preliminar de Riscos para Desmonte de Rochas por Detonação	72
Figura 52 – Alerta sobre acidentes e boas práticas para operações com explosivos na mineração . . . . .	73

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Explosão combinatória para cálculo de rotas no problema do caixeiro viajante utilizando um computador com capacidade de 1 bilhão de adições por segundo. . . . .	29
Tabela 2 – Parâmetros <i>Denavit-Hatenberg</i> para o braço <i>Schunk</i> . . . . .	47
Tabela 3 – Resultados de simulações com os algoritmos de otimização propostos. .	58

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Motivação	13
1.1.1	Carregamento de Explosivos na Mineração	13
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivos Gerais	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Organização da Dissertação	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA</b>	<b>19</b>
2.1	Trabalhos Relacionados	19
2.1.1	Sistema de Transporte e Manipulação de Cadinho	19
2.1.2	Sistema Robótico de Carregamento de Explosivos	19
2.1.3	Robô Humanoide para Serviços Domésticos	21
2.1.4	DRC - Robôs para Operações de Emergência	23
2.1.4.1	DRC-HUBO+	23
2.2	Sistemas de Programação e Simulação de Dispositivos Robóticos	24
2.2.1	ROS	24
2.2.2	Gazebo	26
2.3	Otimização de Rotas	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>32</b>
3.1	Componentes do Sistema	33
3.1.1	Plataforma Móvel	33
3.1.2	Braço Manipulador	34
3.1.3	Software	35
<b>4</b>	<b>CARREGAMENTO AUTÔNOMO DE EXPLOSIVOS</b>	<b>36</b>
4.1	Simulações em Ambientes Não Estruturados	36
4.1.1	Simulações no Gazebo	36
4.1.2	Otimização de Rotas	37
4.2	Teste de Conceito	40
4.2.1	Comunicação com o Sistema	40
4.2.2	Navegação Autônoma	40
4.2.3	Detecção do Furo	43
4.2.4	Planejamento e Controle do Braço Manipulador	45
4.2.4.1	Espaço de Trabalho	46
4.2.5	Integração do Sistema	50

<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>53</b>
5.1	Simulação - Otimização de Rotas	53
5.2	Teste de Conceito em Laboratório	60
5.2.1	Navegação até o Furo	60
5.2.2	Localização do Furo	61
5.2.3	Posicionamento do Manipulador sobre o Furo	62
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>63</b>
6.1	Contribuições da Dissertação	64
6.2	Trabalhos Futuros	64
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE A ALGORITMO PARA CÁLCULO DO ESPAÇO DE TRABALHO DO MANIPULADOR</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO A ANÁLISE DE RISCOS EM ÁREA DE DETONAÇÃO</b>	<b>72</b>
	<b>ANEXO B ACIDENTES EM DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXO C ARTIGOS APRESENTADOS EM CONGRESSOS</b>	<b>74</b>
C.1	IROS 2017	74
C.2	SBAI 2017	76
C.3	ABM WEEK 2017	93

# 1 INTRODUÇÃO

A criação e a difusão de novas tecnologias têm promovido um cenário de importantes mudanças no setor de mineração. Para as mineradoras, a adoção de novas tecnologias representa uma grande oportunidade para ganhos em produtividade e segurança (MESQUITA; CARVALHO; OGANDO, 2016).

Segundo a Deloitte (2016), o avanço em direção aos veículos autônomos e tecnologias automatizadas vem revolucionando as operações de mineração. Sistemas inteligentes são capazes de executar tarefas cada vez mais complexas, incluindo processamento de atividades perigosas, resultando em redução dos custos de mão-de-obra e aumento da produtividade.

Avanços em robótica e automação estão permitindo que as indústrias de mineração mudem a forma em que conduzem seus processos de produção (SIMONITE, 2016). Através de tecnologias avançadas, as mineradoras caminham em direção ao conceito de "Mina Autônoma" onde processos e equipamentos podem ser operados a distância ou de forma autônoma.

A Vale possui um projeto piloto de mina autônoma em andamento na mina de Brucutu. Através da automação e operação remota, o projeto busca métodos mais eficientes e seguros de mineração. A empresa conta com três caminhões autônomos, uma perfuratriz autônoma, um trator teleoperado e um caminhão autônomo para carregamento de explosivos (em fase de desenvolvimento). Além disso, a empresa possui aplicações de sistemas robóticos em construção de túneis, lavagem de caminhões, reparo de vagões e inspeção de cavidades (COTA et al., 2017).

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de uma solução integrada para navegação e manipulação autônomas que pode ser utilizada em processos de mineração.

A aplicação alvo escolhida foi o carregamento de explosivos. Esta tarefa consiste na inserção de explosivos em furos realizados na região de desmonte de minério. Este trabalho propõe um teste de conceito, realizado em laboratório, onde um sistema robótico executa tarefas que emulam um carregamento autônomo de explosivos. A metodologia aplicada divide a tarefa em 3 etapas: navegação autônoma até a região do furo, localização do furo e projeção de um atuador sobre o furo.

Para desenvolver a solução proposta foi realizada uma integração de uma plataforma móvel comercial com sensores e atuadores como câmera estéreo, laser planar, unidade de medição inercial e um braço manipulador. O sistema é integrado de forma que, ao

receber as coordenadas do furo, o robô é capaz de navegar até o furo, localizá-lo através de processamento de imagens e projetar o manipulador sobre ele.

## 1.1 Motivação

O estudo de sistemas robóticos autônomos tem evoluído bastante nos últimos anos. Diferentes soluções são encontradas na literatura para tarefas realizadas por um robô autônomo, como: localização, mapeamento, planejamento e execução de trajetórias com desvio de obstáculos.

A implementação prática de técnicas de navegação e manipulação autônomas envolve o uso de uma variedade de sensores e atuadores. O desafio é encontrar maneiras de integrar diferentes dispositivos em um sistema único capaz de perceber o ambiente ao ser redor e atuar conforme a tarefa projetada.

Aplicações de robôs autônomos podem ser encontradas em diferentes tarefas, como transporte de materiais, inspeção de equipamentos, combate a incêndios e até exploração planetária ((YANG; ZHANG; MA, 2016); (LAHR et al., 2013); (WELCH; LIMONADI; MANNING, 2013)). A escolha da tarefa está geralmente relacionada ao risco à integridade física do operador ou a dificuldade de acesso em áreas restritas.

Na mineração existem vários processos que podem ser automatizados. A prioridade é feita considerando principalmente os fatores: segurança, eficiência e padronização. Como exemplo de atividades que envolvem alto risco podem ser citadas as operações de desmonte de rochas com explosivos.

### 1.1.1 Carregamento de Explosivos na Mineração

A extração do minério de um depósito mineral é realizada através da quebra de suas formações rochosas. Na mineração, este processo, conhecido como desmonte de rochas, pode ser realizado via meios mecânicos ou através de explosivos.

A escolha do método depende de fatores como: características da rocha, condições físicas da mina, custos de operação, produtividade e nível de fragmentação desejada. Os métodos que utilizam explosivos são os mais comuns entre as mineradoras devido a ganhos em produtividade e qualidade na fragmentação do minério (BHANDARI, 1997).

Para realizar o desmonte de rochas com explosivos, são realizadas as seguintes etapas: perfuração, carregamento e detonação. Na primeira etapa, máquinas de perfuração hidráulicas são utilizadas para furar a rocha (figura 1). Em seguida, os furos previamente

executados são preenchidos (ou carregados) com explosivos. Por último, procede-se então à detonação e conseqüente fragmentação do minério.



Figura 1 – Perfuração de rocha para carregamento de explosivos em mina a céu aberto.

Fonte – (DODGE, 2012)

Os explosivos são compostos químicos que, após iniciados, liberam grande quantidade de energia, a qual provoca a fragmentação do minério. Mas nem toda energia é transmitida para a rocha. Parte dela é inevitavelmente convertida em vibração no solo, arremesso de fragmentos de rocha (figura 2), pressão acústica e emissão de gases tóxicos (figura 3) (DICK; FLETCHER; D'ANDREA, 1982).

Segundo Pereira e Santos (2016) existem diversos riscos ao que o operador está exposto ao exercer atividades em áreas de desmonte com explosivos. Os riscos podem ser classificados em físicos, químicos, biológicos e ergonômicos; as causas e efeitos de cada risco avaliado são demonstrados no ANEXO A. De acordo com a análise preliminar de riscos realizada, cerca de 77,8% dos efeitos causados pelas atividades de detonação de rochas com explosivos produzem riscos de categoria não tolerável, 14,8% de categoria moderada e 7,4% são toleráveis.



Figura 2 – Arremesso de fragmentos de rocha provocado por desmonte com explosivos.

Fonte – (DNRM, 2013)



Figura 3 – Emissão de gases tóxicos provocada por desmonte com explosivos.

Fonte – (MATRIX, 2014)

O departamento de segurança do trabalho em mineração dos Estados Unidos (MSHA) reporta acidentes e incidentes relacionados a mineração (ANEXO B). Segundo a MSHA,

em 2016, cerca de 6% dos acidentes registrados estão relacionados a explosivos. O último acidente em operações com explosivos registrado no ano de 2016 relata a morte de um homem atingido por um fragmento de rocha. O homem estava em uma caminhonete impedindo que outros entrassem na área de detonação. Quando a detonação se iniciou um fragmento de rocha penetrou o teto da caminhonete e atingiu a vítima (figura 4) (MSHA, 2016).



Figura 4 – Caminhonete atingida por fragmento de rocha em operação com explosivos: o fragmento penetrou no teto do veículo e atingiu a vítima.

Fonte – (MSHA, 2016)

Apesar dos progressos feitos em operações com explosivos, fatalidades ainda são decorrentes, principalmente devido ao manuseio inadequado de explosivos e à segurança inadequada da área de detonação. Devido aos riscos relacionados às operações que envolvem explosivos, já existem várias pesquisas sobre equipamentos autônomos relacionadas a essas atividades, particularmente na etapa de carregamento (BONCHIS et al., 2014; YOUNG, 2002).

A solução proposta neste trabalho demonstra a possibilidade de reduzir e até eliminar os riscos a que os operadores estão expostos em ambientes como área de desmonte com presença de explosivos.

## 1.2 Objetivos

Em seguida são apresentados os objetivos gerais e específicos desta dissertação.

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho propõe um estudo prospectivo e testes de conceito para a programação de equipamentos autônomos aplicados à navegação e manipulação no carregamento de explosivos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos almejados pelo projeto, é possível mencionar:

- Integração da plataforma móvel com câmera estéreo, laser planar e unidade de medição inercial para obter uma representação do ambiente e localização do robô.
- Estudo avaliativo e implementação de algoritmos que realizam planejamento de trajetória com desvio de obstáculos para navegação e manipulação.
- Desenvolvimento de metodologias de controle e planejamento que integram plataforma móvel e manipulador em um único sistema.

## 1.3 Organização da Dissertação

No capítulo 1 são apresentados a introdução, motivação e objetivos deste trabalho. Na introdução é relatado a importância de equipamentos autônomos na mineração para melhorar os seus processos visando segurança, eficiência e padronização. A motivação aborda a relevância do tema *robôs móveis autônomos* assim como apresenta o teste de conceito proposto, carregamento autônomo de explosivos, que visa reduzir os riscos em operações com explosivos. Por último, os objetivos são propostos no formato de um estudo prospectivo para a programação de equipamentos autônomos e um teste de conceito em laboratório.

No capítulo 2 são apresentadas as referências bibliográficas da dissertação. Diferentes projetos que utilizam conceitos similares aos utilizados neste trabalho são apresentados. As aplicações variam desde atividades no setor industrial a serviços domésticos e apresentam soluções para navegação autônoma, manipulação e detecção de objetos.

Uma visão de alto nível da metodologia implementada é apresentada no capítulo 3. A solução proposta para emular o carregamento autônomo de explosivos em laboratório é descrita em três etapas: navegação autônoma, processamento de imagens e manipulação. São apresentados também os principais recursos de hardware e software utilizados na execução deste trabalho.

As técnicas utilizadas para o carregamento autônomo de explosivos são descritas no capítulo 4, divididas em simulação e teste de conceito. A simulação demonstra como é construído o modelo cinemático do robô e propõe algoritmos de otimização de rotas para situações com diversos furos de detonação. O teste de conceito aborda os algoritmos utilizados para emular o carregamento autônomo de explosivos em laboratório que englobam mapeamento, localização, planejamento de trajetórias, navegação com desvio de obstáculos, detecção de círculos e elipses, cálculo da posição do furo e métodos de integração das diferentes técnicas em um sistema único.

Por último, nos capítulos 5 e 6 são apresentados os resultados, conclusões, contribuições da dissertação e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA

### 2.1 Trabalhos Relacionados

Existem várias aplicações de técnicas de navegação e manipulação em equipamentos autônomos. As aplicações variam desde atividades no setor industrial até serviços domésticos. Nas próximas seções são apresentados alguns exemplos que utilizam conceitos similares ao deste trabalho.

#### 2.1.1 Sistema de Transporte e Manipulação de Cadinho

O *Hot Metal Carrier* (ROBERTS et al., 2007) é um equipamento capaz de navegar, desviar de obstáculos e manipular um cadinho com alumínio fundido de forma autônoma (Figura 5). O sistema de localização do veículo é feito por odometria, baseada em encoders, com auxílio de GPS. A detecção de obstáculos e mapeamento do ambiente é realizada via lasers planares. As operações de manipulação são divididas em pegar e soltar o cadinho. Inicialmente é realizada uma aproximação inicial onde o ponto de captação do cadinho pode ser detectado visualmente. De acordo com a detecção, o manipulador do veículo é direcionado para pegar o cadinho.



Figura 5 – Hot Metal Carrier manipulando um cadinho de alumínio.

Fonte – (ROBERTS et al., 2007)

#### 2.1.2 Sistema Robótico de Carregamento de Explosivos

No setor da mineração é possível citar o sistema robótico de carregamento de explosivos RECS (BONCHIS et al., 2014). O equipamento desenvolvido consiste em um caminhão acoplado de um manipulador mecânico com 6 graus de liberdade (Figura 6). Para realizar

o carregamento de explosivos de forma autônoma, o RECS possui um sistema de detecção de furos, processamento de imagem para auxiliar no posicionamento do efetuador, e planejamento e controle de trajetórias. A detecção de furos é feita através de um sistema de escaneamento e mapeamento (SAM) baseado em lasers acoplados no efetuador (Figura 7). O processamento de imagens é feito por câmeras, montadas sobre o efetuador, que fornecem estimativas confiáveis da localização dos furos com respeito ao efetuador (Figura 8). Por último, o planejamento e controle de trajetórias é feito utilizando a técnica de campos potenciais que guiam o manipulador em direção ao furo (CHOSSET, 2005).



Figura 6 – Caminhão de carregamento de explosivos com manipulador mecânico.

Fonte – (BONCHIS et al., 2014)

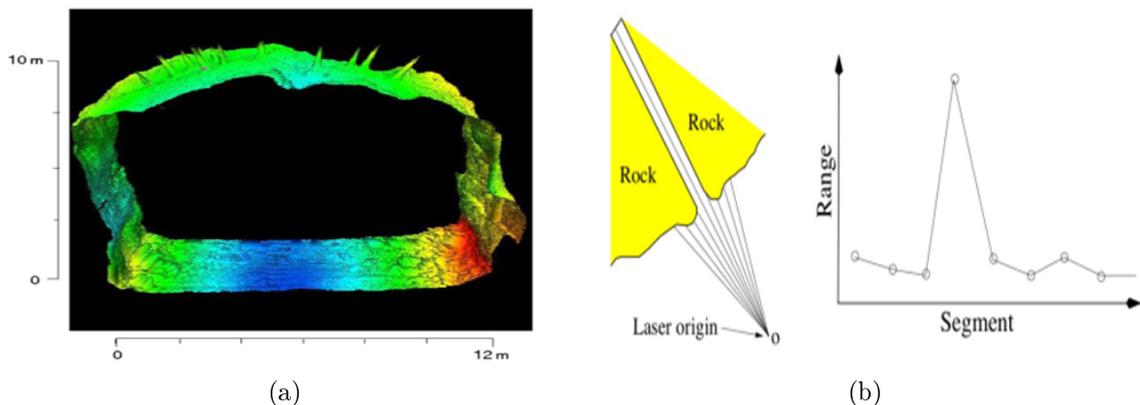


Figura 7 – Sistema de escaneamento e mapeamento baseado em lasers acoplados no efetuador: (a) perfil 3D gerado pelo mapeamento, (b) detecção de furo através da diferença na distância dos pontos alcançados.

Fonte – (BONCHIS et al., 2014)

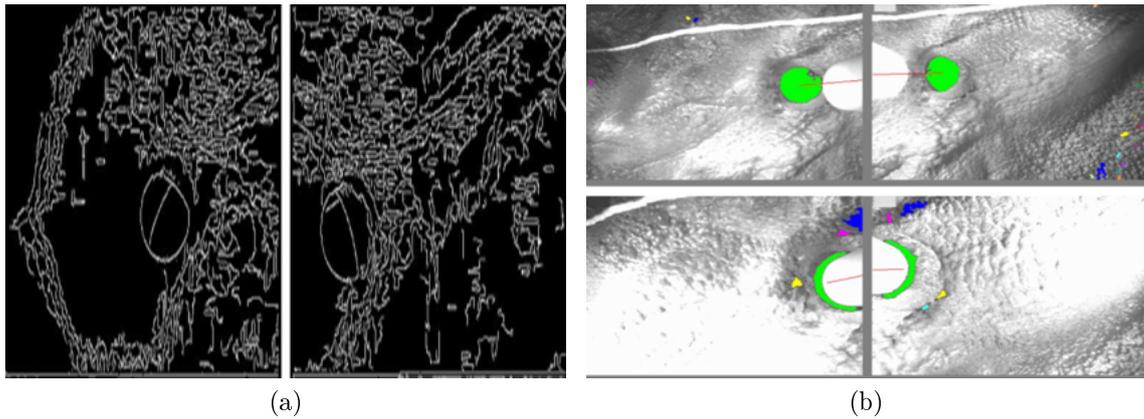


Figura 8 – Sistema de localização do furo com respeito ao efetuador: (a) detecção de bordas canny, (b) posição relativa entre efetuador e furo.

Fonte – (BONCHIS et al., 2014)

### 2.1.3 Robô Humanoide para Serviços Domésticos

Um exemplo relevante de aplicação de técnicas de navegação e manipulação autônomas é o robô humanoide *Dynamaid*, utilizado para serviços domésticos (STÜCKLER; BEHNKE, 2009). A estrutura do robô é dividida em duas partes, base e corpo superior antropomórfico. A base é composta por 4 pares de rodas direcionais, com acionamento diferencial individual, que possibilitam a navegação em qualquer direção (omnidirecional). O corpo superior é composto por 2 braços antropomórficos com um total (incluindo efetuador) de 9 graus de liberdade cada.

Dentre as diversas funcionalidades do *Dynamaid*, vale destacar as técnicas utilizadas para navegação, manipulação e detecção de objetos.

- Navegação: para navegar de forma autônoma o robô precisa estimar a sua posição num determinado mapa, planejar uma trajetória livre de obstáculos, e ser capaz de mapear ambientes desconhecidos através dos seus sensores. Para estimar a posição inicial no mapa foi utilizado o algoritmo *Adaptive Monte Carlo Localization* (AMCL)(FOX, 2003). O planejamento de trajetória foi implementado por algoritmos de busca heurística A\* (HART; NILSSON; RAPHAEL, 1968). Por último, no mapeamento de ambientes desconhecidos foi utilizada a técnica de mapeamento e localização simultâneos (SLAM) através dos algoritmos FastSLAM (MONTEMERLO et al., ) e GMapping (GRISSETTI; STACHNISS; BURGARD, 2007) (Figura 9).
- Detecção e reconhecimento de objetos: para a detecção e localização é utilizado o laser Hokuyo. Uma vez alinhado ao plano dos objetos, o laser realiza um escaneamento horizontal para detectá-los. A varredura da faixa do laser é primeiro segmentada

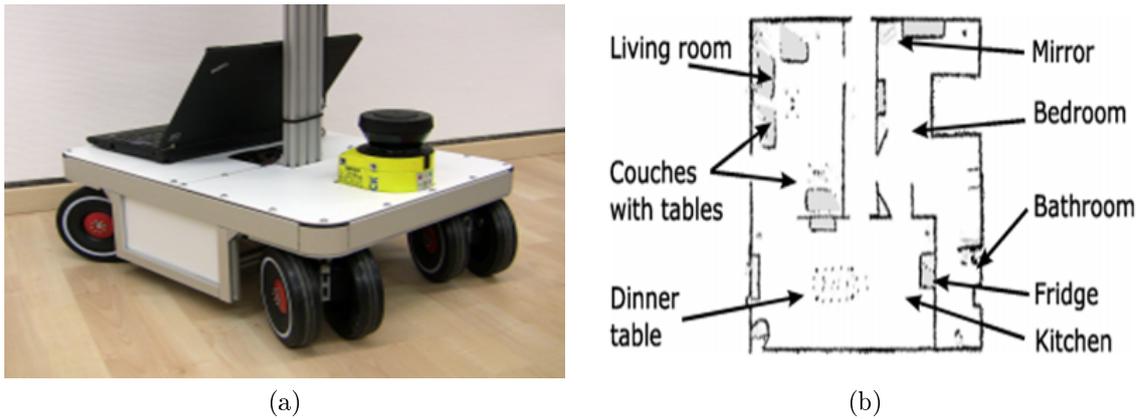


Figura 9 – Sistema de navegação do robô Dynamaid: (a) Base com 4 rodas direcionais e laser range finder, (b) mapeamento do ambiente com Gmapping.

Fonte – (STÜCKLER; BEHNKE, 2009)

com base na distância de salto. Segmentos com tamanhos e larguras específicos são considerados como objetos potenciais. O reconhecimento dos objetos é feito por processamento de imagens através da comparação de cores e detecção de características com o algoritmo SURF (*Speed Up Robust Features*) (BAY; TUYTELAARS; GOOL, 2006) (Figura 10).

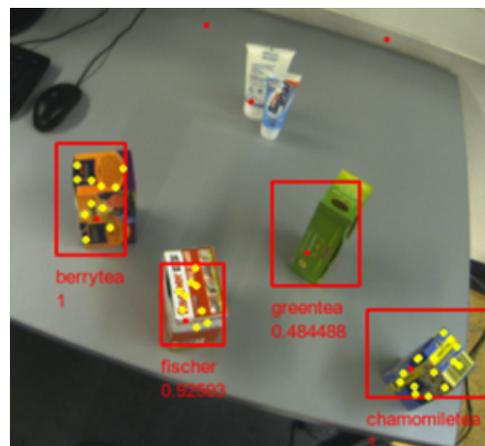


Figura 10 – Reconhecimento de objetos: detecção de retângulos e características SURF.

Fonte – (STÜCKLER; BEHNKE, 2009)

- Manipulação: para resolver de forma robusta as tarefas de manipulação móvel, foram integrados a detecção de objetos, a navegação e as primitivas de movimento. O robô pode agarrar objetos, carregá-los e entregá-los a usuários humanos. Para agarrar um objeto em uma localização específica o robô navega até uma posição próxima ao objeto, e então utiliza um sistema de lasers que detectam a posição vertical e horizontal desejada para guiar os manipuladores.

## 2.1.4 DRC - Robôs para Operações de Emergência

Exemplos mais recentes de técnicas de navegação e manipulação autônomas são encontrados nos robôs desenvolvidos para o *Darpa Robotics Challenge*(DRC) 2015. O DRC é uma competição onde robôs humanóides devem executar tarefas complexas em ambientes perigosos. O objetivo é auxiliar em operações de emergência em desastres naturais. Equipes participantes de diversas organizações de pesquisa e desenvolvimento de robótica projetam *hardware*, *software*, sensores e interfaces de controle homem-máquina para executar uma série de tarefas selecionadas pela DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*).

### 2.1.4.1 DRC-HUBO+

O vencedor da competição de 2015, o DRC-HUBO+, é um robô humanóide capaz de realizar diferentes tarefas como conduzir um veículo, navegar em ambiente com obstáculos, subir escadas, detectar e manipular objetos (LIM et al., 2017). O DRC-HUBO+ possui estrutura humanóide de 1,75 cm de altura, 80 kg de peso e 32 graus de liberdade distribuídos em cabeça, tronco, braços, mãos, pernas e rodas. O robô possui dois sistemas de mobilidade, um baseado em pernas e outro em rodas. A locomoção por pernas é auxiliada por um sistema de controle de estabilidade que permite ao robô caminhar em ambientes planos e subir escadas. A navegação por rodas é feita através de rodas acopladas em seus joelhos e pés. A postura do robô nos dois sistemas de locomoção pode ser visualizada na Figura 11.

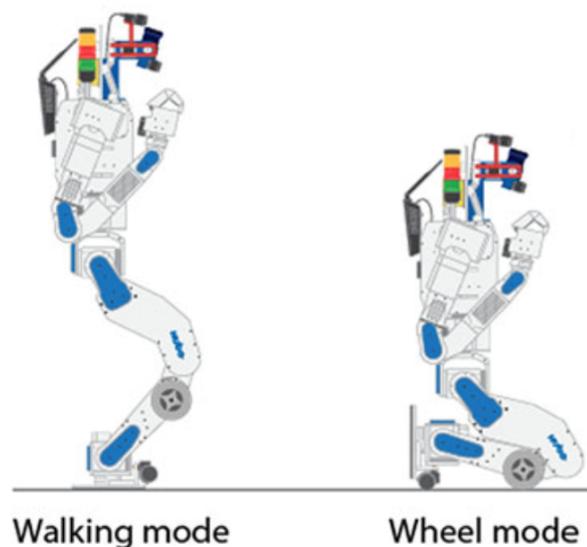


Figura 11 – Postura do DRC-HUBO+ ao navegar através de pernas (walking mode) e rodas (wheel mode).

A manipulação é realizada por dois braços com um total de 8 graus de liberdade cada. O efetuator de 3 dedos é utilizado para agarrar, movimentar e manipular objetos como maçaneta de portas, válvulas e furadeiras.

Para realizar as tarefas de navegação e manipulação de forma autônoma ou teleoperada, o DRC-HUBO+ possui um sistema de detecção e localização de objetos baseado em um laser planar e processamento de imagens (SHIM et al., 2016). A estrutura 3D do ambiente é obtida através da rotação do laser planar e combinação de suas leituras com as imagens obtidas pelas câmeras. Um exemplo de detecção de uma válvula é demonstrado na Figura 12.



Figura 12 – Sistema de percepção do DRC-HUBO+: Detecção e localização de uma válvula através do processamento de imagens com informações de profundidade obtidas por um laser planar.

Fonte – (LIM et al., 2017)

## 2.2 Sistemas de Programação e Simulação de Dispositivos Robóticos

Existem diversos sistemas para aplicações de robótica, desde plataformas para a integração de dispositivos e programação de robôs até simuladores dinâmicos capazes de renderizar robôs em ambientes tridimensionais. Nas próximas seções são apresentados dois sistemas utilizados neste trabalho, a plataforma ROS e o simulador Gazebo.

### 2.2.1 ROS

O ROS (*Robot Operation System*) é um plataforma de código aberto que oferece arquitetura, algoritmos e ferramentas voltadas para aplicações de robótica.

Através de uma estrutura similar a um sistema operacional, a arquitetura do ROS possibilita a comunicação entre seus diversos processos de forma paralela e distribuída. A organização de arquivos do ROS em alto nível é demonstrada na Figura 13.

A unidade básica de funcionamento do sistema é o pacote (*package*). Nele estão contidos: o código de programação e/ou comunicação com os dispositivos do sistema chamado de *nó*, bibliotecas, arquivos de configurações e estruturas de mensagens e serviços

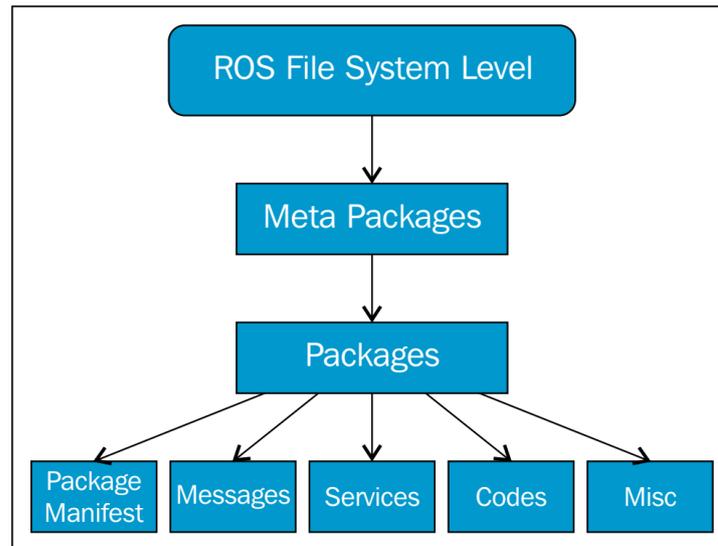


Figura 13 – Estrutura de arquivos do ROS.

Fonte – (JOSEPH, 2015)

para interação com outros pacotes. A principal característica de comunicação no sistema ROS está no uso de tópicos para realizar a troca de mensagens entre nós. A comunicação entre os nós de diversos pacotes ocorre através da publicação de mensagens em tópicos. Uma vez publicada a mensagem no tópico, os nós que desejam aquela informação se inscrevem ao tópico para recebê-la.

A plataforma ROS fornece uma variedade de algoritmos genéricos e reutilizáveis que auxiliam nas aplicações de robótica. Os algoritmos são encontrados em diferentes níveis de abstração: de baixo nível, como aqueles relacionados à cinemática, controle, e percepção robótica até outros de alto nível como planejamento, interação humana, navegação, localização e mapeamento.

As ferramentas da plataforma ROS variam desde depuração, visualização gráfica até integração com sistemas de simulação tridimensionais. As ferramentas de depuração são compostas por recursos de linha de comando, para analisar códigos de programação, e recursos de análise gráfica, como o *rqt\_graph*, utilizado para analisar a conexão entre os diversos nós do sistema. Para visualização gráfica a ferramenta mais utilizada é o *RViz*, capaz de exibir dados de sensores, modelos de robôs, mapas, trajetórias, entre outros. Por último, a plataforma ROS disponibiliza um conjunto de pacotes para a integração com simuladores como o Gazebo, demonstrado na próxima seção.

### 2.2.2 Gazebo

O Gazebo é um simulador dinâmico 3D com capacidade de simular de forma precisa e eficiente populações de robôs em ambientes complexos. Dentre os principais recursos utilizados no Gazebo, é possível citar:

Dentre os principais recursos utilizados no Gazebo, é possível citar:

- Simulação Dinâmica: utiliza *physics engine* como ODE, Bullet, Simbody e DART, para produzir simulações dinâmicas com alto grau de precisão.
- Renderização Gráfica 3D: oferece renderização realista de ambientes, incluindo iluminação, sombras e texturas de alta qualidade.
- Sensoriamento: gera dados de sensores como laser range finders, câmeras 2D / 3D, Kinect, sensores de contato, força-torque entre outros.
- Bibliotecas: possui ampla biblioteca com modelos de diferentes ambientes e robôs como PR2, Pioneer2 DX, iRobot Create e TurtleBot.
- Interfaces gráficas e de programação: conta com ferramentas de linha de comando e interfaces gráficas que facilitam a programação e controle da simulação.

No simulador Gazebo é possível testar algoritmos, projetar robôs, realizar testes de regressão e até treinar sistemas de inteligência artificial em cenários realistas. O simulador vem sendo utilizado em diversos projetos de robótica incluindo competições internacionais como Darpa (*Defense Advanced Research Projects Agency*) Robotics Challenge, ARIAC (*Agile Robotics for Industrial Automation Competition*) e RoboCup (*Robot World Cup Initiative*). Alguns exemplos de aplicações do Gazebo são encontradas em trabalhos com drones (CARREIRA, 2013), robôs humanóides (PRATT, 2017; ATMEH et al., 2014), e robôs cooperativos (YAO et al., 2015).

A descrição de um robô no sistema Gazebo pode ser realizada através da modelagem URDF (*Unified Robot Description Format*). Neste modelo, são especificados a dinâmica e cinemática do sistema robótico assim como sensores atuadores acoplados. Através do URDF é possível gerar uma representação visual 3D e um modelo de colisão do robô.

O modelo é criado através de um *script* em formato xml que especifica as configurações do robô. Os principais parâmetros estão relacionadas aos elos e juntas. Para cada elo é possível especificar tamanho, formato, cor e até representação 3D. Além disso é possível especificar propriedades dinâmicas como matriz inercial e de colisão, conforme a Figura 14.

Para cada junta é possível especificar cinemática, dinâmica, e limites de movimento e

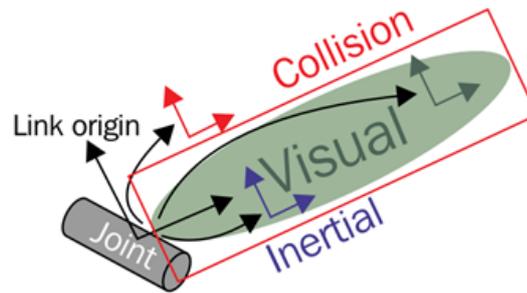


Figura 14 – Configurações do elo (*link*) de um robô no formato URDF.

Fonte – (JOSEPH, 2015)

velocidade. As juntas podem ser configuradas como de revolução, contínua, prismática, fixa, flutuante e planar. Uma junta é formada pela conexão entre dois elos, o primeiro elo é chamado de elo pai (*Parent Link*) e o segundo chamado de elo filho (*Child Link*) conforme ilustrado na Figura 15.

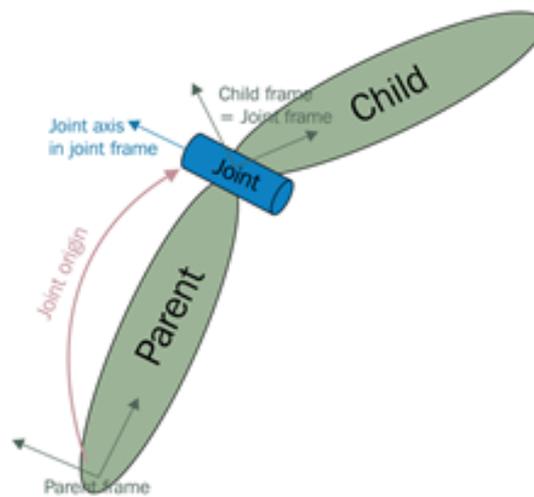


Figura 15 – Configuração da junta (*joint*) de um robô no formato URDF.

Fonte – (JOSEPH, 2015)

## 2.3 Otimização de Rotas

A otimização de rotas consiste na busca por um caminho que percorra todos os pontos desejados com o menor deslocamento possível. Um exemplo clássico relacionado a este tema é o problema do caixeiro viajante, conhecido como *Travelling Salesman Problem* (TSP).

O TSP é um problema que consiste na busca pela menor rota para percorrer uma série de cidades, visitando, uma única vez, cada uma delas e retornando à cidade de origem. Um desenvolvimento histórico completo deste e problemas relacionados pode ser

encontrado em (LAWER et al., 1985), (APPLEGATE, 2006) e (COOK, 2011). Exemplos de aplicações do TSP como na confecção de placas de circuito impresso, transporte de materiais e sequenciamento de máquinas são descritos em (MATAI; SINGH; MITTAL, 2010) e (COTA, 2014).

O problema do caixeiro viajante pode ser formulado de acordo com a teoria dos grafos, onde são definidos dois conjuntos, um composto por vértices e outro por arestas. Os vértices representam os pontos a serem visitados e as arestas são as possíveis ligações entre cada ponto do grafo. Para cada aresta é associado um custo de ligação entre os vértices que pode ser representado pela distância entre eles. Assim, o TSP consiste em determinar uma rota com o menor custo possível onde todos os vértices são visitados uma única vez. Esta rota é conhecida como circuito hamiltoniano (Figura 16).

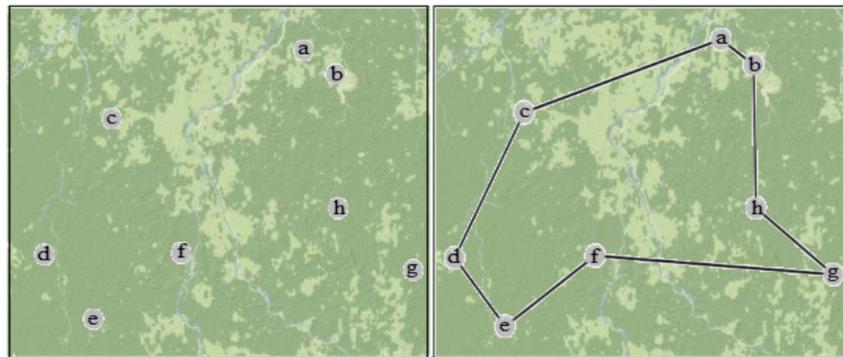


Figura 16 – Exemplo de Circuito Hamiltoniano para  $n=7$  vértices.

Fonte – (SILVA, 2013)

Os custos associados às arestas podem ser representados por uma matriz que indica a distância entre cada vértice. Seja  $n$  o número de vértices, caso a matriz seja simétrica, ou seja, exista um caminho de ida e volta entre cada vértice, haverá  $(n-1)!/2$  circuitos hamiltonianos distintos possíveis. Caso a matriz seja assimétrica o número de circuitos hamiltonianos possíveis passa a ser  $(n-1)!$ . O cálculo do circuito hamiltoniano com o menor custo possível é um problema de difícil resolução devido ao crescimento exponencial de circuitos possíveis de acordo com o número de vértices a serem visitados. Esta característica do TSP o encaixa em problemas de complexidade NP-Difícil (VOS, 2016).

A complexidade de um problema computacional é avaliada pelo consumo de recursos computacionais utilizados para resolvê-lo. De acordo com (COOK, 1971), a complexidade de um problema pode ser dividida em 2 classes principais: P (*Polynomial time*) e NP (*Non-Deterministic Polynomial time*). A classe de complexidade P se refere a problemas que podem ser resolvidos através de funções polinomiais, ou seja, em um tempo polinomial aceitável. A classe NP é composta por problemas onde as instâncias de médio

e grande porte são intratáveis por algoritmos determinísticos devido ao alto consumo computacional requerido. Para o caso do problema do caixeiro viajante, a sua função de complexidade é definida como  $O(n!)$  devido a necessidade de calcular  $(n-1)!$  rotas para conseguir obter uma solução. Considerando um computador de alta velocidade com capacidade de 1 bilhão de adições por segundo, o tempo gasto para calcular, na força bruta, todas as rotas possíveis do TSP, varia de frações de segundo a milhões de anos de acordo com o número de vértices a serem visitados. O comparativo com número de vértices e tempo de processamento pode ser visualizado na Tabela 1. Para uma referência em capacidade de processamento, a máquina virtual utilizada nos testes deste trabalho possui 8 processadores lógicos de 2,4 GHz, 8GB de RAM e apresenta capacidade de aproximadamente 400 milhões de adições por segundo.

Conforme os valores da Tabela 1, para um exemplo com 10 cidades ( $n = 10$ ), o número de rotas possíveis é  $(10-1)! = 362880$  rotas. São necessárias 10 adições para calcular o comprimento total de cada rota. Neste caso, um computador com capacidade 1 bilhão ( $10^9$ ) de adições por segundo consegue calcular  $10^9/10 \approx 100$  milhões de rotas por segundo. Assim, o tempo necessário para calcular todas as rotas possíveis é  $362880 / 100$  milhões  $\approx 0.004$  segundo. Porém, devido ao crescimento exponencial do problema do caixeiro viajante, ao dobrar o número de cidades a serem visitadas ( $n = 20$ ), o tempo necessário para calcular todas as rotas possíveis chega a 77 anos.

Tabela 1 – Explosão combinatória para cálculo de rotas no problema do caixeiro viajante utilizando um computador com capacidade de 1 bilhão de adições por segundo.

$n$	Capacidade de cálculo em rotas por segundo	Rotas possíveis $(n - 1)!$	Tempo necessário para cálculo de todas as rotas possíveis
5	200 milhões	24	< 0,001 seg
10	100 milhões	362.880	0.004 seg
15	67 milhões	87 bilhões	22 minutos
20	50 milhões	$1,2 \times 10^{17}$	77 anos
25	40 milhões	$6,2 \times 10^{23}$	492 milhões de anos

Para resolver o problema do caixeiro viajante existem algoritmos exatos e aproximados. Devido a grande complexidade do TSP, existem uma variedade de heurísticas que encontram valores próximos ao ótimo, porém com uma complexidade de processamento bastante reduzida. Já os métodos exatos encontram a menor rota possível, porém, pelo fato de utilizarem maior poder computacional, atingem soluções em tempo aceitável so-

mente até um número limitado de instâncias.

A seguir são demonstrados alguns exemplos de algoritmos aproximados - *heurística do vizinho mais próximo* e *algoritmo genético* - e um algoritmo exato - Concorde TSP Solver - para resolver o problema do caixeiro viajante. Outros exemplos de técnicas para a resolução do TSP e suas variantes são encontradas em (CHAVES et al., 2007; FREITAS, 2009; SOUZA, 2010).

- Vizinho Mais Próximo

A heurística do vizinho mais próximo (GAVETT, 1965; SOLOMON, 1987; KURZ, 2011) constrói uma rota através da inclusão sequencial de pontos que estão mais próximos ao último ponto escolhido. A partir de um ponto de origem, as distâncias para os outros pontos do grafo são comparadas e o ponto mais próximo é escolhido. O procedimento se repete com o novo ponto escolhido até que todos os pontos tenham sido visitados (Algoritmo 1).

---

#### Algoritmo 1 - Heurística do Vizinho mais Próximo

---

```

1: função VIZINHO_MAIIS_PRÓXIMO(Matriz de distâncias D, Ponto inicial s)
2:   para i = 0 até n-1 faça
3:     Visitado [i] = falso
4:   fim para
5:   Rota[0] = s (inicializa rota com s)
6:   Visitado[s] = verdadeiro
7:   Ponto_atual = s
8:   para i = 1 até n-1 faça
9:     Na linha (Ponto_atual) de D encontre o menor elemento na coluna j que ainda
     não foi visitado
10:    Ponto_atual = j
11:    Visitado[j] = verdadeiro
12:    Rota[i] = j
13:   fim para
14:   Adiciona s ao fim do caminho devolve Rota
15: fim função

```

---

- Algoritmo Genético

O algoritmo genético é uma heurística de otimização baseada nos princípios de seleção natural e reprodução genética (CHATTERJEE; CARRERA; LYNCH, 1996). O algoritmo inicia o processo de busca a partir de um conjunto de configurações denominado *população inicial* que pode ser obtido aleatoriamente ou através de heurísticas construtivas simples. Neste caso a população inicial é gerada através da heurística do vizinho mais próximo. A partir da população corrente, novas populações são obtidas através de operadores de

seleção, reprodução e mutação. O objetivo é encontrar novas configurações (populações) de melhor qualidade, ou seja, rotas com menor distância, a cada iteração até atingir um critério de parada conforme demonstrado no pseudocódigo em algoritmo 2.

---

### Algoritmo 2 - Algoritmo Genético

---

```

1: função ALGORITMO_GENETICO(Matriz de distâncias D, Ponto inicial s)
2:   Gera população inicial (rota) através da heurística do vizinho mais próximo
3:   enquanto  $i < \text{Max\_iteracoes}$  ou valor da rota não se modificou faça
4:     Reprodução da população
5:     Mutação da população
6:     Seleciona a menor rota como pai da nova geração
7:   fim enquanto devolve Rota
8: fim função

```

---

- Concorde TSP Solver

O *Concorde TSP Solver* (APPLEGATE et al., 2006) já foi reconhecido em (HAHSLER; HORNIK, 2007; HOOS; STÜTZLE, 2014) como o melhor algoritmo exato para resolução do problema do caixeiro viajante, chegando a resolver problemas com até 85900 cidades. O algoritmo utiliza o método *Branch and Cut* (PADBERG; RINALDI, 1990) que é baseado em 2 técnicas diferentes, *Branch and Bound* e *cutting planes*.

O *Branch and Bound* (LAND; DOIG, 1960) se baseia no uso de limites (superior e inferior) e uma enumeração inteligente das soluções candidatas à solução ótima do problema. Os limites superiores representam o maior valor que a solução ótima poderia atingir e são obtidos por heurísticas eficientes que produzem soluções de boa qualidade em um curto tempo. Os limites inferiores são obtidos pela relaxação do problema, removendo uma ou mais restrições. A enumeração inteligente atua, em cada etapa, dividindo o problema maior em vários problemas menores mais fáceis de serem resolvidos. Assim, o conjunto de soluções dos problemas menores resultam numa solução viável para o problema original. Este processo de divisão em problemas menores se repete até que o limite inferior seja igual ao superior ou que a melhor solução encontrada até o momento seja menor do que o limite inferior. Essa abordagem é conhecida como ramificação (*branching*), onde cada nó é representado por um problema maior e os nós descendentes pelos problemas menores.

A técnica *cutting plane* (DANTZIG; FULKERSON; JOHNSON, 1954) é utilizada nas situações em que a remoção de restrições através da relaxação não resulta em problemas com solução ótima viável. Assim, através da adição de restrições ao problema, o algoritmo *cutting plane* utiliza inequações lineares, chamadas de *cut* para refinar, a cada iteração, o conjunto viável de soluções.

### 3 METODOLOGIA

O problema abordado neste trabalho é o carregamento autônomo de explosivos, o qual consiste na inserção autônoma de explosivos em furos realizados na região de desmonte de minério. Tradicionalmente, o carregamento de explosivos requer uma equipe especialista e um veículo preparado para transporte dos materiais relacionados à detonação. Na região de desmonte, o operador localiza e insere uma mangueira no furo de detonação e o carregamento de explosivos é feito por uma bomba que, através da mangueira, transporta os explosivos do veículo para dentro do furo. Por último, o operador monta o detonador e insere o dispositivo de detonação no furo como observado na Figura 17 (MENDES, 2010).



Figura 17 – Operador inserindo dispositivos de detonação no furo de forma manual.

Fonte – (DESMONTEC, 2012)

Neste trabalho é proposto a emulação de um carregamento de explosivos, onde parte das atividades que seriam executadas pela equipe treinada são realizadas por uma plataforma móvel equipada com um braço manipulador. Assim, as atividades que a plataforma deve executar são: navegar até a região do furo evitando colisões com obstáculos no caminho, identificar a posição do furo e utilizar o manipulador para inserir uma mangueira no furo. Um diagrama da metodologia proposta em alto nível pode ser observada na Figura 18.

A solução proposta de navegação e manipulação autônomas foi validada através de testes simulados e com robô real em ambientes controlados. Para efeitos de simplificação nos testes reais, é assumido que o furo de detonação é representado por um círculo no chão. A inserção da mangueira no furo e descarregamento de explosivos são representados pelo posicionamento do efetuador do braço sobre o círculo.

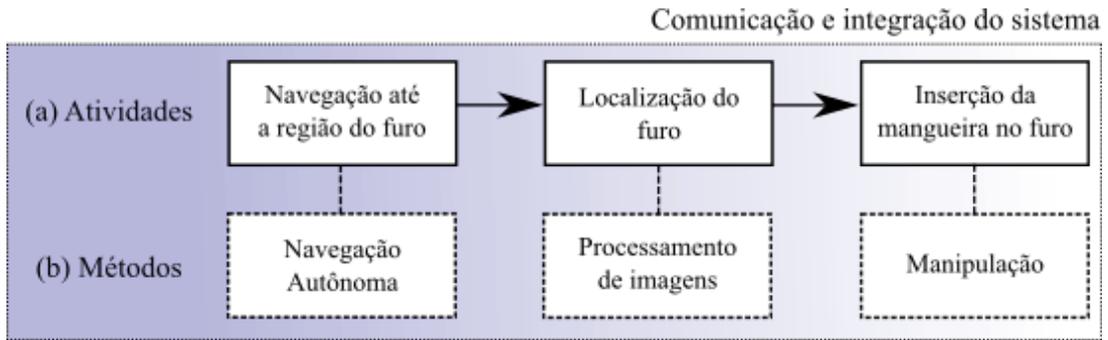


Figura 18 – Diagrama de alto nível da metodologia proposta: (a) Descrição das atividades executadas no teste de conceito e (b) métodos aplicados para realizar as atividades associadas.

### 3.1 Componentes do Sistema

Foi utilizada a plataforma móvel comercial Seekur Jr equipada com um braço manipulador Schunk Powerball de seis graus de liberdade (Figura 19). Para integrar e controlar o sistema via software foi utilizado o ROS (Robot Operation System).



Figura 19 – Robô usado como base da implementação: Seekur Jr, equipado com braço manipulador *Schunk Powerball*.

#### 3.1.1 Plataforma Móvel

O Seekur Jr se locomove pelo método de derrapagem (*skid-steering*) através de quatro rodas fixas com acionamento diferencial feito por dois motores reversíveis. A plataforma integra os seguintes dispositivos que auxiliam na autonomia do robô:

- *Laser range finder* SICK LMS-111;
- Câmera PTZ RVision SEE;
- Câmera estéreo MobileRanger C3D;
- Unidade de Medição Inercial;
- GPS AgGPS 372;
- Roteador sem fio WRAP;
- Sensores de toque (bumpers).

O Seekur Jr possui uma arquitetura em duas camadas, composta por um microcontrolador e um computador embarcados. O microcontrolador opera o firmware "SeekurOS" que funciona como uma interface para a comunicação com os dispositivos da plataforma. O computador opera com o sistema operacional "Ubuntu 12.04" e utiliza softwares que enviam comandos para os dispositivos do robô através da interface "SeekurOS" (Figura 20)

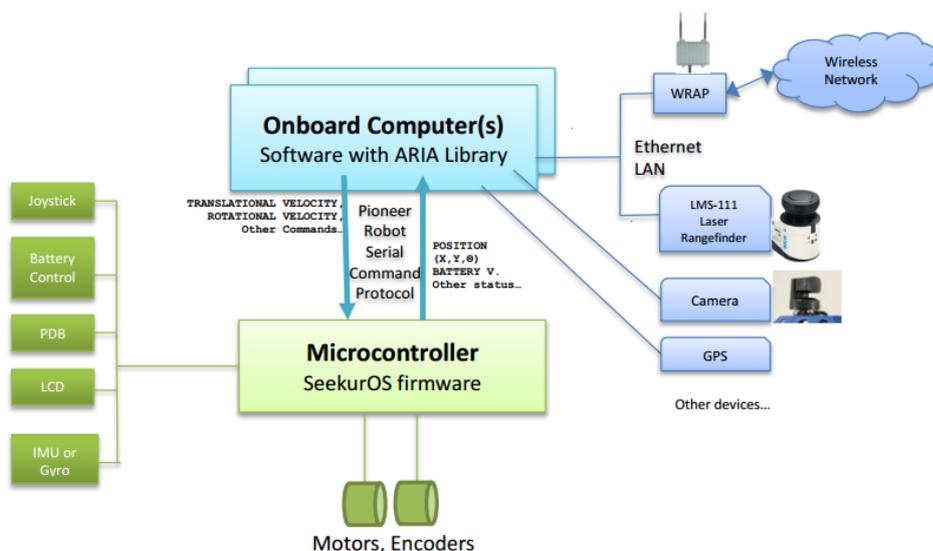


Figura 20 – Arquitetura do Seekur Jr.

### 3.1.2 Braço Manipulador

O *Schunk Powerball LWA 4P* é um braço robótico de 6 graus de liberdade. O dispositivo é constituído por três juntas compactas denominadas módulos ERB que integram 2 servoatuadores de 1 grau de liberdade juntamente com seus circuitos de controle e potência. O sistema de potência embarcado possui alimentação de 24VCC e dispensa a necessidade de um inversor externo. O manipulador possui um posicionamento preciso devido a utilização de reduções *harmonic drive* de folga zero, tornando-o ideal para ta-

refas robóticas de alta precisão (MEMAR; ESFAHANI, 2015). O braço é equipado com um efetuador de 1 grau de liberdade e um sensor de força e torque FTM 75.

### 3.1.3 Software

Os softwares fornecidos de fábrica pela plataforma comercial são baseados no sistema ARIA. Porém, neste trabalho foi utilizado o ROS (Robot Operation System), um sistema de código aberto que fornece ferramentas e aplicações para controle de robôs e sensores (JOSEPH, 2015). As principais vantagens do sistema ROS estão na sua arquitetura modular voltada para um processamento distribuído e paralelo, na grande quantidade de bibliotecas disponíveis e no suporte oferecido em uma comunidade ativa de usuários e desenvolvedores do sistema.

## 4 CARREGAMENTO AUTÔNOMO DE EXPLOSI- VOS

### 4.1 Simulações em Ambientes Não Estruturados

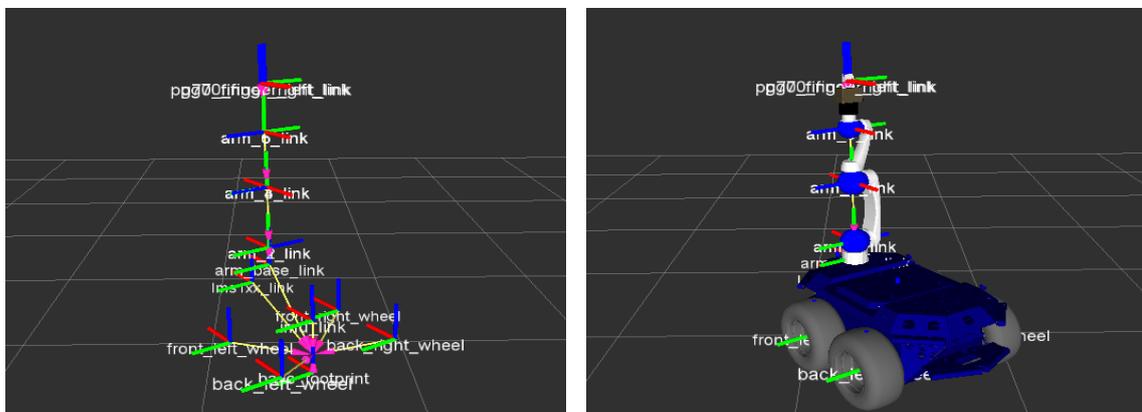
A implementação prática deste trabalho foi realizada com testes em laboratório. Para a tarefa de navegação autônoma, foi realizado um trabalho adicional de simulação em ambientes não estruturados. De acordo com (MASON, 2012) ambientes não estruturados são aqueles que não foram preparados ou planejados para a utilização do robô e que não possuem regularidades que o robô possa explorar para cumprir sua tarefa.

A simulação é uma ferramenta importante para emular situações não acessíveis ao experimento prático. Com um simulador bem projetado, é possível realizar testes rápidos em cenários realistas, economizando tempo e custos de implementação.

O sistema ROS, utilizado para implementação prática deste trabalho, possui uma conexão direta com o simulador GAZEBO, uma plataforma gratuita capaz de renderizar robôs em ambientes 3D não estruturados.

#### 4.1.1 Simulações no Gazebo

Para realizar as simulações no Gazebo, as configurações de toda a plataforma Seekur Jr foram descritas no formato URDF. Primeiramente foram configuradas as conexões entre elos e juntas. Conforme a Figura 21 (a), cada junta configurada gera um sistema de coordenadas utilizado para referenciar a posição do robô. Posteriormente as outras propriedades como inércia, colisão e elementos 3D foram adicionados para obter uma simulação mais realista com respeito a dinâmica e visualização do robô (Figura 21(b)).



(a) Sistemas de coordenadas gerado a partir da cinemática do robô definida no URDF. (b) Modelo completo com propriedades cinemáticas, dinâmicas e visualização 3D.

Figura 21 – Modelo URDF da plataforma Seekur Jr.

O modelo gerado para o Seekur Jr foi inserido em um ambiente virtual no Gazebo. O ambiente escolhido para realizar os testes possui um relevo semelhante a uma mina de céu aberto (Figura 22).



Figura 22 – Simulação em ambiente não estruturado no Gazebo.

A simulação no Gazebo foi utilizada para situações que não poderiam ser reproduzidas em laboratório como a navegação do robô em uma frente de lavra com a presença de diversos furos de detonação. Esta situação foi simulada para avaliar algoritmos de otimização que buscam melhores rotas para o carregamento de explosivos.

#### 4.1.2 Otimização de Rotas

A tarefa alvo deste trabalho é o carregamento de explosivos para desmonte de minério. Para realizar o desmonte são utilizados diversos furos de detonação. A ordem em que os furos são carregados pode impactar na produtividade do processo. Dessa forma, foi desenvolvido um algoritmo para otimizar a sequência de carregamento dos furos.

Os furos podem ser distribuídos na frente de lavra conforme diferentes geometrias. Segundo Silva (2009), as geometrias de malhas de perfuração são classificadas em quadrada, retangular, estagiada, triângulo equilátero e malha alongada (Figura 23). A aplicação de cada malha está relacionada a características como facilidade de perfuração, tipo de rocha e aproveitamento da energia do explosivo. A Vale por exemplo, utiliza na mina de minério de ferro em Carajás a malha estagiada triângulo equilátero, com aproximadamente sete metros de distância entre furos, devido ao grande aproveitamento da energia do explosivo.

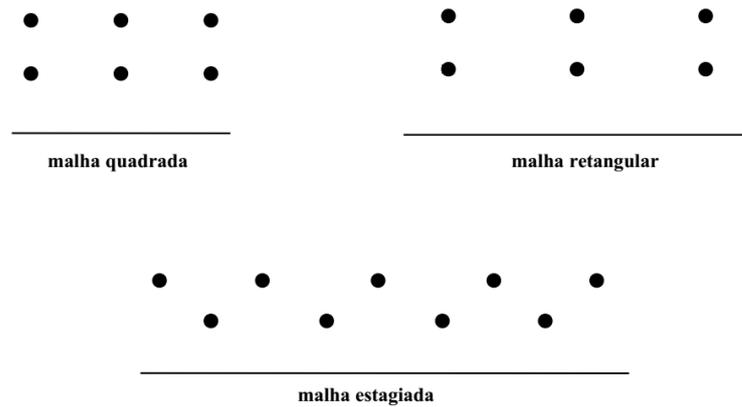


Figura 23 – Exemplos de geometria em malhas de perfuração.

Fonte – (SILVA, 2009)

A localização correta do furo é de grande importância no planejamento de fogo para se obter a fragmentação de rocha desejada. As abordagens tradicionais envolvem o uso de um topógrafo para indicar onde a perfuratriz deve atuar. Atualmente, as perfuratrizes mais modernas são equipadas com tecnologias de posicionamento baseado em satélite como GPS, Glonass, Beidou e Galileo (MINING, 2016). Em uma aplicação de campo, as coordenadas dos furos, indicadas via satélite, podem ser utilizadas para identificá-los no mapa gerado por um robô/equipamento de mineração projetado especificamente para a realização dessa tarefa. Entretanto, nas simulações deste trabalho, a malha de furos é gerada no mapa de forma manual para que os algoritmos de otimização de rotas sejam validados.

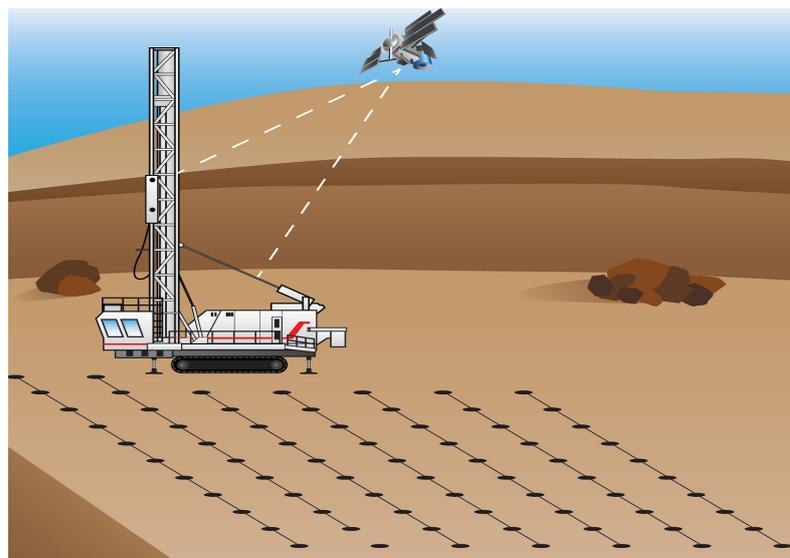


Figura 24 – Perfuração de alta precisão baseada em sistemas de posicionamento por satélite.

Fonte – (MINING, 2016)

A necessidade de visitar diversos furos com o menor deslocamento possível foi analisada como o problema do cacheiro viajante, conhecido como *Travelling Salesman Problem* (TSP). Para resolver o problema do caixeiro viajante existem algoritmos exatos e heurísticas. As heurísticas são algoritmos com baixa complexidade que encontram rapidamente soluções aproximadas ao ótimo. Já os métodos exatos garantem uma solução ótima, porém, atingem soluções em tempo aceitável somente até um número limitado de instâncias.

Em alguns exemplos de plano de fogo disponibilizados pela Vale, a malha de perfuração chega a ser composta por até 210 furos. Dessa forma, é importante que o problema do caixeiro viajante seja resolvido para instancias de até  $n = 210$  vértices. Assim, devido a complexidade que 210 instâncias podem representar, neste trabalho foram avaliados 3 algoritmos, sendo 2 métodos aproximados *heurística do vizinho mais próximo* e *algoritmo genético* e um método exato *branch and cut* baseado na biblioteca de Concorde.

A implementação dos algoritmos foi realizada através de um pacote criado no ROS: *move\_base\_interface*. A simulação do robô no Gazebo é utilizada para gerar um mapa do ambiente não estruturado. No mapa são indicadas manualmente as posições dos furos. O algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) é utilizado para calcular a trajetória com desvio de obstáculos entre todos os furos indicados. As distâncias das trajetórias calculadas são computadas em uma matriz. O ponto considerado como início da rota é definido como a posição atual do robô. A matriz de distâncias e o ponto inicial são utilizados para iniciar os algoritmos que buscam uma rota que passa por todos os furos indicados com o menor deslocamento possível. Por último, o Seekur Jr navega até a posição de cada furo de acordo com a sequência da rota encontrada.

O pacote criado se comporta conforme os passos a seguir:

1. Recebe os pontos dos furos localizados no mapa;
2. Planeja trajetória com desvio de obstáculos entre todos os pontos e gera uma matriz de distâncias;
3. Considera a posição atual do robô como ponto de origem;
4. Calcula a menor rota de acordo com os algoritmos: vizinho mais próximo, algoritmo genético e algoritmo de Concorde;
5. Executa a trajetória com menor rota.

Os algoritmos utilizados para mapear o ambiente reproduzido pelo Gazebo, localizar o robô, planejar trajetórias com desvio de obstáculo e executar navegação de forma autônoma foram os mesmos utilizados na implementação prática deste trabalho e serão demonstrados na próxima seção.

## 4.2 Teste de Conceito

O teste de conceito para o problema de carregamento autônomo de explosivos pode ser dividida em cinco etapas: (i) Comunicação com o sistema, (ii) Navegação autônoma, (iii) Detecção do furo, (iv) Planejamento e controle do braço manipulador e (v) Integração do sistema (Figura 18b).

### 4.2.1 Comunicação com o Sistema

A comunicação e controle do sistema foi feita via ROS através de pacotes adaptados para o Seekur Jr. Cada pacote possui uma funcionalidade específica no sistema, desde *drivers* de comunicação até algoritmos de planejamento de trajetórias. O processamento de dados do sistema foi dividido em duas máquinas, um computador embarcado e outro externo. A visualização e comandos para o sistema foi feita através do computador externo utilizando a rede sem fio do Seekur Jr.

### 4.2.2 Navegação Autônoma

A navegação autônoma foi utilizada para levar a plataforma até a região do furo. Para realizar essa tarefa, o sistema precisa mapear o ambiente, traçar uma rota até as coordenadas do furo e executar a trajetória desviando de obstáculos. Essa atividade foi realizada através de um conjunto de pacotes do ROS (*Navigation Stack*) que juntos planejam e controlam a trajetória do robô. Um diagrama sobre o funcionamento do *Navigation Stack* pode ser observado na Figura 25.

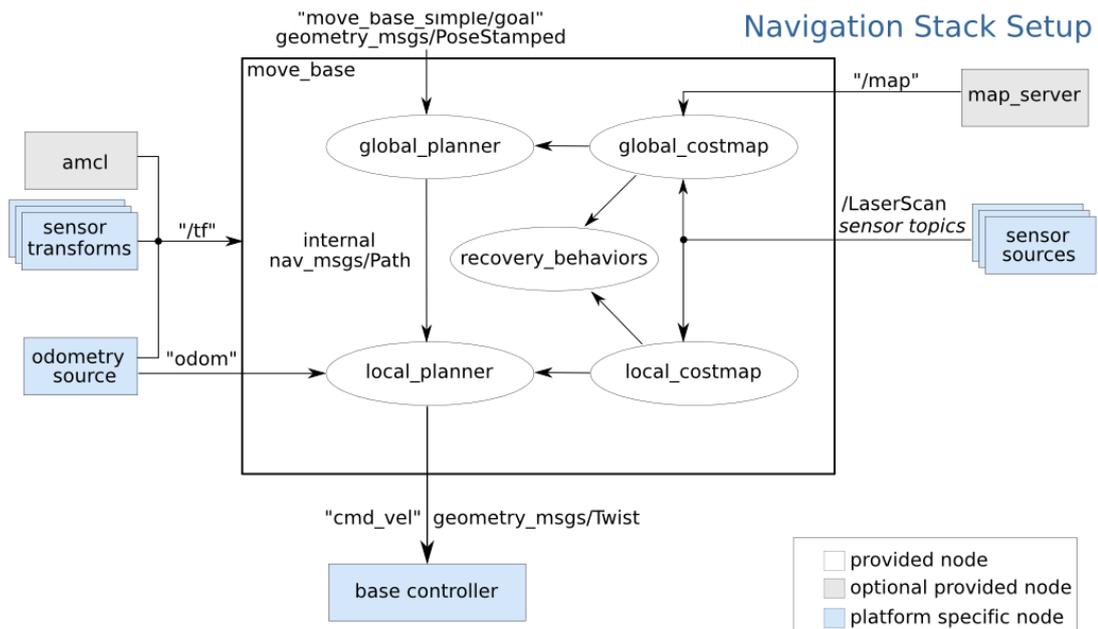


Figura 25 – Estrutura do conjunto de pacotes ROS para navegação (*Navigation Stack*).

Os principais pacotes utilizados foram:

- *p2os\_driver*: driver para acionamento dos motores da plataforma móvel através de comandos de velocidade (/cmd\_vel). Disponibiliza interface para teleoperação através de teclado ou *joystick*.
- *lms1xx*: lê os valores de ângulo e distância fornecidos pelo laser e publica no tópico /LaserScan.
- *GMapping*: utiliza o método SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) para mapear o ambiente e localizar o 'Seekur Jr' no mapa (/map).
- *move\_base*: planeja e controla trajetórias para navegação autônoma com desvio de obstáculos.

Usando o mapa gerado pelo pacote *Gmapping*, o *move\_base* cria uma trajetória para a plataforma se locomover entre um ponto inicial e final com desvio de obstáculos. O pacote utiliza um planejador global e local para atingir sua tarefa de navegação.

A trajetória do ponto inicial ao final é feita pelo planejador global que se baseia no algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959). O algoritmo busca a rota com o menor custo entre dois vértices dentro de um grafo. Uma vez escolhido o vértice inicial, o algoritmo calcula o custo mínimo deste vértice para todos os demais vértices do grafo (Algoritmo 3).

---

### Algoritmo 3 - Algoritmo de Dijkstra

---

```

1: função DIJKSTRA(Grafo G, no_inicial s)
2:   para cada  $v \in V[G]$  faça
3:      $dist[v] \leftarrow infinito$ 
4:      $antecessor[v] \leftarrow indefinido$ 
5:   fim para
6:    $dist[s] \leftarrow 0$ 
7:    $Q \leftarrow V[G]$ 
8:   enquanto  $Q \neq 0$  faça
9:      $u \leftarrow$  nó em Q com menor  $dist[ ]$ 
10:    remove u de Q
11:    para cada vizinho v de u faça
12:       $alt \leftarrow dist[u] + dist\_entre(u, v)$ 
13:      se  $alt < dist[v]$  então
14:         $dist[v] \leftarrow alt$ 
15:         $antecessor[v] \leftarrow u$ 
16:      fim se
17:    fim para
18:  fim enquanto
19: fim função

```

---

A trajetória global é utilizada como referência para planejar a trajetória local que, além de seguir para o ponto final, também desvia de obstáculos. O planejador local se baseia no algoritmo *Trajectory Rollout* que se comporta de acordo com os passos a seguir:

1. Realiza amostragem discreta de velocidades  $(d_x, d_\theta)$  no espaço de controle da plataforma;
2. Para cada velocidade amostrada, realiza a simulação de avanço a partir do estado atual da plataforma para prever o que aconteceria se a velocidade amostrada fosse aplicada durante algum período de tempo (Figura 26);
3. Avalia (pontua) cada trajetória resultante da simulação direta, utilizando uma métrica que incorpora características como: proximidade de obstáculos, proximidade do ponto final, proximidade da trajetória global e velocidade da plataforma. Descarta as trajetórias que colidem com obstáculos;
4. Escolhe a trajetória de maior pontuação e envia a velocidade associada para a plataforma móvel.

As velocidade linear  $(d_x)$  e de rotação  $(d_\theta)$  são publicadas no tópico `"/cmd_vel"` e então enviadas para o robô através do pacote `p2os_driver`.

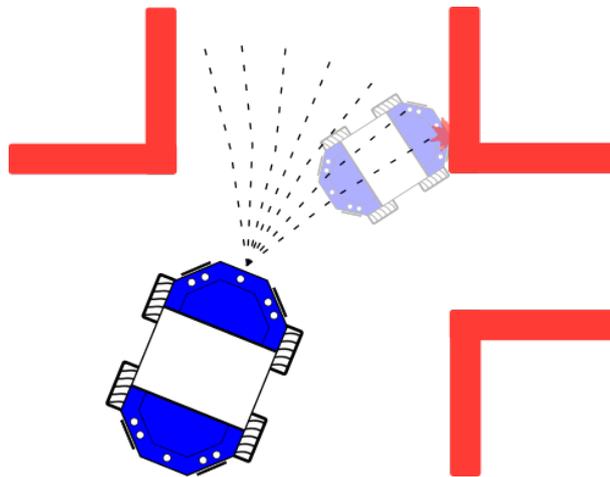


Figura 26 – Simulação de avanço das velocidades amostradas.

Para visualizar o mapa, o planejamento de trajetória e o controle do robô no sistema ROS foi utilizado a ferramenta RVIZ, conforme ilustrado na Figura 27.

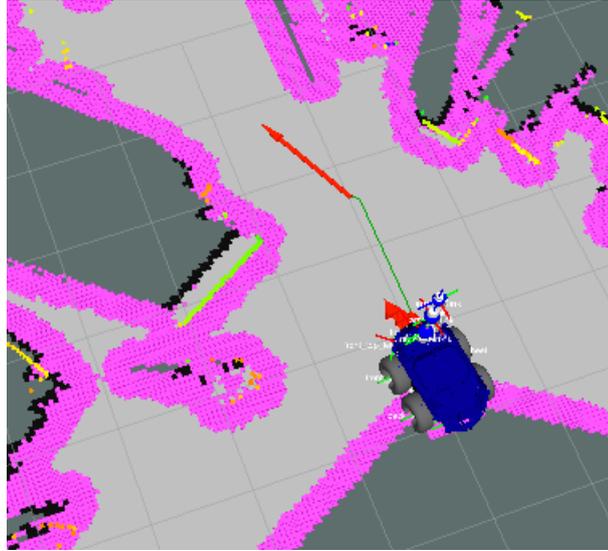


Figura 27 – Navegação autônoma: planejamento de trajetória em um ambiente com obstáculos.

#### 4.2.3 Detecção do Furo

O processamento digital de imagens foi utilizado para localizar a posição do furo com respeito à plataforma. Para isso, o sistema precisa identificar formas circulares ou elípticas e calcular a que distância elas se localizam com respeito ao sistema de coordenadas da plataforma.

Essa tarefa foi feita a partir das imagens obtidas pela câmera estéreo acoplada no robô (MobileRanger C3D). O software de processamento das imagens do par estéreo é constituído por um driver que utiliza a biblioteca *OpenCV* para calcular o mapa de disparidade e fornecer as imagens RGB das câmeras. Na imagem RGB é aplicado um algoritmo de detecção de círculos e elipses; o algoritmo se baseia em uma estratégia de seleção de arcos candidatos para formar elipses e no uso de transformadas Hough (FORNACIARI; PRATI; CUCCHIARA, 2014). O mapa de disparidade é utilizado para calcular a distância dos pontos da imagem onde um círculo ou elipse foi detectado.

Quando a câmera estéreo detecta um círculo ou elipse, é estimado, mediante uma média móvel de 5 valores, o centroide da elipse e a distância desse centroide até a câmera pelo mapa de disparidade. A média móvel é usada para minimizar o erro proveniente de ruído ao estimar a posição real do furo; a quantidade de amostras da média foi obtida empiricamente mediante tentativa e erro. Estes valores, juntamente com a altura do laser com respeito ao furo, são utilizados para calcular a posição deste com respeito ao sistema de coordenadas do robô, conforme a Figura 28.

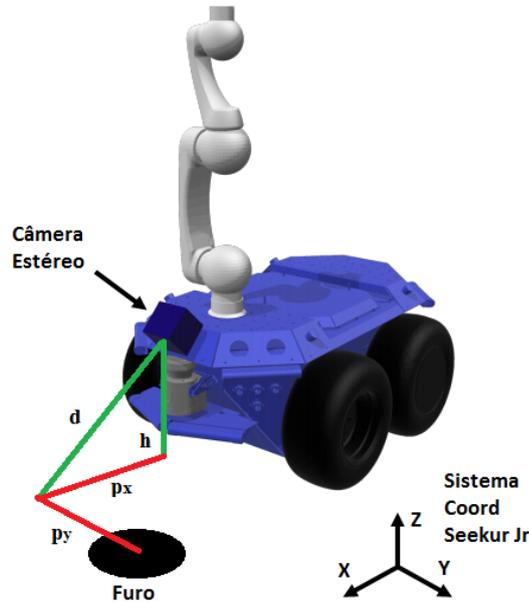


Figura 28 – Posição  $(p_x, p_y)$  do furo com respeito ao sistemas de coordenadas do robô.

O eixo  $Y$  do sistema de coordenadas do robô possui origem no centro da plataforma, onde está localizada a câmera estéreo. Para conhecer a posição do centro do furo observado no mapa de disparidade, com respeito ao eixo  $Y$  do robô  $(p_y)$ , foi aplicada uma técnica de interpolação linear. Foram amostrados coordenadas do mapa de disparidade e comparados manualmente com a medida de distância real até origem do eixo  $Y$  do robô. Finalmente as distâncias reais foram interpoladas e são usadas como referência para os algoritmos de planejamento (Figura 29).

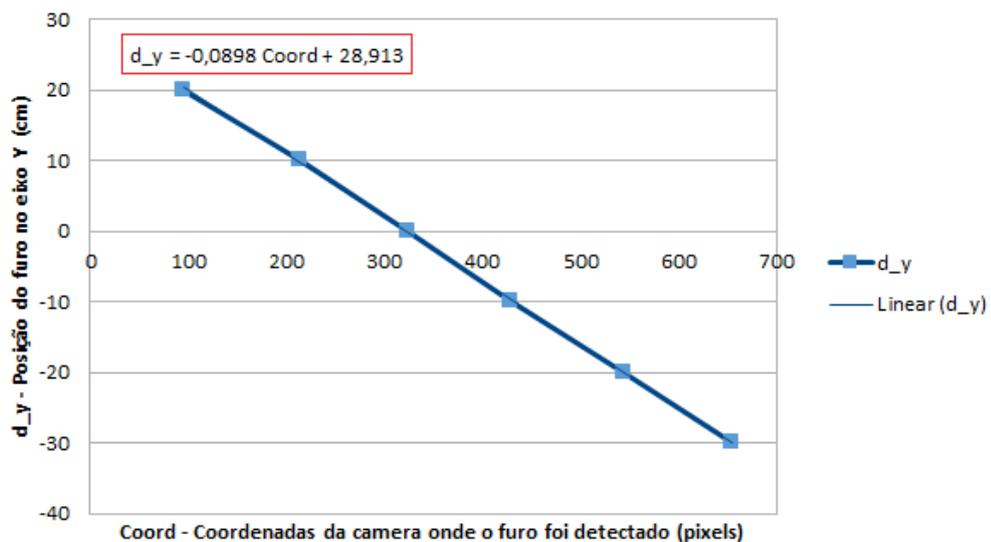


Figura 29 – Interpolação dos valores de coordenadas da câmera estéreo (Coord) e distância do furo com respeito ao eixo  $Y$  do Seekur Jr ( $d_y$ ).

A posição do furo no eixo  $X$  ( $p_x$ ) é calculada através da relação de um triângulo retângulo  $p_x = \sqrt{d^2 - h^2}$ , onde  $h$  é altura do laser no eixo  $Z$  e  $d$  é a distância do furo calculada pela câmera.

#### 4.2.4 Planejamento e Controle do Braço Manipulador

O braço manipulador foi usado para emular a inserção da mangueira no furo onde são carregados os explosivos. A emulação da atividade consiste em receber as coordenadas do furo e finalmente planejar e executar uma trajetória até essa locação de forma que o efetuador esteja orientado na direção vertical apontando para baixo. Para realizar essa atividade foram utilizados os seguintes pacotes:

- *schunk robotics*: driver e controlador do braço *Schunk*. O controlador atua no espaço das juntas utilizando interpolação pelo método *spline*.
- *MoveIt!*: planeja trajetória com desvio de obstáculos e envia para o controlador do braço *Schunk*. Fornece interface gráfica e uma variedade de algoritmos de planejamento de trajetória com desvio de obstáculos.
- *seekurjr\_description*: descreve o 'Seekur Jr' no formato URDF (*Unified Robot Description Format*).

O planejamento de trajetória é realizado pelo pacote *MoveIt!*, o qual gera uma sequência de pontos que o manipulador deve seguir. O pacote fornece uma interface gráfica de manipulação e algumas bibliotecas de planejamento de trajetória como *Rapidly Exploring Random Treed* (RRT) e *Probabilistic Roadmap Approach* (PRM), conforme a Figura 30 .

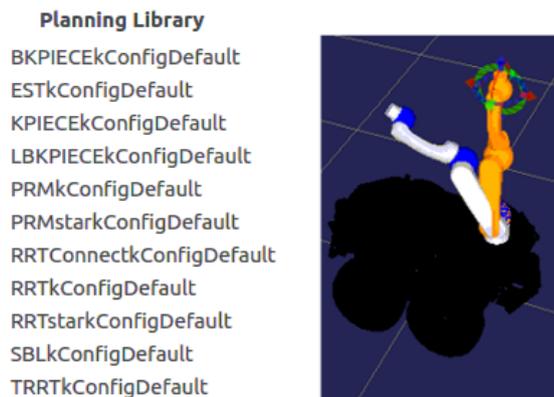


Figura 30 – Manipulação autônoma: interface gráfica e bibliotecas disponíveis no pacote *Moveit!*.

O algoritmo utilizado foi o RRT (KUFFNER; RRT-CONNECT, 2000). O RRT busca uma trajetória entre dois pontos, dentro de uma árvore de configurações do braço, que

não colida com obstáculos. A árvore é construída através da adição de pontos aleatórios que pertencem ao espaço de configurações e satisfazem as restrições do manipulador (Algoritmo 4).

---

**Algoritmo 4 - Rapidly Exp. Random Tree**


---

```

1: função GERAR_RRT( $x_{inic}$ ,  $K$ ,  $\Delta T$ )
2:   para  $k=1$  até  $K$  faça
3:      $x_{aleat} \leftarrow Config\_Aleatoria()$ 
4:      $x_{prox} \leftarrow Vizinh\_mais\_prox(x_{aleat}, \mathcal{T})$ 
5:      $u \leftarrow Selec\_Entrada(x_{aleat}, x_{prox})$ 
6:      $x_{novo} \leftarrow Novo\_Estado(x_{prox}, u, \Delta T)$ 
7:      $\mathcal{T}.adic\_vertice(x_{novo})$ 
8:      $\mathcal{T}.adic\_aresta(x_{novo}, x_{prox}, x_u)$ 
9:   fim para
10:  devolve  $\mathcal{T}$ 
11: fim função

```

---

A trajetória gerada é enviada para o controlador do manipulador. O controlador utiliza o método *spline* para interpolar os pontos e executar a trajetória. O pacote *seekurjr\_description* é utilizado para a construção da matriz de conflitos do *Moveit!*. Através do modelo 3D do robô, é calculada a trajetória para o manipulador de forma que ele não atinja a sua própria estrutura ou a plataforma.

Em situações reais de desmonte de rochas com explosivos, os furos de detonação possuem em média 25cm de diâmetro. Considerando que a mangueira utilizada para inserir os explosivos no furo possui cerca de 12cm de diâmetro, a folga do posicionamento entre mangueira e furo é de aproximadamente 13cm.

#### 4.2.4.1 Espaço de Trabalho

O espaço ou volume de trabalho de um manipulador é a região que pode ser alcançada por seu efetuador para realizar um trabalho pré-definido. O cálculo dessa região ou volume é baseado na cinemática direta do sistema.

Um exemplo de modelo cinemático do braço *Schunk* é demonstrado por (MEMAR; ESFAHANI, 2015). O modelo é padronizado de acordo com o método de *Denavit-Hatzenberg* (D-H) (Figura 31). Os parâmetros padronizados D-H são especificados na Tabela 2.

A aplicação realizada neste trabalho utiliza o braço manipulador *Schunk* fixado sobre a plataforma móvel Seekur Jr. Além disso, o braço é equipado com um efetuador e um sensor de força e torque. Dessa forma, o modelo cinemático do sistema deve considerar dois membros adicionais: a estrutura do Seekur Jr e o conjunto efetuador/sensor de torque.

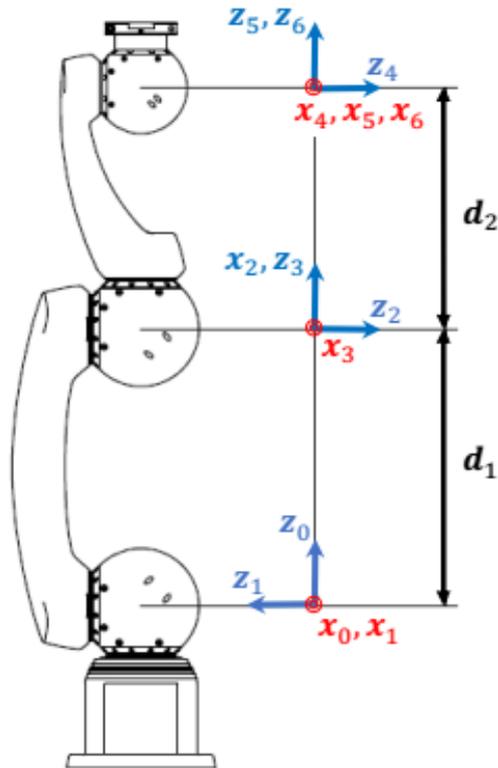


Figura 31 – Modelo cinemático do manipulador *Schunk* de acordo com padronização *Denavit-Hatenberg*.

Fonte – (MEMAR; ESFAHANI, 2015)

Tabela 2 – Parâmetros *Denavit-Hatenberg* para o braço *Schunk*

Elo	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$\pi/2$	0	$q_1$
2	0.350 m	$\pi$	0	$q_2 + \pi/2$
3	0	$\pi/2$	0	$q_3 + \pi/2$
4	0	$-\pi/2$	0.305 m	$q_4$
5	0	$\pi/2$	0	$q_5$
6	0	0	0	$q_6$

Fonte – (MEMAR; ESFAHANI, 2015)

Assim, o modelo cinemático resultante pode ser visualizado na Figura 32. São utilizados 4 sistemas de coordenadas ( $E_0, E_1, E_2, E_3$ ) para representar um sistema composto por 4 elos rígidos ( $L_0, L_1, L_2, L_3$ ) conectados por 6 juntas rotativas ( $J_1, J_2, J_3, \dots, J_6$ ).

A posição do efetuador com respeito aos diferentes sistemas de coordenadas ( $P_{E_0}, P_{E_1}, P_{E_2}$  e  $P_{E_3}$ ) é calculada através da cinemática direta. O conjunto de matrizes de rotação utilizado pertence ao grupo especial ortonormal de dimensão 3 ( $SO(3)$ ) e considera  $\alpha_i$  e  $\beta_i$ ,

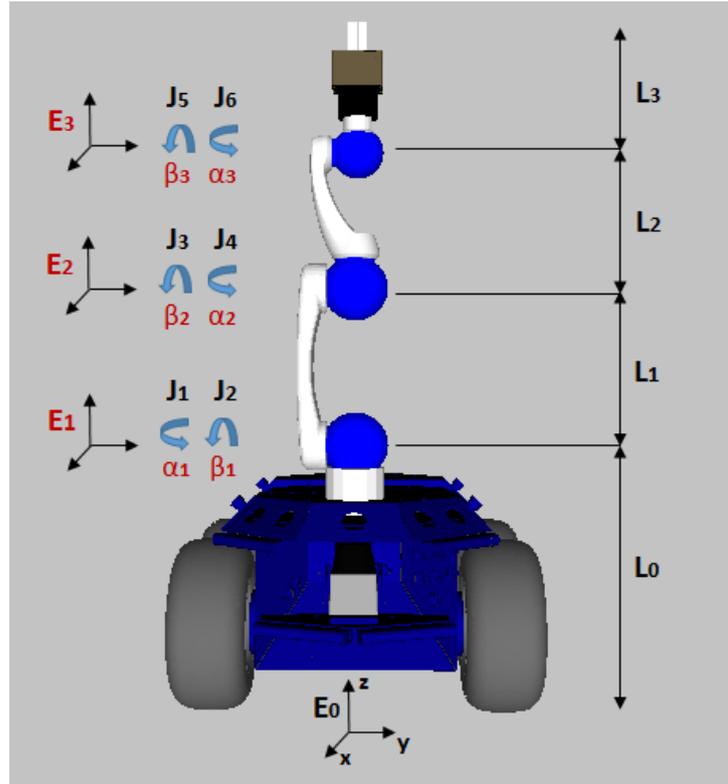


Figura 32 – Modelo cinemático utilizado para calcular espaço de trabalho do manipulador *Schunk*.

respectivamente, como ângulo de rotação elementar nos eixo z e y do sistema de coordenadas  $E_i$ .

$$R_{01} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$R_{12} = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & 0 & \sin \beta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_1 & 0 & \cos \beta_1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$R_{23} = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & 0 & \sin \beta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_2 & 0 & \cos \beta_2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$R_{34} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$R_{45} = \begin{bmatrix} \cos \beta_3 & 0 & \sin \beta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_3 & 0 & \cos \beta_3 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$R_{56} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$P_{E3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_3 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$P_{E2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_2 \end{bmatrix} + (R_{45} \cdot R_{56}) \cdot P_{E3} \quad (4.8)$$

$$P_{E1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_1 \end{bmatrix} + (R_{23} \cdot R_{34}) \cdot P_{E2} \quad (4.9)$$

$$P_{E0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_0 \end{bmatrix} + (R_{01} \cdot R_{12}) \cdot P_{E1} \quad (4.10)$$

Através da iteração de diferentes configurações das juntas no modelo cinemático proposto consegue-se determinar as possíveis posições do efetuador com respeito ao sistema inercial ( $P_{E0}$ ). O conjunto das possíveis posições do efetuador, obtido pela equação 4.10, representa o espaço de trabalho do manipulador.

O cálculo do espaço de trabalho foi realizado no software *MATLAB*. Conforme algoritmo demonstrado no APÊNDICE A, a nuvem de pontos que representa as possíveis posições do efetuador é plotada no formato de um polígono ou envelope convexo. O polígono resultante representa o espaço tridimensional que o efetuador pode atingir considerando que o manipulador se encontra fixado sobre a plataforma móvel, conforme a Figura 33.

O espaço de trabalho do manipulador é restrito pela estrutura da plataforma e do próprio braço. Além disso, a metodologia utilizada neste trabalho envolve o uso de uma câmera estéreo para indicar o ponto objetivo de manipulação. Dessa forma, o espaço de trabalho é reduzido à região capturada pela câmera, localizada na parte frontal do robô.

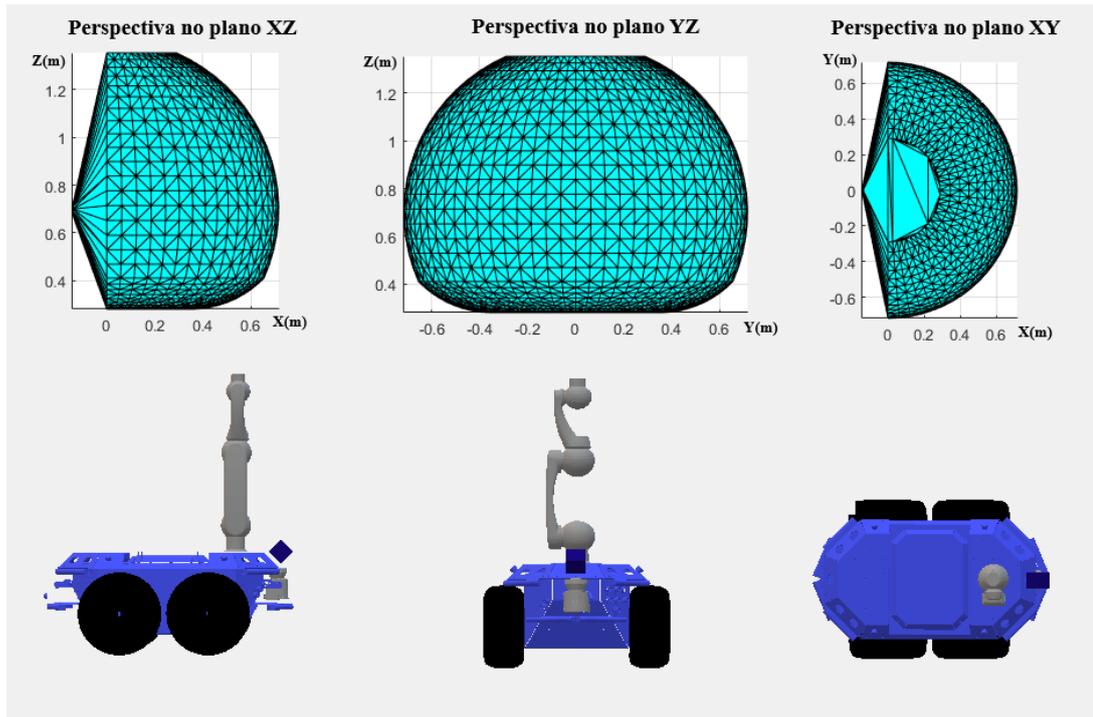


Figura 33 – Espaço de trabalho projetado para o manipulador nas perspectivas XZ, YZ e XY.

#### 4.2.5 Integração do Sistema

Para executar tarefas de navegação e manipulação de forma totalmente autônoma, os sistemas de navegação, processamento de imagens e manipulação foram integrados para funcionar conjuntamente.

Antes de iniciar o processo, um mapeamento prévio do ambiente é realizado. A leitura do laser planar somada a valores de odometria são utilizadas em algoritmos SLAM para, simultaneamente, mapear o laboratório e indicar a posição do robô.

A emulação do carregamento autônomo de explosivos é iniciada quando a posição do furo é indicada no mapa. Os processos de navegação e processamento de imagens são iniciados simultaneamente, porém, a manipulação é acionada somente depois que o robô atinge o ponto final de navegação desejado. A partir deste momento, a posição do círculo ou elipse detectada no processamento de imagens é considerada como a posição final desejada para o efetuador do braço *Schunk*. Assim, utilizando uma interface com o *Moveit!*, o sistema calcula a cinemática inversa da posição desejada e busca trajetórias para o manipulador utilizando o algoritmo RRT. Ao encontrar uma trajetória, o braço inicia o movimento e se posiciona com o efetuador sobre o círculo ou elipse detectado.

As diferentes etapas do processo são conectadas através do sistema ROS. Cada atividade é executada em um pacote específico que se comunica com o resto do sistema através de tópicos ou serviços. O sequenciamento das atividades é realizado por meio da publicação em tópicos específicos das informações necessárias para o início de cada tarefa. Os requisitos iniciais para a navegação autônoma são: mapa do ambiente, localização do robô, leitura do laser planar e indicação do ponto objetivo de trajetória. A próxima etapa, o cálculo da posição do furo, exige a confirmação de proximidade ao furo e valores de disparidade do furo provenientes das etapas de navegação e processamento de imagens respectivamente. Por último, o processo de manipulação é iniciado quando a posição do furo com respeito a plataforma é calculada. Uma visão geral sobre os principais processos implementados no ROS pode ser visualizada na Figura 34.

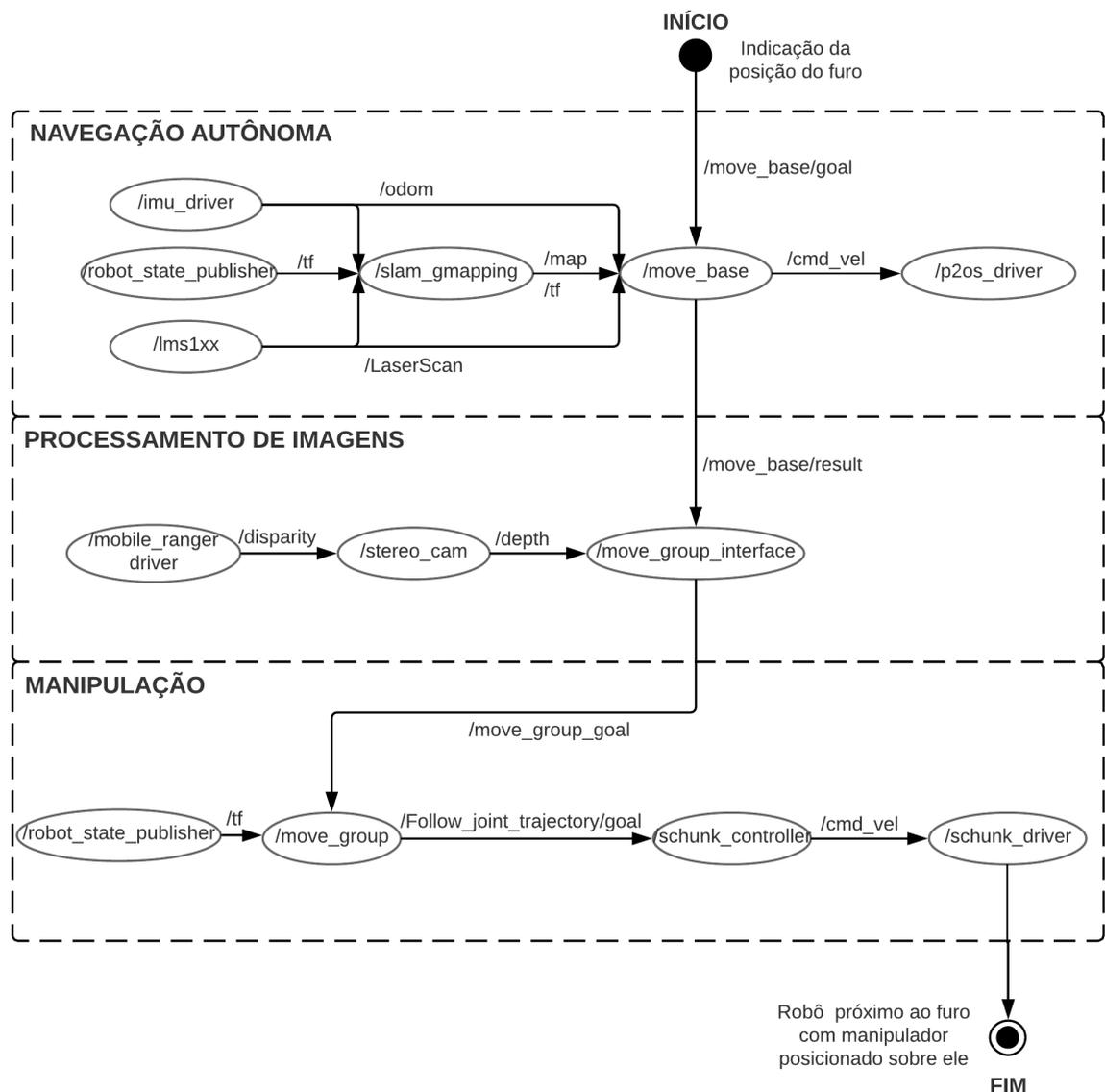


Figura 34 – Visão geral sobre os principais processos implementados no ROS para integrar as diferentes etapas: navegação autônoma, processamento de imagens e manipulação.

A integração do sistema foi realizada para executar a tarefa alvo, carregamento de explosivos, de forma totalmente autônoma. Conforme ilustrado na Figura 35, após mapeamento do ambiente, a indicação da posição do furo inicia o sistema que tem como saída o robô localizado próximo ao furo com o manipulador posicionado sobre ele.

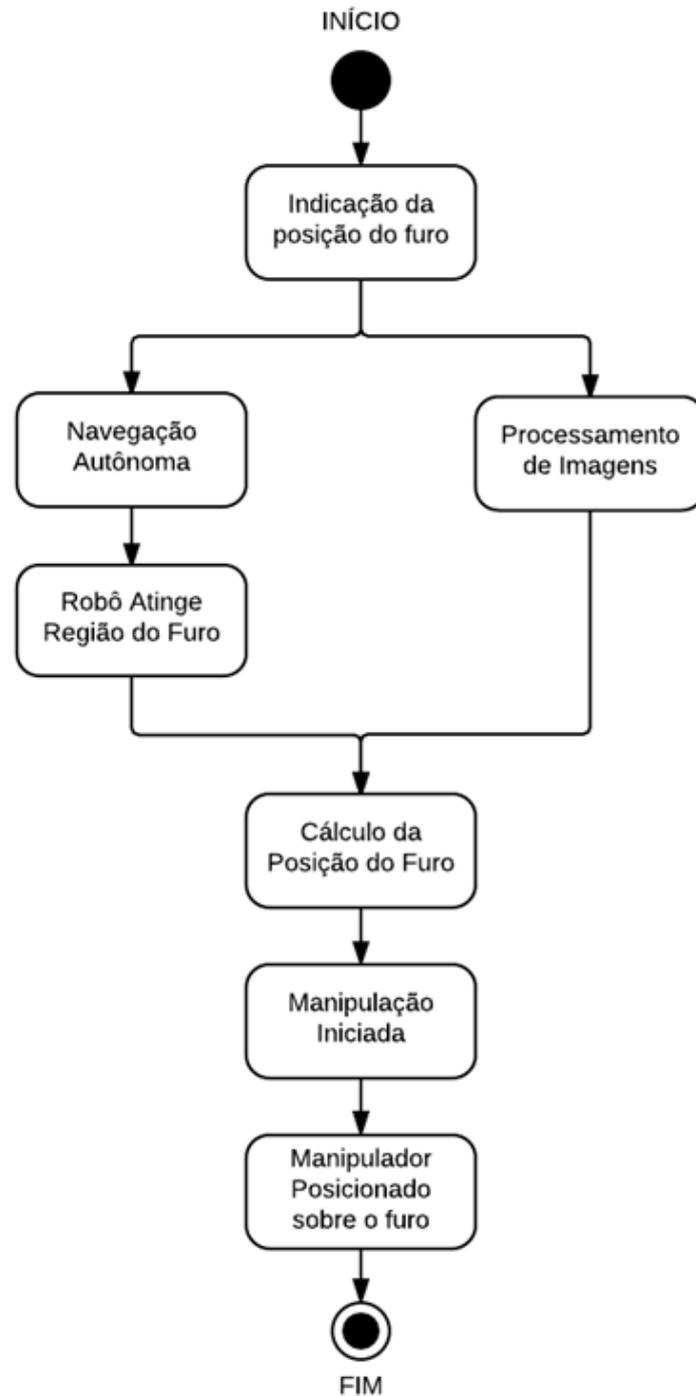


Figura 35 – Integração do Sistema: etapas realizadas de forma autônoma para simular o carregamento de explosivos em laboratório.

## 5 RESULTADOS

Os resultados deste trabalho são apresentados em uma abordagem *top-down* dividida em simulação e experimento prático. A simulação é utilizada para uma situação global, onde o robô navega em um ambiente com diversos furos e utiliza algoritmos de otimização para encontrar e executar uma rota que passe por todos os furos com o menor deslocamento possível. Já a aplicação prática é direcionada para um problema local, onde o robô integra navegação, processamento de imagens e manipulação para emular o carregamento de explosivos em um único furo de detonação.

### 5.1 Simulação - Otimização de Rotas

O *software* Gazebo foi utilizado para simular um ambiente não estruturado onde foram inseridos diversos furos de detonação. A otimização de rotas, executada pelo pacote *move\_base\_interface*, foi aplicada para buscar e executar a rota com o menor deslocamento possível entre os furos. A distribuição e quantidade de furos utilizadas nas simulações foram baseadas em um histórico de planos de fogo disponibilizado pela Vale. De acordo com o material analisado, a quantidade de furos varia aproximadamente de 30 a 210 unidades. Para efeitos de demonstração da metodologia implementada foi utilizado inicialmente um exemplo com 10 furos. Posteriormente são apresentados os resultados para escalas maiores.

Uma vez iniciada a simulação no Gazebo, a primeira etapa é o mapeamento do ambiente com o laser planar. No mapa gerado pode ser visualizado os efeitos da presença de obstáculos e da inclinação do ambiente (Figura 36).

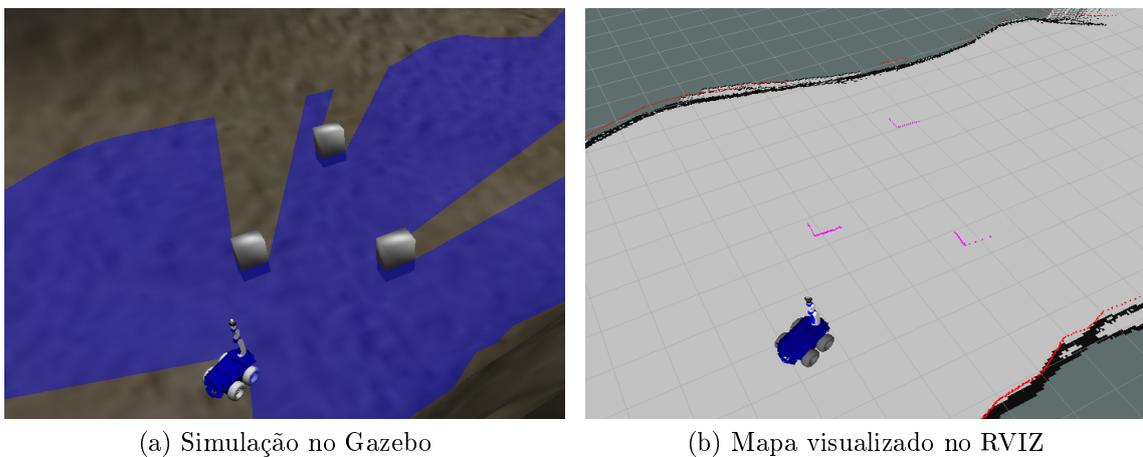


Figura 36 – Mapeamento do ambiente não estruturado com obstáculos.

A indicação da posição dos furos é realizada de forma manual. Ao clicar no mapa, as coordenadas do local clicado são gravadas. Os furos são numerados de acordo com a

ordem clicada e, para efeitos de visualização, são marcados sobre o mapa. A marcação é feita através da publicação de mensagens do tipo `visualization_msgs::MarkerArray` em um tópico no ROS que envia as informações para o RVIZ. A geometria de distribuição dos furos aplicada segue o modelo malha estagiada triângulo equilátero, também utilizada pela Vale. A posição atual do robô é identificada como posição 0 (Figura 37).

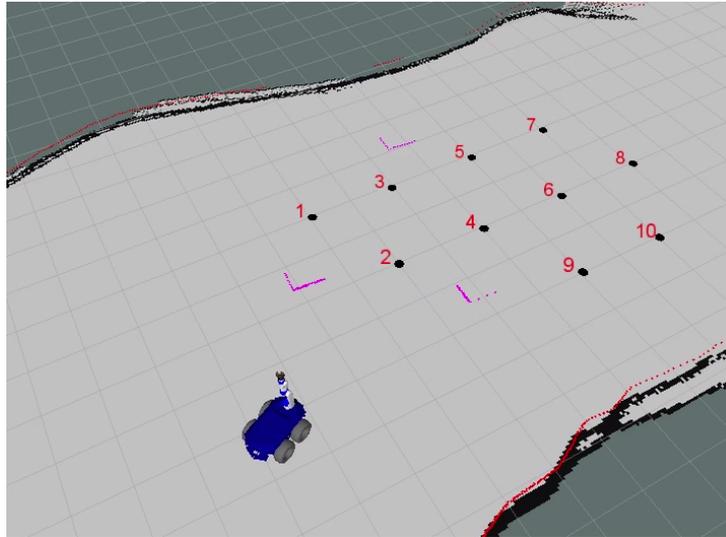


Figura 37 – Localização e numeração de furos no mapa.

Após a indicação da posição dos furos no mapa gerado, o algoritmo implementado executa 3 tarefas: calcula a distância entre os furos; encontra o menor caminho para visitar todos os furos uma única vez; e executa as trajetórias de acordo com a rota calculada.

O cálculo da distância entre os furos é baseado no algoritmo de planejamento de trajetória Dijkstra, o mesmo implementado nos testes reais. Para cada par de furos é planejado uma trajetória com desvio de obstáculos. O resultado do planejamento de trajetória é um conjunto de pontos que o robô deve passar para navegar de um furo ao outro. Assim, a distância entre os furos é dada pelo somatório da distância euclidiana entre todos os pontos da trajetória calculada. Os valores calculados são utilizados para formar uma matriz de distâncias. A diagonal principal da matriz possui valor zero enquanto os outros valores representam as distâncias, considerando o desvio de obstáculos, entre os  $n$  pontos que a compõem (Figura38).

O cálculo da rota é realizado com 3 algoritmos diferentes, sendo 2 aproximados *heurística do vizinho mais próximo*, *algoritmo genético* e 1 exato *Concorde*. Todos os algoritmos recebem como entrada os mesmos argumentos: a posição inicial (posição do robô) e a matriz de distâncias dos furos. Os valores obtidos por cada algoritmo são comparados e a menor rota é executada pelo robô (Figura 39).

```

Pontos Clicados:
Ponto 0: (-0.48, 0.29)
Ponto 1: (3.93, -2.04)
Ponto 2: (1.89, -3.01)
Ponto 3: (3.87, -4.03)
Ponto 4: (1.90, -5.02)
Ponto 5: (3.88, -6.06)
Ponto 6: (1.87, -7.04)
Ponto 7: (3.91, -8.04)
Ponto 8: (1.96, -9.07)
Ponto 9: (-0.03, -6.05)
Ponto 10: (-0.08, -8.03)

Matriz de distancias:
0.00  5.38  4.12  6.15  5.88  7.76  7.82  9.42  9.87  6.60  8.44
5.38  0.00  2.35  2.05  3.64  4.10  5.44  6.04  7.36  5.71  7.24
4.12  2.35  0.00  2.27  2.05  3.71  4.02  5.44  6.10  3.65  5.41
6.15  2.05  2.27  0.00  2.23  2.10  3.63  4.04  5.44  4.47  5.65
5.88  3.64  2.05  2.23  0.00  2.27  2.04  3.63  4.10  2.27  3.64
7.76  4.10  3.71  2.10  2.27  0.00  2.24  1.98  3.59  3.95  4.45
7.82  5.44  4.02  3.63  2.04  2.24  0.00  2.30  2.10  2.19  2.23
9.42  6.04  5.44  4.04  3.63  1.98  2.30  0.00  2.25  4.48  4.03
9.87  7.36  6.10  5.44  4.10  3.59  2.10  2.25  0.00  3.66  2.34
6.60  5.71  3.65  4.47  2.27  3.95  2.19  4.48  3.66  0.00  2.00
8.44  7.24  5.41  5.65  3.64  4.45  2.23  4.03  2.34  2.00  0.00

```

Figura 38 – Coordenadas dos furos inseridos no mapa e matriz de distâncias calculada.

```

Vizinho mais proximo - Solucao: 92.61
0 --> 2 --> 4 --> 6 --> 8 --> 7 --> 5 --> 3 --> 1 --> 9 --> 10 --> 0

Algoritmo Genetico - Solucao: 28.51
0 --> 2 --> 4 --> 6 --> 9 --> 10 --> 8 --> 7 --> 5 --> 3 --> 1 --> 0

Concorde - Solucao: 28.51
0 --> 1 --> 3 --> 5 --> 7 --> 8 --> 10 --> 9 --> 6 --> 4 --> 2 --> 0

Navegacao:
Ponto 1: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 3: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 5: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 7: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 8: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 10: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 9: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 6: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 4: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 2: Trajetoria executada com sucesso
Ponto 0: Trajetoria executada com sucesso

```

Figura 39 – Resultados gerados pelos algoritmos propostos de otimização de rotas.

Apenas para demonstração visual dos resultados obtidos, a ordem de visita aos pontos da menor rota encontrada é marcada sobre o mapa através de mensagens *visualization\_msgs::MarkerArray* onde segmentos de reta são utilizados para ligar os pontos de acordo com a ordem calculada (linha azul na Figura 40).

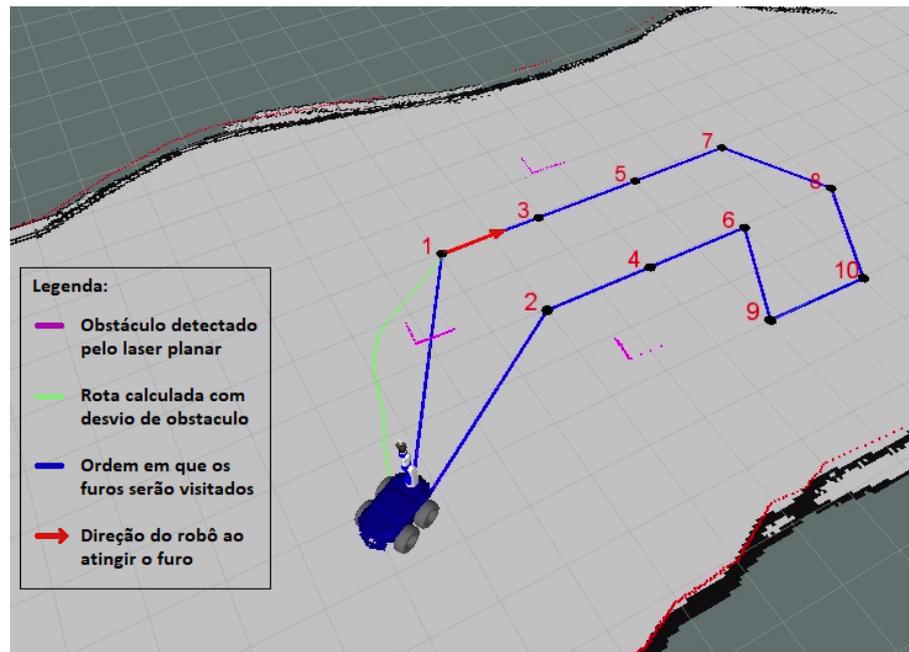


Figura 40 – Demonstração visual (linha azul) da ordem de navegação dos furos.

Conforme demonstrado nas Figuras 40 e 41, após calcular a menor rota possível, o robô inicia a execução da rota com desvio de obstáculos e com orientação sempre apontada para o próximo furo. Este direcionamento é aplicado através da função arco-tangente entre as coordenadas do ponto ou furo atual e o próximo. Dessa maneira, o robô evita gastos de energia em rotação quando for se deslocar para o próximo furo.

Por último, o sistema executa a rota calculada. O robô segue a ordem de furos previamente planejada conforme a Figura 41.

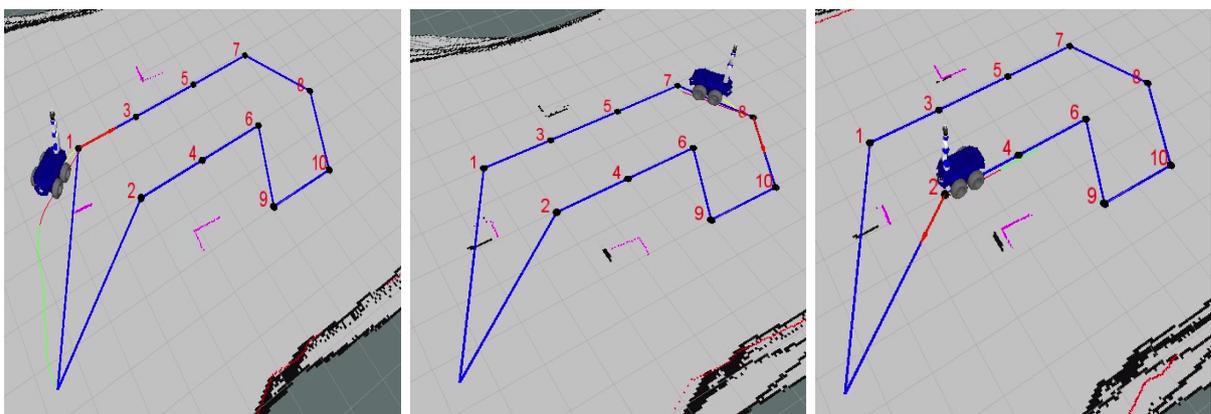


Figura 41 – Navegação Autônoma do Seekur Jr em direção aos furos de acordo com a rota calculada.

Para verificar o desempenho do algoritmo e aplicação do mesmo em diferentes situações, foram simulados ambientes com geometria semelhante ao padrão utilizado pela vale

conforme pode ser observado na Figura 42.

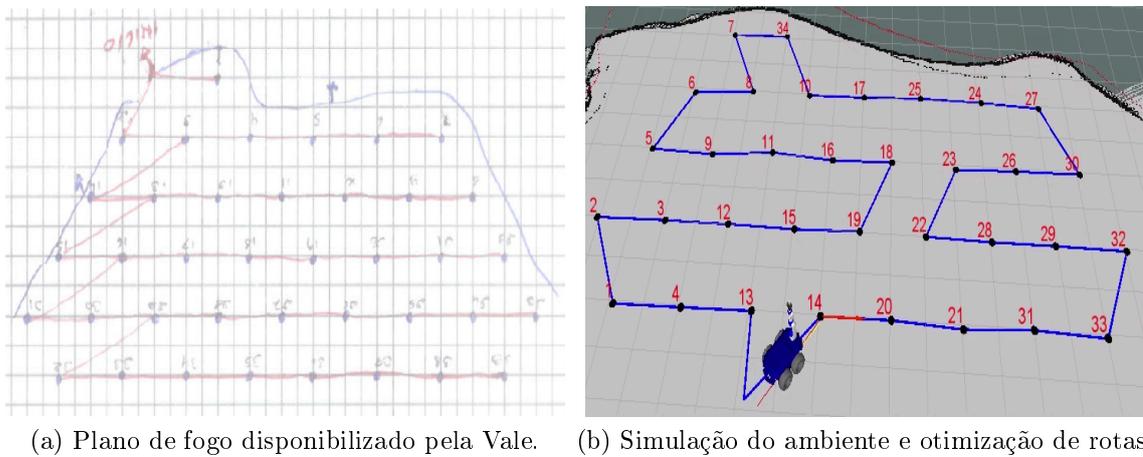


Figura 42 – Comparativo da simulação de ambiente com furos distribuídos conforme exemplo de plano de fogo disponibilizado pela Vale.

De acordo com a amostra de planos de fogo disponibilizada pela Vale, a quantidade de furos em uma frente de lavra varia de 30 a 210 unidades. Foram analisadas situações com 30, 60, 90, 150 e 210 furos. Exemplos de visualização dos resultados são demonstrados na Figura 43.

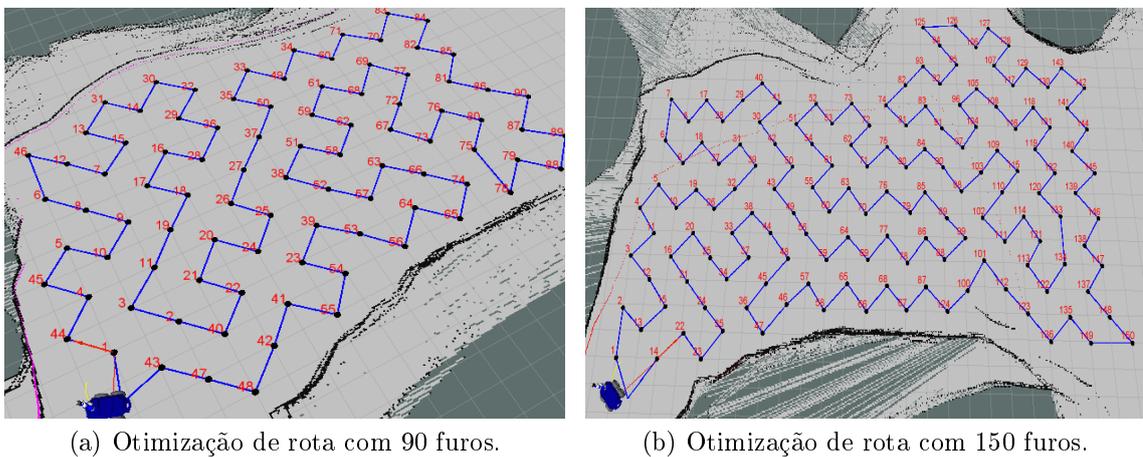


Figura 43 – Otimização de rota para malhas de perfuração com grande quantidade de furos.

Devido a complexidade do problema do caixeiro viajante, foram avaliados o desempenho dos algoritmos de otimização propostos com respeito ao comprimento da rota encontrada e o tempo necessário para calculá-la, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados de simulações com os algoritmos de otimização propostos.

Numero de furos	Rota calculada por algoritmo (metros)			Tempo de cálculo (segundos)			
	Vizinho mais próximo	Algoritmo genético	Concorde	Matriz de distâncias	Vizinho mais próximo	Algoritmo genético	Concorde
30	264,75	48,68	47,09	16,01	< 0,01	0,34	0,69
60	2827,93	88,59	85,63	71,05	< 0,01	0,82	0,71
90	5589,20	142,34	127,36	132,56	< 0,01	1,54	0,87
150	4409,71	216,91	200,72	508,09	< 0,01	3,70	2,39
210	8592,35	316,15	279,53	1017,85	< 0,01	7,63	6,33

Os testes foram conduzidos em uma máquina virtual com 8 processadores lógicos de 2.4 GHz, 8GB de memória RAM e capacidade de de aproximadamente 400 milhões de adições por segundo.

- Tempo para Cálculo da Matriz de Distâncias

Em problemas de otimização do caixeiro viajante, a matriz de distâncias é um valor dado, de forma que a preocupação maior está na complexidade do algoritmo de otimização. Entretanto, neste caso, a matriz de distâncias é calculada através de algoritmos de planejamento de trajetória com desvio de obstáculos. Esta tarefa demonstrou um crescimento exponencial de acordo com o número de furos.

Conforme demonstrado no exemplo da Figura 44, devido ao fato da matriz ser espelhada, a medida em que o número de furos cresce a quantidade de distâncias a serem calculadas aumenta de acordo com a soma dos termos de uma progressão aritmética com primeiro termo e razão iguais a 1.

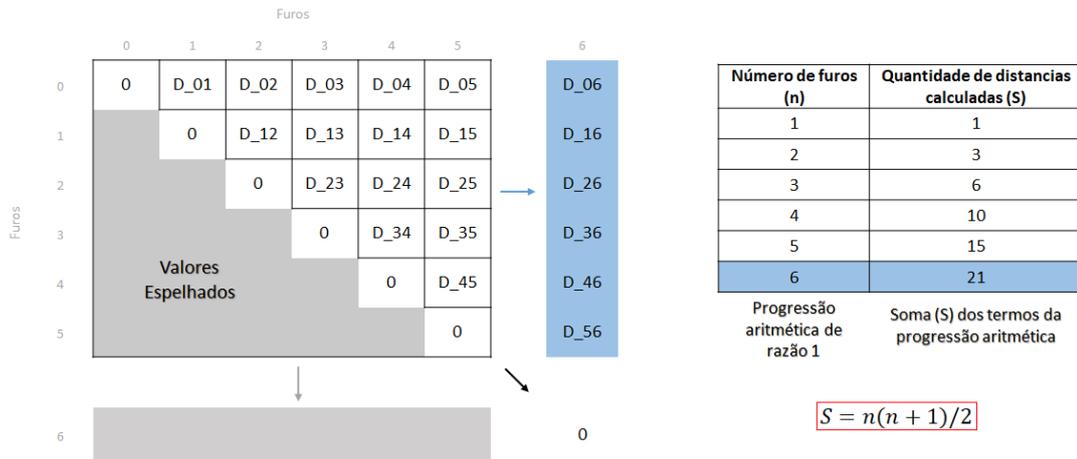


Figura 44 – Quantidade de elementos calculados em uma matriz de distâncias.

Utilizando os resultados demonstrados na Tabela 3, foi gerado um gráfico para demonstrar o crescimento do tempo para calcular a matriz de distâncias em comparação com o somatório de uma progressão aritmética de razão e primeiro termo iguais a 1 (Figura 45).

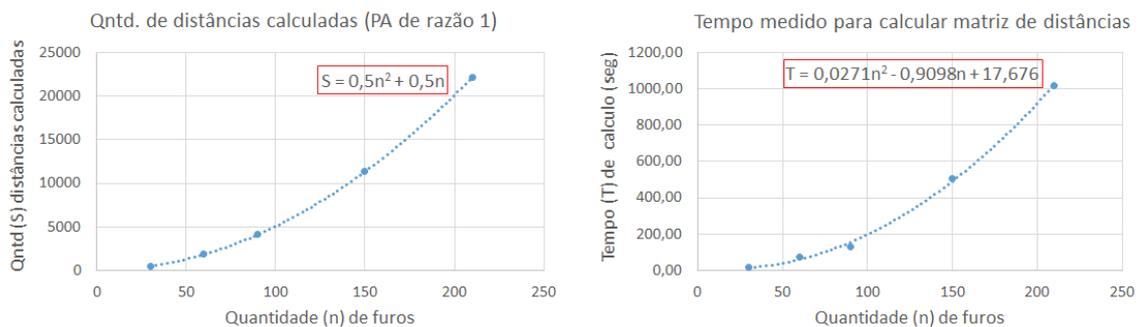


Figura 45 – Relação entre quantidade de operações e tempo necessário para calcular matriz de distâncias.

De acordo com a linha de tendência demonstrada na Figura 45, o tempo necessário para calcular matrizes de distância cresce de forma proporcional ao quadrado do número de furos a serem visitados.

Para situações acima de 210 furos, o tempo para calcular a matriz de distâncias pode chegar a valores inviáveis. Entretanto, devido a necessidade de paradas, como exemplo, para abastecimento, manutenção ou recarga, o robô não teria capacidade de executar, continuamente, rotas com mais de 210 furos. Assim, a metodologia proposta para otimização de rotas demonstra aplicabilidade e eficácia nos resultados.

- Resultados dos Algoritmos de Otimização

Durante os testes foi possível verificar que a heurística do vizinho mais próximo demonstra bons resultados em geometrias de distribuição semelhantes a Figura 16, onde há uma grande variação nas distâncias entre os pontos e o caminho ótimo é composto por apenas uma linha de ida e outra de volta. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3, o vizinho mais próximo apresenta resultados rápidos, porém, devido as distâncias próximas entre os furos da geometria aplicada, o algoritmo encontra caminhos que cruzam o gráfico diversas vezes resultando em rotas com valor muito acima do ótimo.

O algoritmo genético utiliza o vizinho mais próximo como base, entretanto, através dos processos de mutação o algoritmo consegue evitar cruzamentos de trajetórias e obter bons resultados próximos ao valor ótimo. Apesar de ser uma heurística, devido ao alto número de iterações que o algoritmo pode atingir, o seu tempo de calculo chega a 7,63 segundos para rotas com 210 furos.

O algoritmo de Concorde obteve rota ótima para todos as situações testadas. Além disso, apesar da complexidade do problema do caixeiro viajante, o tempo de cálculo para situações com até 210 furos não demonstrou ser problema. O algoritmo compilou os resultados em menos de 7 segundos.

## 5.2 Teste de Conceito em Laboratório

O teste de conceito da solução integrada de navegação e manipulação autônomas foi validado com sucesso. A validação foi feita através experimentos reais e simulados de carregamento de explosivos. O teste real foi feito num ambiente controlado onde o furo de detonação é representado por um círculo no chão. Os resultados podem ser divididos em 3 etapas conforme o diagrama de blocos da atividade apresentados na Figura 18a. Dado o ponto do furo no mapa, o robô navega até o mesmo desviando de obstáculos no caminho e então utiliza o processamento de imagens para posicionar o braço manipulador sobre o furo detectado. A demonstração prática deste teste trabalho pode ser visualizada no link <<http://www.youtube.com/watch?v=a9WDfOBJ7X4>>.

### 5.2.1 Navegação até o Furo

Antes de iniciar os testes foi realizado um mapeamento do laboratório usando o laser planar equipado no robô (Laser modelo *Sick*). Uma vez que o ambiente foi mapeado, o sistema recebe a posição aproximada do furo no mapa de forma manual (Figura 46a). Então, é iniciado o processo de planejamento de trajetórias onde são criadas trajetórias global e local. Conforme a Figura 46b, a trajetória global considera os obstáculos detec-

tados anteriormente no mapa e termina na posição do furo, enquanto a trajetória local busca seguir para a trajetória global e ao mesmo tempo desviar de qualquer obstáculo que possa aparecer durante a navegação até o furo. A trajetória completa executada pelo robô, desviando do obstáculo até atingir o furo, pode ser visualizada na Figura 47.

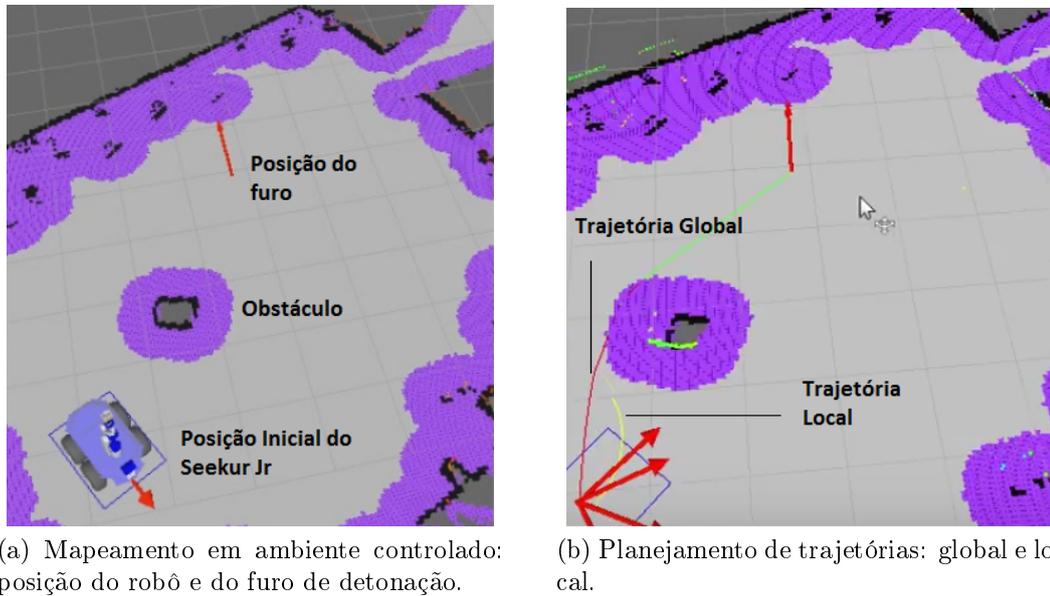


Figura 46 – Etapas da navegação no experimento real em ambiente controlado.

### 5.2.2 Localização do Furo

A localização do furo é realizada através de processamento de imagens. Quando o robô se aproxima do furo, as coordenadas da imagem (em pixels) e a distância do furo (em centímetros) são utilizados para calcular a posição do furo com respeito ao sistema de coordenadas do robô (Figura 48).

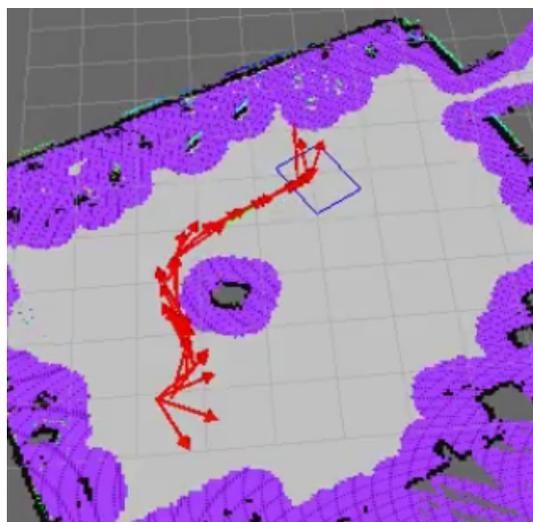


Figura 47 – Trajetória executado pelo robô para atingir o furo.

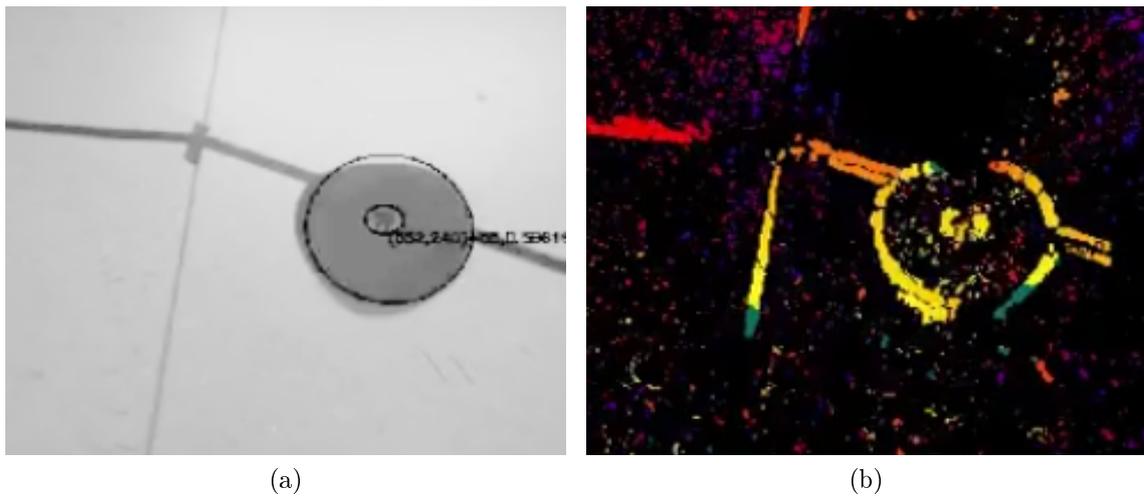


Figura 48 – Imagens da câmera estéreo: (a) Localização do furo usando detecção de elipsóides e (b) mapa de disparidade da cena.

### 5.2.3 Posicionamento do Manipulador sobre o Furo

O manipulador, *Schunk* LWA4P, opera somente após a conclusão da trajetória de navegação. O manipulador recebe as coordenadas da localização do furo calculada através do processamento das imagens da câmera estéreo. Em seguida, calcula a cinemática inversa para que o efetuador esteja na posição do furo com orientação voltada para baixo. Uma vez que a posição final foi calculada, é iniciado o planejamento e execução da trajetória utilizando o algoritmo RRT. O processo de posicionamento do manipulador pode ser observado na Figura 49.

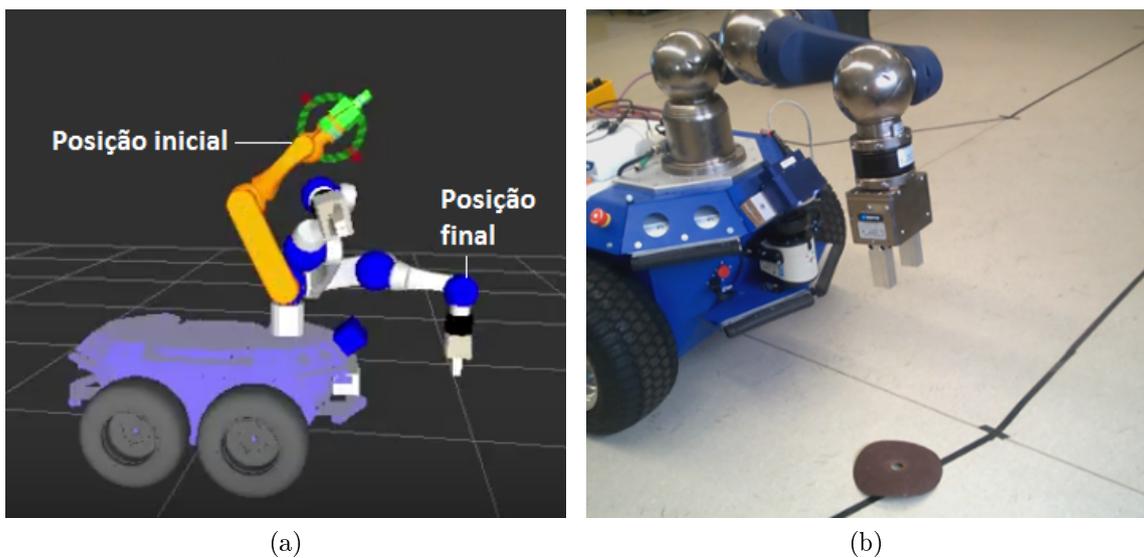


Figura 49 – Posicionamento do manipulador sobre o furo: (a) simulação da trajetória no ROS e (b) movimento real do atuador.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação foi apresentado um estudo prospectivo com experimentos reais para a programação de equipamentos autônomos com capacidade de navegação e manipulação de objetos. O caso de uso abordado nesta dissertação foi o carregamento de explosivos para furos de detonação na mineração. Para esta tarefa foi realizado uma abordagem top-down dividida em simulação e aplicação prática. A simulação é utilizada para uma situação global, onde o robô navega em um ambiente com diversos furos e busca rotas com menor deslocamento possível. Já a aplicação prática é realizada em laboratório e direcionada para um problema local, onde uma plataforma móvel comercial, equipada com um braço manipulador e sensores como laser planar, unidade de medição inercial e câmera estéreo, é utilizada para emular o carregamento autônomo de explosivos em um único furo de detonação.

A simulação do sistema robótico em um ambiente com diversos furos foi realizada através do *software* Gazebo conectado ao sistema ROS, onde o robô busca rotas que passe por todos os furos com o menor deslocamento possível. Algoritmos de otimização foram avaliados, em termos de tempo de processamento e distância calculada, na busca de rotas com o menor deslocamento possível em um ambiente com até 210 furos. Os resultados demonstraram que o algoritmo baseado na biblioteca de Concorde consegue encontrar rotas ótimas em um tempo aceitável.

Para a aplicação prática proposta, a tarefa alvo, carregamento de explosivos, foi emulada em laboratório de forma totalmente autônoma, onde o robô navega até o furo desviando de obstáculos e posiciona o manipulador sobre ele. As diferentes funcionalidades do robô foram integradas para que o sistema executasse as diversas etapas da tarefa de forma sequencial. Localização, mapeamento, planejamento de trajetórias, navegação com desvio de obstáculos, processamento de imagens, cálculo da posição do furo e manipulação foram integrados em um sistema único capaz de executar a tarefa alvo apenas com uma única entrada, a indicação da posição do furo no mapa.

A proposta desenvolvida neste trabalho envolveu o uso extensivo da plataforma ROS (*Robot Operating System*) para executar as atividades de navegação e manipulação autônomas. A utilização do ROS possibilitou a comunicação e controle dos dispositivos de forma paralela e distribuída; o que facilitou na organização e processamento de dados. Para a tarefa de navegação autônoma foram utilizadas as técnicas SLAM e *Trajectory Rollout*. Através do SLAM foi possível mapear o ambiente e localizar a posição da plataforma simultaneamente. A técnica *Trajectory Rollout* foi utilizada para planejamento e execução de trajetórias com desvio de obstáculos. Para realizar a manipulação, foi utilizada

inicialmente a câmera estéreo com a finalidade de reconhecer padrões e indicar o ponto objetivo para o manipulador. Com o ponto objetivo calculado, foi utilizado o algoritmo RRT para criar pontos intermediários e traçar uma trajetória para o manipulador.

Os resultados preliminares desta pesquisa foram publicados no International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2017) (FERREIRA et al., 2017b), Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2017) (FERREIRA et al., 2017a; FIDÊNCIO et al., 2017) e Semana da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM WEEK 2017) (COTA et al., 2017).

## 6.1 Contribuições da Dissertação

As contribuições deste trabalho estão relacionadas às estratégias utilizadas para executar o teste de conceito proposto.

Com respeito a simulação, as contribuições consistem na modelagem do robô no ambiente virtual do Gazebo conectado ao sistema de navegação autônoma implementado no ROS. Além disso, uma ferramenta intuitiva e de fácil visualização foi desenvolvida para validar os algoritmos de otimização de rotas propostos utilizando exemplos reais de plano de fogo como referência.

Para a solução prática proposta, as contribuições consistem na integração e documentação da plataforma móvel e sensores no sistema ROS, e também, na metodologia aplicada para emular o carregamento autônomo de explosivos e executar o teste de conceito proposto. O carregamento autônomo de explosivos foi dividido em subproblemas com características específicas, onde a escolha e desenvolvimento das ferramentas (*hardware e software*) adequadas para cada subproblema, assim como, a integração das diferentes atividades no sistema para atuar de forma sequenciada e autônoma, foram as principais contribuições.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros serão realizadas aplicações em minas a céu aberto utilizando veículos mais robustos apropriados para ambientes sujeitos a poeira, umidade, alta temperatura e vibração. Os conceitos validados neste trabalho para navegação e manipulação autônoma poderão ser utilizados no sistema definitivo para operações em campo. O sistema será composto por um caminhão autônomo, capaz de transportar os explosivos, equipado com um braço manipulador para carregá-los no furo. Os furos de detonação serão localizados via GPS ou similar, integrados ao mapa gerado pelo laser planar e iden-

tificados como obstáculos nas tarefas de navegação. Futuramente, a busca de melhores rotas será estendida para situações que considerem a orientação do robô ao atingir os furos, de forma que o deslocamento do robô seja avaliado em translação e rotação. Futuras extensões deste trabalho também envolvem o uso de sensores 3D mais acurados para detecção do furo e diferentes tipos de manipuladores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPLEGATE, D. et al. **Concorde TSP solver**. 2006.
- APPLEGATE, D. L. **The traveling salesman problem: a computational study**. [S.l.]: Princeton university press, 2006.
- ATMEH, G. M. et al. Implementation of an adaptive, model free, learning controller on the atlas robot. In: IEEE. **American Control Conference 2014**. [S.l.], 2014. p. 2887–2892.
- BAY, H.; TUYTELAARS, T.; GOOL, L. V. Surf: Speeded up robust features. In: SPRINGER. **European conference on computer vision**. [S.l.], 2006. p. 404–417.
- BHANDARI, S. Engineering rock blasting operations. **A. A. Balkema**. **388**, p. 388, 1997.
- BONCHIS, A. et al. Robotic explosive charging in mining and construction applications. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, IEEE, v. 11, n. 1, p. 245–250, 2014.
- CARREIRA, T. G. Quadcopter automatic landing on a docking station. **Instituto Superior Tecnico**, 2013.
- CHATTERJEE, S.; CARRERA, C.; LYNCH, L. A. Genetic algorithms and traveling salesman problems. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 93, n. 3, p. 490–510, 1996.
- CHAVES, A. A. et al. Metaheurísticas híbridas para resolução do problema do caixeiro viajante com coleta de prêmios. **Revista Produção**, SciELO Brasil, v. 17, n. 2, 2007.
- CHOSSET, H. M. Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: MIT press, 2005. cap. 4 - Potential Functions.
- COOK, S. A. The complexity of theorem-proving procedures. In: ACM. **Proceedings of the third annual ACM symposium on Theory of computing**. [S.l.], 1971. p. 151–158.
- COOK, W. J. **In pursuit of the traveling salesman: mathematics at the limits of computation**. [S.l.]: Princeton University Press, 2011.
- COTA, E. et al. Robótica na mineração. **18 Simpósio de Mineração [ABM WEEK 2017]**, p. 359–370, 2017.
- COTA, L. P. **Novos algoritmos para o problema de sequenciamento em Máquinas Paralelas não relacionadas com tempos de preparação dependentes da sequência**. 2014.
- DANTZIG, G.; FULKERSON, R.; JOHNSON, S. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. **Journal of the operations research society of America**, INFORMS, v. 2, n. 4, p. 393–410, 1954.

DELOITTE. **As tendências da mineração**. 2016. <<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/br/Documents/energy-resources/Tendencias-Mineracao-2016.pdf>>. (Accessed on 10/08/2017).

DESMONTEC. **Colocação de explosivos manualmente para desmonte de rocha**. 2012. <<https://goo.gl/mCmjkb>>. (Acessado em 01/04/2017).

DICK, R. A.; FLETCHER, L. R.; D'ANDREA, D. V. **Explosives and blasting procedures manual**. [S.l.]: Citeseer, 1982.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische mathematik**, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.

DNRM. **Failure to recognise a fly rock hazard - Department of Natural Resources and Mines - Queensland Government**. 2013. <<https://www.dnrm.qld.gov.au/mining/safety-and-health/alerts-bulletins-search1/alerts-bulletins/explosives/failure-to-recognise-fly-rock-hazard>>. (Accessed on 10/29/2017).

DODGE, P. **The Arizona Experience - Mining and Materials | Blast hole drill rig prepares holes to load with explosives**. 2012. <<http://arizonaexperience.org/images/0049minesmorenci-drill-2jpg>>. (Accessed on 01/21/2018).

FERREIRA, J. A. T. et al. Implementação de uma plataforma móvel e autônoma para carregamento de explosivos na mineração. **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, 2017.

FERREIRA, J. A. T. et al. Implementation of an autonomous mobile platform for loading explosives in mining applications. **International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, 2017.

FIDÊNCIO, A. X. et al. Metodologia para avaliação de interfaces de teleoperação. **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, 2017.

FORNACIARI, M.; PRATI, A.; CUCCHIARA, R. A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications. **Pattern Recognition**, Elsevier, v. 47, n. 11, p. 3693–3708, 2014.

FOX, D. Adapting the sample size in particle filters through kld-sampling. **The international Journal of robotics research**, SAGE Publications, v. 22, n. 12, p. 985–1003, 2003.

FREITAS, A. R. R. de. **Resolvendo o Problema do Caixeiro Viajante via Procedimento de Busca Adaptativa Aleatória Gulosa com Construção Baseada em Redes Neurais Auto-Organizáveis**. 2009.

GAVETT, J. W. Three heuristic rules for sequencing jobs to a single production facility. **Management Science**, INFORMS, v. 11, n. 8, p. B-166, 1965.

GRISSETTI, G.; STACHNISS, C.; BURGARD, W. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters. **IEEE transactions on Robotics**, IEEE, v. 23, n. 1, p. 34–46, 2007.

- HAHSLER, M.; HORNIK, K. Tsp-infrastructure for the traveling salesperson problem. **Journal of Statistical Software**, American Statistical Association, v. 23, n. 2, p. 1–21, 2007.
- HART, P. E.; NILSSON, N. J.; RAPHAEL, B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. **IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics**, IEEE, v. 4, n. 2, p. 100–107, 1968.
- HOOS, H. H.; STÜTZLE, T. On the empirical scaling of run-time for finding optimal solutions to the travelling salesman problem. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 238, n. 1, p. 87–94, 2014.
- JOSEPH, L. **Mastering ROS for robotics programming**. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2015.
- KUFFNER, J.; RRT-CONNECT, S. L. An efficient approach to single-query path planning ieee international conference on robotics and automation. **San Francisco**, p. 473–479, 2000.
- KURZ, M. E. Heuristics for the traveling salesman problem. **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**, Wiley Online Library, 2011.
- LAHR, D. et al. Early developments of a parallelly actuated humanoid, saffir. In: **ASME 2013 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference**. [S.l.: s.n.], 2013. p. V06BT07A054–V06BT07A054.
- LAND, A. H.; DOIG, A. G. An automatic method of solving discrete programming problems. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, JSTOR, p. 497–520, 1960.
- LAWER, E. et al. The traveling salesman problem. **Chinchester: Wiley**, 1985.
- LIM, J. et al. Robot system of drc-hubo+ and control strategy of team kaist in darpa robotics challenge finals. **Journal of Field Robotics**, Wiley Online Library, v. 34, n. 4, p. 802–829, 2017.
- MASON, M. T. Creation myths: The beginnings of robotics research. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, IEEE, v. 19, n. 2, p. 72–77, 2012.
- MATAI, R.; SINGH, S.; MITTAL, M. L. Traveling salesman problem: an overview of applications, formulations, and solution approaches. In: **Traveling Salesman Problem, Theory and Applications**. [S.l.]: InTech, 2010.
- MATRIX. **Developing alternative explosives: blasting without NOx hazard - International Mining**. 2014. <<https://im-mining.com/2014/10/27/developing-alternative-explosives-blasting-without-nox-hazard/>>. (Accessed on 12/18/2017).
- MEMAR, A. H.; ESFAHANI, E. T. Modeling and dynamic parameter identification of the schunk powerball robotic arm. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME 2015**. [S.l.], 2015. p. V05CT08A024–V05CT08A024.

- MENDES, M. L. **Curso de desmonte de rochas por explosivos**. [S.l.]: Rio Grande Consultoria e Servicos em Mineracao e Meio Ambiente, 2010.
- MESQUITA, P. P. D.; CARVALHO, P. S. L. d.; OGANDO, L. D. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro**, n. 43, 2016.
- MINING, H. **PERFURAÇÃO, DETONAÇÃO E AS VANTAGENS DO JIGSAW DA LEICA**. 2016. <<http://newsletter.hexagonmining.com/pt-BR/2016/february/drill-and-blast.aspx>>. (Accessed on 02/01/2018).
- MONTEMERLO, M. et al. Fastslam 2.0: An improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges. 31 david törnqvist, thomas b. Schön, Rickard Karlsson and Fredrik Gustafsson. **Particle Filter SLAM with High Dimensional Vehicle Model**.
- MSHA. **Report of Investigation, Explosives and Breaking Agents**. 2016. <<https://arlweb.msha.gov/fatals/metal/2016/final-reports/final-m16-03.pdf>>. (Accessed on 10/08/2017).
- PADBERG, M.; RINALDI, G. Facet identification for the symmetric traveling salesman polytope. **Mathematical programming**, Springer, v. 47, n. 1-3, p. 219–257, 1990.
- PEREIRA, R. de A.; SANTOS, M. B. G. Gerenciamento de riscos nas atividades de desmonte de rochas com explosivos. 2016.
- PRATT, J. **DARPA Robotics Challenge (DRC) Using Human-Machine Teamwork to Perform Disaster Response with a Humanoid Robot**. [S.l.], 2017.
- ROBERTS, J. et al. Autonomous hot metal carrier navigation and manipulation with a 20 ton industrial vehicle. In: IEEE. **Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.], 2007. p. 2770–2771.
- SHIM, I. et al. Vision system and depth processing for drc-hubo. In: IEEE. **Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2016. p. 2456–2463.
- SILVA, B. D. C. H. **OTIMIZAÇÃO DE ROTAS UTILIZANDO ABORDAGENS HEURÍSTICAS EM UM AMBIENTE GEORREFERENCIADO**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ, 2013.
- SILVA, V. C. **Curso de Operações Mineiras**. [S.l.]: Departamento de Engenharia de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.
- SIMONITE, T. **Mining 24 Hours a Day with Robots - MIT Technology Review**. 2016. <<https://www.technologyreview.com/s/603170/mining-24-hours-a-day-with-robots/>>. (Accessed on 10/08/2017).
- SOLOMON, M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. **Operations research**, Informs, v. 35, n. 2, p. 254–265, 1987.
- SOUZA, M. J. F. Otimização combinatória. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. cap. 5 - Problema do Caixeiro Viajante.

STÜCKLER, J.; BEHNKE, S. Integrating indoor mobility, object manipulation, and intuitive interaction for domestic service tasks. In: IEEE. **2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots**. [S.l.], 2009. p. 506–513.

VOS, D. Basic principles of the traveling salesman problem and radiation hybrid mapping. 2016.

WELCH, R.; LIMONADI, D.; MANNING, R. Systems engineering the curiosity rover: a retrospective. In: IEEE. **System of Systems Engineering (SoSE), 2013 8th International Conference on**. [S.l.], 2013. p. 70–75.

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

YAO, W. et al. A simulation system based on ros and gazebo for robocup middle size league. In: IEEE. **Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2015 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2015. p. 54–59.

YOUNG, A. Project designed to reduce risk to miners. **Engineering Dimensions**, v. 23, n. 2, p. 20–21, 2002.

## APÊNDICE A – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO ESPAÇO DE TRABALHO DO MANIPULADOR

```

% ALGORITMO PARA CÁLCULO DO ESPAÇO DE TRABALHO

% Comprimento dos elos(L) e faixa de valores das juntas(J)
L0 = 0.70;          L1 = 0.35;
L2 = 0.305;        L3 = 0.29;

J1_min = -90;      J1_max = 90;
J2_min = 0;        J2_max = 90;
J3_min = 0;        J3_max = 155;
J4_min = -170;     J4_max = 170;
J5_min = 0;        J5_max = 140;
J6_min = -170;     J6_max = 170;

% Loop para cálculo de espaço de trabalho
% Os ângulos das juntas foram restringidos para que o braço trabalhe apenas na
% região frontal do robô (região da câmera estéreo)

count = 1;
for i = J1_min :5: J1_max
    for j = J2_min :5: J2_max
        for k = J3_min :5: J3_max
            l=0;
            m=90;
            n=0;
            R6 = [cos(n*pi/180) -sin(n*pi/180) 0; sin(n*pi/180) cos(n*pi/180) 0; 0 0
1];
            R5 = [cos(m*pi/180) 0 sin(m*pi/180); 0 1 0; -sin(m*pi/180) 0
cos(m*pi/180)];
            R4 = [cos(l*pi/180) -sin(l*pi/180) 0; sin(l*pi/180) cos(l*pi/180) 0; 0 0
1];
            R3 = [cos(k*pi/180) 0 sin(k*pi/180); 0 1 0; -sin(k*pi/180) 0
cos(k*pi/180)];
            R2 = [cos(j*pi/180) 0 sin(j*pi/180); 0 1 0; -sin(j*pi/180) 0
cos(j*pi/180)];
            R1 = [cos(i*pi/180) -sin(i*pi/180) 0; sin(i*pi/180) cos(i*pi/180) 0; 0 0
1];

            P_EF_56 = [0;0;L3];
            P_56_34 = [0;0;L2]+(R5*R6)*P_EF_56;
            P_34_12 = [0;0;L1]+(R3*R4)*P_56_34;
            P_12_BS = [0;0;L0]+(R1*R2)*P_34_12;

            % P_12_BS = Posição do efetuador c/ respeito ao sistema de coord. inercial

            workspace(count,:) = P_12_BS'; % Cria nuvem de pontos P_12_BS
            count = count+1;

        end
    end
end

DT = DelaunayTri(workspace); % Triangulação da nuvem de pontos
hullFacets = convexHull(DT); % Cria envelope convexo
trisurf(hullFacets,DT.X(:,1),DT.X(:,2),DT.X(:,3),'FaceColor','c')% Plota gráfico
axis equal;
title('Espaço de Trabalho');

```

Figura 50 – Algoritmo de Matlab para cálculo do espaço de trabalho do manipulador *Schunk*: utiliza a cinemática direta e a triangulação de pontos para plotar o espaço tridimensional de trabalho do manipulador.

# ANEXO A – ANÁLISE DE RISCOS EM ÁREA DE DETONAÇÃO

ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCOS - APR EM ÁREA DE DETONAÇÃO							
RISCO	CAUSA	EFEITO	CATEG. DE FREQUÊNCIA	CATEG. DE SEVERIDADE	CATEG. DE RISCO	MEDIDAS PREVENTIVAS	
FÍSICOS	Ruído de Impacto	Ondas sonoras provocadas pela detonação de explosivos	Perda auditiva induzida pelo ruído (PAIR)	D	III	NT	Uso de EPIs e EPCs (Equipamentos de proteção individual (Protetor auricular adequado) e Coletiva), medidas administrativas mudança de função, afastamento.
			Zumbido	D	III	NT	Uso de EPIs e EPCs (Equipamentos de proteção individual e Coletiva), mudança de função, afastamento.
			Cefaleia	E	I	M	Uso de EPIs e EPCs (Equipamentos de proteção individual e Coletiva), mudança de função, afastamento.
			Náusea	D	I	T	Uso de EPIs e EPCs (Equipamentos de proteção individual e Coletiva), mudança de função, afastamento.
			Surdez	D	IV	NT	Uso de técnicas de abafamento de ruído e uso de EPIs e EPCs (Equipamentos de Proteção Individual e Coletiva). Mudança de função e/ou afastamento.
	Vibrações	Ondas de choque provocadas pela detonação de explosivos	Cansaço, irritação, dores nos membros, dores na coluna, Fibrilação.	C	IV	NT	Uso de técnicas que atenuem as ondas mecânicas (sacos de areia, pneus, redes metálicas, pré-corte, diminuição da carga máxima por espera e uso de tubo silencioso). Mudança de função e/ou afastamento. Monitoramento com sismógrafos.
			Contração muscular, doença do movimento, artrite	D	III	M	Uso de técnicas que atenuem as ondas mecânicas (sacos de areia, pneus, redes metálicas, pré-corte, diminuição da carga máxima por espera e uso de tubo silencioso). Mudança de função e/ou afastamento. Monitoramento com sismógrafos.
			Lesões ósseas, lesões dos tecidos moles e Mal súbito.	C	III	NT	Uso de técnicas que atenuem as ondas mecânicas (sacos de areia, pneus, redes metálicas, pré-corte, diminuição da carga máxima por espera e uso de tubo silencioso). Mudança de função e/ou afastamento. Monitoramento com sismógrafos.
	Calor	o desmonte de rochas é realizado sob área aberta com carga solar	Sudorese elevada.	D	I	T	Hidratação constante através de água e isotônicos.
			Desidratação.	E	III	NT	Pernéiras, avental, mangas e luvas de raspa de couro, óculos ou viseiras acrílicas com filtros escuros, creme protetor da pele, camisa manga comprida
			Queimaduras ocasionadas pelo sol.	D	III	NT	Pernéiras, avental, mangas e luvas de raspa de couro, óculos ou viseiras acrílicas com filtros escuros, creme protetor da pele, camisa manga comprida
			Problemas de pele.	D	IV	NT	Pernéiras, avental, mangas e luvas de raspa de couro, óculos ou viseiras acrílicas com filtros escuros, creme protetor da pele, camisa manga comprida
QUÍMICOS	Inalação de gases nitrosos	Cefaleia, náusea, problemas neurológicos e impotência.	E	III	NT	Uso de máscaras de proteção contra gases, esperar a dissipação dos gases para a atmosfera.	
		Inalação de poeira	Silicose pulmonar	E	III	NT	Uso de máscaras de proteção contra poeira, aspersão de água, isolamento da fonte de emissão e instalação de coletores de pó na perforatriz.
			Alergias	D	II	NT	Roupas de proteção, aspersão de água para diminuição da poeira.
ACIDENTES	Estilhaços da detonação	Perfurações e mutilações	D	III	NT	Uso de abafamento sob a área a ser detonada (Sacos de areia, pneus e telas metálicas...) e anteparos, controle da carga máxima por espera.	
	Entrada de pessoas não autorizadas	Causar acidentes	E	IV	NT	Implantação de sinalização, barreiras (cerco) e fiscalização dos pontos de acesso e geoprocessamento da área.	
	Rompimento de taludes	Esmagamento, Asfixia	D	III	NT	Evacuação das áreas próximas à detonação.	
	Soterramento	Esmagamento, Asfixia	D	III	NT	Estudo geotécnico da área a ser detonada.	
	Deslizamento de rochas	Esmagamento, Asfixia	C	III	M	Estudo geotécnico da área a ser detonada.	
	Quedas	Traumas, fraturas	D	IV	NT	Uso de cinto de segurança ou tabulete em trabalhos de carregamento de explosivos onde haja risco de quedas.	
	Incêndio	Queimaduras	D	IV	NT	Treinamento de brigadistas de combate a incêndio, terceirização no manuseio e operação de explosivos.	
BIOLÓGICOS	Presença de micro organismos	Fungos e bactérias	B	II	M	Manter o ambiente de trabalho limpo. Treinamentos sobre higiene pessoal. Não dividir EPIs, copos e talheres.	
	Animais peçonhentos	Envenenamento	E	IV	NT	Uso de EPIs (bota de cano longo, calça comprida, camisa de manga longa).	
ERGONOMIA	Postura inadequada	Fadiga	E	II	NT	Estudo ergonômico, alojamentos, treinamentos e paradas para descanso.	
	Repetitividade	Fadiga	E	II	NT	Pausa para alojamentos, treinamento, mudança de posição, caminhadas, paradas para descanso e revezamento.	
	Excesso de força	Fadiga, lesões musculares	E	II	NT	Pausas para alojamentos, treinamento, revezamento, paradas para descanso, mudança de função e/ou afastamento.	

Figura 51 – Análise Preliminar de Riscos para Desmonte de Rochas por Detonação

Fonte – (PEREIRA; SANTOS, 2016)

## ANEXO B – ACIDENTES EM DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS



### **Metal and Nonmetal Mine Safety Alert** **Explosives and Blasting Safety**

Blasting safety demands the highest level of attention among employees working in metal and nonmetal mining. Since 2010, seven miners have died at mines as a result of flyrock, misfires and toxic fumes. Two miners died in one incident in 2013. All mine operators, independent contractors and miners must follow strict explosives safety procedures to prevent fatalities.



### **Best Practices**

- Follow manufacturers' guidelines for the storage, handling, transportation and use of explosive materials.
- Keep all explosive storage areas clean, dry and orderly.
- Rotate the inventory of explosive materials, making sure to use the oldest stock first.
- Never use damaged or deteriorated explosive materials, including initiation (detonating) devices, boosters, dynamite and blasting agents. Contact the explosives manufacturer if damaged, deteriorated or outdated explosives are discovered.
- Ensure that all locations where explosives are stored or used are properly ventilated before miners enter.
- Utilize technology such as face profilers and borehole probes to obtain specific details about areas of weak burden and potential borehole deviation.
- Communicate with the driller and understand the geology of the blast site.
- Review and follow the site-specific blast plan prior to loading any explosives. Develop a drill pattern appropriate for the location, and adjust stemming depth and/or decking to maintain adequate burden for the blast.
- Establish the blast area and remove all persons from the area before the blast is fired.
- Guard or barricade all access routes to the blast area to prevent people and vehicles from entering.
- Before firing a blast, give ample warning to allow all persons to be evacuated from the blast area.
- Conduct a post-blast inspection to be certain the blast area is safe before anyone re-enters.

Figura 52 – Alerta sobre acidentes e boas práticas para operações com explosivos na mineração

Fonte – (MSHA, 2016)

# ANEXO C – ARTIGOS APRESENTADOS EM CONGRESSOS

## C.1 IROS 2017

IMPLEMENTATION OF AN ANTONOMOUS MOBILE PLATFORM FOR LOADING EXPLOSIVES IN MINING APPLICATIONS

# Implementation of an autonomous mobile platform for loading explosives in mining applications

Jhony Alan Tavares Ferreira<sup>1</sup> and Aline Xavier Fidêncio<sup>1</sup> and Héctor I. Azpúrua<sup>1</sup>  
and Gustavo M. Freitas<sup>1</sup> and Wilson Miola<sup>1</sup>

**Abstract**—The development of mining technologies has grown significantly in recent years. For mining companies, the adoption of new technologies on automation and remote operation represents a significant opportunity for gains in productivity and safety. This paper describes the development of an integrated solution for autonomous explosive loading applied to mining processes. This method can reduce or eliminate the risks to which operators are exposed in environments such as rock blast areas. The proposed solution was validated with simulated and real tests. Tests were carried out in a laboratory, using a mobile platform with a robotic arm.

## I. INTRODUCTION

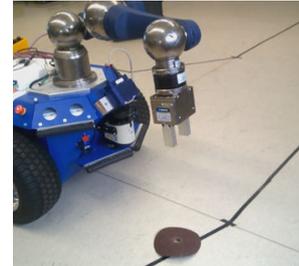
Rock blasting in the mining context is the material removal of a vertical structure within the mine, by the explosion one or multiple holes, to generate new horizontal platforms. Although there was progress in the security of operations with explosives, fatalities still occur, mainly due to the improper handling of explosives and the inadequate safety of the detonation area. This work proposes a prospective study and proof of concept on the programming of autonomous equipment to perform explosive loading.

## II. PROPOSAL

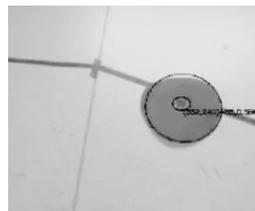
The problem addressed in this work is the autonomous loading of explosives, which consists of the insertion of charges into the detonation holes prepared at the blasting area. Our proposed solution to this problem can be divided into three major steps: (i) Autonomous navigation (ii) Image processing for hole detection and (iii) Manipulation of the robotic arm. The communication and control of the system were made via ROS. The platform used to perform the charge loading is a ‘Seekur Jr’ robot equipped with a ‘Schunk Powerball’ arm with 6 DOF, a laser ranger SICK LMS-111 and a stereo camera.

By using the map generated by using a *Rao-Blackwellized particle filter* implementation [1], the shortest path to the approximate location of the hole is calculated using the Dijkstra algorithm. That global path is used as a reference to plan the local trajectories with obstacles avoidance using the *Trajectory Rollout* algorithm [2]. Then, image processing is used to locate the position of the hole with respect to the platform. The hole is identified by an elliptical detector [3] and the disparity map of the stereo cameras are used to give

\*This work was supported by Instituto Tecnológico Vale (ITV)  
<sup>1</sup>Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto, MG, Brazil {jhonytavares@yahoo.com.br, aline.fidencio@gmail.com, {hector.azpuru, gustavo.freitas, wilson.miola}@itv.org



(a) The robot automatically reaches the hole location and activates the robotic arm.



(b) Location of the drill hole ellipse detection.



(c) Disparity map

Fig. 1: Preliminary results of autonomous explosive loading.

the approximate real distance to the hole. Finally, this data is used to generate a trajectory for the robotic arm by using the *Rapidly Exploring Random Trees* (RRT) [4] to reach the hole and simulate the discharge of explosives. Several validations are applied so the robot arm doesn't perform invalid movements that could harm itself or the robot.

Tests were performed on a controlled scenario (Figure 1a), and using a black circle to simulate a hole (Figure 1b and 1c). Future works will improve the performance of the obstacle avoidance algorithm, and the localization method will integrate other sensors such as GPS. Plans for future tests include performing in a real mining scenario and an improved method for explosive loading simulation with a hose.

## REFERENCES

- [1] G. Grisetti, C. Stachniss, and W. Burgard, "Improving grid-based slam with rao-blackwellized particle filters by adaptive proposals and selective resampling," in *Proceedings ICRA 2005*. IEEE, 2005.
- [2] B. P. Gerkey and K. Konolige, "Planning and control in unstructured terrain," in *ICRA Workshop on Path Planning on Costmaps*, 2008.
- [3] M. Fornaciari, A. Prati, and R. Cucchiara, "A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications," *Pattern Recognition*, vol. 47, no. 11, pp. 3693–3708, 2014.
- [4] J. Kuffner and S. L. RRT-Connect, "An efficient approach to single-query path planning," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, pp. 473–479, 2000.

## C.2 SBAI 2017

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLATAFORMA MÓVEL E AUTÔNOMA PARA  
CARREGAMENTO DE EXPLOSIVOS NA MINERAÇÃO

## IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLATAFORMA MÓVEL E AUTÔNOMA PARA CARREGAMENTO DE EXPLOSIVOS NA MINERAÇÃO

JHONY ALAN TAVARES FERREIRA\*<sup>†</sup>, ALINE XAVIER FIDÊNCIO\*<sup>†</sup>, HÉCTOR AZPÚRUA\*, GUSTAVO MEDEIROS FREITAS\*, WILSON MIOLA\*

*\* Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

*† Instituto Tecnológico Vale  
Unidade de Mineração  
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

Emails: [jhonytavares@yahoo.com.br](mailto:jhonytavares@yahoo.com.br), [aline.fidencio@gmail.com](mailto:aline.fidencio@gmail.com), [hector.azpurua@itv.org](mailto:hector.azpurua@itv.org),  
[gustavo.medeiros.freitas@itv.org](mailto:gustavo.medeiros.freitas@itv.org), [wilson.miola@itv.org](mailto:wilson.miola@itv.org)

**Abstract**— The development of mining technologies has grown significantly in recent years. For mining companies, the adoption of new technologies on automation and remote operation represents a great opportunity for gains in productivity and safety. This paper describes the development of an integrated solution for autonomous navigation and manipulation that can be applied to mining processes. The proposed solution was validated with simulated and real tests; the target application is the autonomous explosive charging. This solution can reduce or eliminate the risks to which operators are exposed in environments such as rock blast areas. The tests were carried out in laboratory, using a mobile platform with a robotic arm.

**Keywords**— automation, robotics, autonomous navigation and manipulation

**Resumo**— O desenvolvimento de tecnologias aplicadas a mineração tem crescido significativamente nos últimos anos. Para as mineradoras, a adoção de novas tecnologias em automação e operação remota representa uma grande oportunidade para ganhos em produtividade e segurança. Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma solução integrada para navegação e manipulação autônomas que pode ser utilizada em processos de mineração. A solução proposta é validada através de simulações e testes reais; a aplicação alvo escolhida foi o carregamento autônomo de explosivos. Essa aplicação pode reduzir e até eliminar os riscos a que os operadores estão expostos em ambientes como área de desmonte de rochas com presença de explosivos. Os testes foram realizados em laboratório, utilizando uma plataforma móvel de médio porte com um braço robótico acoplado.

**Palavras-chave**— automação, robótica, navegação e manipulação autônomas

### 1 Introdução

A criação e a difusão de novas tecnologias têm promovido um cenário de importantes mudanças no setor de mineração. Para as mineradoras, a adoção de novas tecnologias representa uma grande oportunidade para ganhos em produtividade e segurança (Mesquita et al., 2016).

A Vale possui um projeto piloto de mina autônoma em andamento na mina de Brucutu. Através da automação e operação remota, o projeto busca métodos mais eficientes e seguros de mineração. A empresa conta com caminhões autônomos, 1 perfuratriz autônoma, 1 trator teleoperado e 1 caminhão autônomo para carregamento de explosivos em fase de desenvolvimento. Além disso, a empresa possui aplicações de sistemas robóticos em construção de túneis, lavagem de caminhões, reparo de vagões e inspeção de cavidades (Mourao, 2014; DeFatoOnline, 2014).

Existem vários processos na mineração que podem ser automatizados. A prioridade é feita considerando principalmente os fatores: segurança, eficiência e padronização. Como exemplo de atividades que envolvem alto risco podem ser citadas as operações de transporte, carregamento

e detonação de explosivos relacionados ao desmonte de rochas.

O desmonte de rochas na mineração é o processo de retirada de materiais de uma estrutura vertical dentro da mina, mediante a explosão de um ou múltiplos furos, para formar plataformas horizontais. Embora existam grandes progressos nas operações com explosivos, fatalidades ainda são decorrentes, principalmente devido ao manuseamento inadequado de explosivos e à segurança inadequada da área de detonação. Devido aos riscos relacionados às operações que envolvem explosivos, já existem várias pesquisas sobre equipamentos autônomos relacionadas a essas atividades, particularmente na etapa de carregamento (Bonchis et al., 2014; Young, 2002).

Este trabalho propõe um estudo prospectivo e teste de conceito para a programação de equipamentos autônomos com capacidade de navegação e manipulação de objetos. A aplicação alvo escolhida foi o carregamento de explosivos. Os testes foram realizados em laboratório utilizando uma plataforma móvel com um braço robótico acoplado.

Na próxima seção deste artigo serão apresentados os trabalhos relacionados mais relevantes no

contexto do presente trabalho para navegação e manipulação autônomas. Em seguida, a descrição do problema, solução proposta e metodologia utilizada são apresentadas na seção III. Na seção IV são mostrados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados em laboratório. Por último, na seção V são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

## 2 Trabalhos Relacionados

Existem várias aplicações de técnicas de navegação e manipulação em equipamentos autônomos, como o Hot Metal Carrier (Roberts et al., 2007). Este equipamento é capaz de navegar, desviar de obstáculos e manipular um cadinho com alumínio fundido de forma autônoma. O sistema de localização do veículo é feito por odometria, com auxílio de GPS. A detecção de obstáculos e mapeamento do ambiente é realizada via lasers planares. As operações de manipulação são divididas em pegar e soltar o cadinho. Inicialmente é realizada uma aproximação onde o cadinho pode ser detectado visualmente, e então o gancho do veículo é direcionado para segurá-lo.

No setor da mineração é possível citar o sistema robótico de carregamento de explosivos RECS (Bonchis et al., 2014). O equipamento desenvolvido consiste em um caminhão acoplado de um manipulador mecânico com 6 graus de liberdade. Para realizar o carregamento de explosivos de forma autônoma, o RECS possui um sistema de detecção de furos, processamento de imagem para auxiliar no posicionamento do efetuador, e planejamento e controle de trajetórias. A detecção de furos é feita através de um sistema de escaneamento e mapeamento baseado em lasers acoplados no efetuador. O processamento de imagens é feito por câmeras, montadas sobre o efetuador, que fornecem estimativas confiáveis da localização dos furos. O planejamento e controle de trajetórias é feito utilizando a técnica de campos potenciais.

Um exemplo relevante de aplicação de técnicas de navegação e manipulação autônomas é o robô humanoide Dynamaid, utilizado para serviços domésticos (Stückler and Behnke, 2009). A estrutura do robô é dividida em duas partes, base e corpo superior antropomórfico. A base é composta por 4 pares de rodas direcionais, com acionamento diferencial individual, que possibilitam a navegação omnidirecional. O corpo superior é composto por 2 braços antropomórficos. Dentre as diversas funcionalidades do Dynamaid, vale destacar as técnicas utilizadas para navegação, manipulação e detecção de objetos.

- Navegação: para navegar de forma autônoma o robô precisa estimar a sua posição num determinado mapa, planejar uma trajetória livre

de obstáculos, e ser capaz de mapear ambientes desconhecidos através dos seus sensores. Para estimar a posição inicial no mapa foi utilizado o algoritmo *Adaptive Monte Carlo Localization* (Fox, 2003). O planejamento de trajetória foi implementado por algoritmos de busca heurística  $A^*$  (Hart et al., 1968). Por último, no mapeamento de ambientes desconhecidos foi utilizada a técnica de mapeamento e localização simultâneos (SLAM) através dos algoritmos FastSLAM (Montemerlo et al., 2003) e GMapping (Grisetti et al., 2007).

- Manipulação: para resolver de forma robusta as tarefas de manipulação móvel, foram integradas a detecção de objetos, a navegação e as primitivas de movimento. O robô pode agarrar objetos, carregá-los e entregá-los a usuários humanos. Para agarrar um objeto em uma localização específica o robô navega até uma posição próxima ao objeto, e então utiliza um sistema de lasers que detectam a posição vertical e horizontal desejada para guiar os manipuladores.

- Detecção e reconhecimento de objetos: para a detecção e localização é utilizado um laser Hokuyo. Uma vez alinhado ao plano dos objetos, o laser realiza um escaneamento horizontal para detectá-los. Segmentos com tamanhos e larguras específicos são considerados como objetos potenciais. O reconhecimento dos objetos é feito por processamento de imagens através da comparação de cores e descritores.

Exemplos mais recentes de técnicas de navegação e manipulação autônomas são encontradas nos robôs desenvolvidos para o Darpa Robotics Challenge 2015. O vencedor da competição, o DRC-HUBO, possui um sistema de detecção e localização de objetos baseado em processamento de imagens estéreo (Shim et al., 2016).

## 3 Metodologia

O problema abordado neste trabalho é o carregamento autônomo de explosivos, o qual consiste na inserção autônoma de explosivos em furos realizados na região de desmonte de minério. Tradicionalmente, o carregamento de explosivos requer uma equipe especialista e um veículo preparado para transporte dos materiais relacionados à detonação. Na região de desmonte, o operador localiza e insere uma mangueira no furo de detonação e o carregamento de explosivos é feito por uma bomba que, através da mangueira, transporta os explosivos do veículo para dentro do furo. Por último, o operador monta o detonador e insere o dispositivo de detonação no furo como observado na Figura 1 (Mendes, 2010).

Neste trabalho é proposta a emulação de um carregamento de explosivos, onde as atividades que seriam executadas pela equipe treinada são realizadas por uma plataforma móvel equipada com



Figura 1: Operador inserindo dispositivos de detonação no furo de forma manual. (Desmontec, 2012)

um braço manipulador. Assim, as atividades que a plataforma deve executar são: navegar até a região do furo e identificar a sua posição, utilizar o manipulador para inserir uma mangueira na abertura e finalmente realizar o descarregamento dos explosivos. Um diagrama da metodologia proposta em alto nível pode ser observada na Figura 2.

A solução proposta de navegação e manipulação autônomas foi validada através de testes simulados e com robô real em ambientes controlados. Para efeitos de simplificação nos testes reais, é assumido que o furo de detonação é representado por um círculo no chão. A inserção da mangueira no furo e descarregamento de explosivos são representados pelo posicionamento do efetuador do braço sobre o círculo.

### 3.1 Componentes do sistema

O sistema proposto usa como plataforma móvel o ‘Seekur Jr’, o qual esta equipado com um braço manipulador ‘Schunk Powerball’ (Figura 3). Para integrar e controlar o sistema via software foi utilizado o ROS (Robot Operation System), um sistema de código aberto que fornece ferramentas e aplicações para controle robôs e sensores (Joseph, 2015).

#### 3.1.1 Plataforma Móvel

O ‘Seekur Jr’ é uma plataforma móvel utilizada em pesquisa e desenvolvimento de aplicações de robôs. A plataforma se locomove pelo método de derrapagem (*skid-steering*) através de 4 rodas fixas com acionamento diferencial feito por 2 motores reversíveis. A plataforma integra os seguintes dispositivos que auxiliam na autonomia do robô:

- Laser range finder SICK LMS-111;
- Câmera PTZ RVision SEE;
- Câmera estéreo MobileRanger C3D;
- Unidade de Medição Inercial;
- GPS AgGPS 372;
- Roteador sem fio WRAP;
- Sensores de toque (bumpers).

O ‘Seekur Jr’ possui uma arquitetura em duas camadas, composta por um microcontrolador e um computador embarcados. O microcontrolador opera o firmware ‘SeekurOS’ que funciona como uma interface para a comunicação com os dispositivos da plataforma. O computador opera com o sistema operacional ‘Ubuntu 12.04’ e utiliza softwares que enviam comandos para os dispositivos do robô através da interface ‘SeekurOS’.

#### 3.1.2 Braço Manipulador

O ‘Schunk Powerball’ LWA 4P é um braço robótico de 6 graus de liberdade. O dispositivo é constituído por três juntas compactas denominadas módulos ERB que integram dois eixos perpendiculares juntamente com seus circuitos de controle e acionamento. O manipulador possui um posicionamento preciso devido a utilização de reduções *harmonic drive* (sem folga), tornando-o ideal para tarefas robóticas de alta precisão (Memar and Esfahani, 2015). O braço é equipado com um efetuador de 1 grau de liberdade e um sensor de força e torque FTM 75.

### 3.2 Método proposto

A solução proposta para o problema de carregamento autônomo de explosivos pode ser dividida em três grande etapas: (i) Navegação autônoma (ii) Processamento de imagens para detecção do furo e (iii) Manipulação do braço robótico (Figura 2b).

A comunicação e controle do sistema foram feitos via ROS através de pacotes adaptados para o Seekur Jr. Cada pacote possui uma funcionalidade específica no sistema. O processamento de dados do sistema foi dividido em duas máquinas, um computador embarcado e outro externo.

#### 3.2.1 Navegação Autônoma

A navegação autônoma foi utilizada para levar a plataforma até a região do furo. Para realizar essa tarefa, o sistema precisa mapear o ambiente, traçar uma rota até as coordenadas do furo e executar a trajetória desviando de obstáculos. Essa atividade foi realizada através de um conjunto de pacotes do ROS (*Navigation Stack*) que juntos planejam e controlam a trajetória do robô <sup>1</sup>.

Os principais pacotes utilizados foram:

- *p2os\_driver*: driver para acionamento dos motores da plataforma móvel através de comandos de velocidade (`/cmd_vel`). Disponibiliza interface para teleoperação através de teclado ou *joystick*.
- *lms1xx*: lê os valores de ângulo e distância fornecidos pelo laser e publica no tópico `/LaserScan`.

<sup>1</sup>O *stack* é descrito em [http://wiki.ros.org/move\\_base](http://wiki.ros.org/move_base).

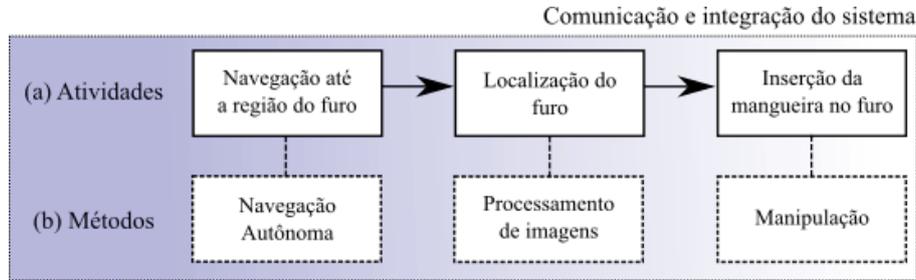


Figura 2: Diagrama de alto nível da metodologia proposta: (a) Descrição das atividades executadas no teste de conceito e (b) métodos aplicados para realizar as atividades associadas.



Figura 3: Robô usado como base da implementação: ‘Seekur Jr’, equipado com braço manipulador ‘Schunk Powerball’.

- *gmapping*: utiliza o método SLAM para mapear o ambiente e localizar o ‘Seekur Jr’ no mapa (/map).
- *move\_base*: planeja e controla trajetórias para navegação autônoma com desvio de obstáculos.

Usando o mapa gerado pelo pacote *Gmapping*, o *move\_base* cria uma trajetória para a plataforma se locomover entre um ponto inicial e final com desvio de obstáculos. O pacote utiliza um planejador global e local para realizar sua tarefa de navegação.

A trajetória do ponto inicial ao final é feita pelo planejador global que se baseia no algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959). O algoritmo busca a rota com o menor custo entre dois vértices dentro de um grafo. Uma vez escolhido o vértice inicial, o algoritmo calcula o custo mínimo deste vértice para todos os demais vértices do grafo.

A trajetória global é utilizada como referência para planejar as trajetórias locais com desvio de obstáculos. O planejador local se baseia no algoritmo *Trajectory Rollout* que se comporta de acordo com os passos a seguir:

1. Realiza amostragem discreta de velocidades  $(d_x, d_\theta)$  no espaço de controle da plataforma;
2. Para cada velocidade amostrada, realiza a simulação de avanço a partir do estado atual da plataforma para prever o que aconteceria se a

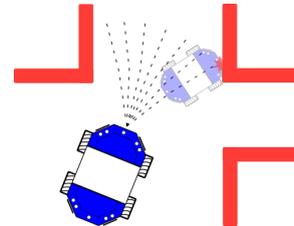


Figura 4: Simulação de avanço das velocidades amostradas.

velocidade amostrada fosse aplicada durante algum período de tempo (Figura 4);

3. Avalia (pontua) cada trajetória resultante da simulação direta, utilizando uma métrica que incorpora características como: proximidade de obstáculos, proximidade do ponto final, proximidade da trajetória global e velocidade da plataforma. Descarta as trajetórias que colidem com obstáculos;
4. Escolhe a trajetória de maior pontuação e envia a velocidade associada para a plataforma móvel;

As velocidade linear ( $d_x$ ) e de rotação ( $d_\theta$ ) são publicadas no tópico ‘/cmd\_vel’ e então enviadas para o robô através do pacote *p2os\_driver*.

### 3.2.2 Detecção do furo

O processamento digital de imagens foi utilizado para localizar a posição do furo com respeito à plataforma. Para isso, o sistema precisa identificar formas circulares ou elípticas e calcular a que distância elas se localizam com respeito ao sistema de coordenadas da plataforma.

Essa tarefa foi feita a partir das imagens obtidas pela câmera estéreo acoplada no robô (MobileRanger C3D). O software de processamento das imagens do par estéreo é constituído por um driver que utiliza a biblioteca *OpenCV* para calcular o mapa de disparidade e fornecer as imagens RGB das câmeras. Na imagem RGB é aplicado um algoritmo de detecção de círculos e elipses; o algoritmo se baseia em uma estratégia de seleção de arcos candidatos para formar elipses e no uso de transformadas Hough (Fornaciari et al., 2014). A imagem com disparidade é utilizada para calcular a distância dos pontos da imagem onde um círculo ou elipse foi detectado.

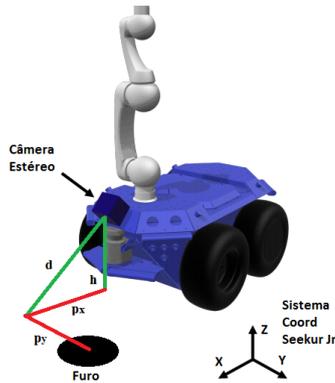


Figura 5: Posição  $(p_x, p_y)$  do furo com respeito ao sistemas de coordenadas do robô.

Quando a câmera estéreo detecta um círculo ou elipse, é estimado mediante uma média móvel de 5 valores o centroide da elipse e a distância desse centroide até a câmera pelo mapa de disparidade. A média móvel é usada para minimizar o erro proveniente de ruído ao estimar a posição real do furo; a quantidade de amostras da média foi obtida empiricamente mediante tentativa e erro. Estes valores, juntamente com a altura do laser com relação ao furo, são utilizados para calcular a posição deste com respeito ao sistema de coordenadas do robô, conforme a Figura 5.

O eixo Y do sistema de coordenadas do robô possui origem no centro da plataforma, onde está localizada a câmera estéreo. Para conhecer a posição do centro do furo observado no mapa de disparidade  $(p_y)$ , com respeito ao eixo Y do robô, foi aplicada uma técnica de interpolação linear. Foram amostradas coordenadas do mapa de disparidade e comparadas manualmente com a medida de distância real até origem do eixo Y do robô. Finalmente as distâncias reais foram interpoladas e são usadas como referência para os algoritmos de planejamento.

A posição do furo no eixo X  $(p_x)$  é calculada através da relação de um triângulo retângulo  $p_x = \sqrt{d^2 - h^2}$ , onde  $h$  é altura do laser no eixo Z e  $d$  é a distancia do furo calculada pela câmera.

### 3.2.3 Planejamento e controle do braço manipulador

O braço manipulador foi usado para emular a inserção da mangueira no furo onde são carregados os explosivos. A emulação da atividade consiste em receber as coordenadas do furo e finalmente planejar e executar uma trajetória até essa locação de forma que o efetuador esteja orientado na direção vertical apontando para baixo. Para realizar essa atividade foram utilizados os seguintes pacotes:

- *schunk robotics*: driver e controlador do braço *Schunk*. O controlador atua no espaço das juntas utilizando interpolação pelo método *spline*.

- *moveit*: planeja trajetória com desvio de obstáculos e envia para o controlador do braço *Schunk*. Fornece interface gráfica e uma variedade de algoritmos de planejamento de trajetória com desvio de obstáculos.

- *seekurjr\_description*: descreve o ‘Seekur Jr’ no formato URDF (Unified Robot Description Format).

O planejamento de trajetória é realizado pelo *MoveIt!*, o qual gera uma sequência de pontos que o manipulador deve seguir. O algoritmo utilizado foi o *Rapidly Exploring Random Treed* (RRT) (Kuffner and RRT-Connect, 2000). O RRT busca uma trajetória entre dois pontos, dentro de uma árvore de configurações do braço, que não colida com obstáculos. A árvore é construída através da adição de pontos aleatórios que pertencem ao espaço de configurações e satisfazem as restrições do manipulador (Algoritmo 1).

---

#### Algoritmo 1 - Rapidly Exp. Random Tree

---

```

1: função GERAR_RRT( $x_{inic}, K, \Delta T$ )
2:   para k=1 até K faça
3:      $x_{aleat} \leftarrow Config\_Aleatoria()$ 
4:      $x_{prox} \leftarrow Vizinh\_mais\_prox(x_{aleat}, \mathcal{T})$ 
5:      $u \leftarrow Selec\_Entrada(x_{aleat}, x_{prox})$ 
6:      $x_{novo} \leftarrow Novo\_Estado(x_{prox}, u, \Delta T)$ 
7:      $\mathcal{T}.adic\_vertice(x_{novo})$ 
8:      $\mathcal{T}.adic\_aresta(x_{novo}, x_{prox}, u)$ 
9:   fim para
10:  devolve  $\mathcal{T}$ 
11: fim função

```

---

A trajetória gerada é enviada para o controlador do manipulador. O controlador utiliza o método *spline* para interpolar os pontos e executar a trajetória. O pacote *seekurjr\_description* é utilizado para a construção da matriz de conflitos do *MoveIt!*. Através do modelo 3D do robô, é calculada a trajetória para o manipulador de forma que ele não atinja a sua própria estrutura ou a plataforma.

### 3.2.4 Integração do Sistema

Para executar tarefas de navegação e manipulação de forma totalmente autônoma, os sistemas de navegação, processamento de imagens e manipulação foram integrados para funcionar conjuntamente.

Os processos de navegação e processamento de imagens são iniciados simultaneamente, porém, a manipulação é acionada somente depois que o robô atinge o ponto final de navegação desejado. A partir deste momento, a posição do círculo ou elipse detectada no processamento de imagens é considerada como a posição final desejada para o efetuador do braço *Schunk*. Assim, utilizando uma interface com o *MoveIt!*, o sistema calcula

a cinemática inversa da posição desejada e busca trajetórias para o manipulador utilizando o algoritmo RRT. Ao encontrar uma trajetória, o braço inicia o movimento e se posiciona com o efetuador sobre o círculo ou elipse detectado.

## 4 Resultados

A validação da solução integrada de navegação e manipulação autônomas foi feita através experimentos reais e simulados de carregamento de explosivos. O teste real foi feito num ambiente controlado onde o furo de detonação é simulado por um círculo no chão. Os resultados podem ser divididos em 3 etapas conforme o diagrama de blocos da atividade apresentados na Figura 2a. Dado o ponto do furo no mapa, o robô navega até o mesmo desviando de obstáculos no caminho e então utiliza o processamento de imagens para posicionar o braço manipulador sobre o furo detectado<sup>2</sup>.

### 4.1 Navegação até o furo

Antes de iniciar os testes foi realizado um mapeamento do laboratório usando o laser planar equipado no robô (Laser modelo *Sick*). Uma vez que o ambiente foi mapeado, o sistema recebe a posição aproximada do furo no mapa de forma manual (Figura 6a). Então, é iniciado o processo de planejamento de trajetórias onde são criadas trajetórias global e local. Conforme a Figura 6b, a trajetória global considera os obstáculos detectados anteriormente no mapa e termina na posição do furo, enquanto a trajetória local busca seguir a trajetória global e ao mesmo tempo desviar de qualquer obstáculo que possa aparecer durante a navegação até o furo. A trajetória completa executada pelo robô, desviando do obstáculo até atingir o furo, pode ser visualizada na Figura 6c.

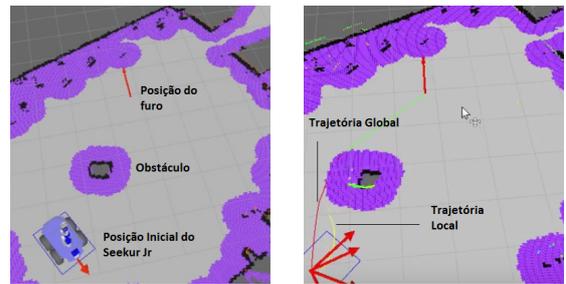
### 4.2 Localização do furo

A localização do furo é realizada através de processamento de imagens. Quando o robô se aproxima do furo, as coordenadas da imagem (em pixels) e a distância do furo (em centímetros) são utilizadas para calcular a posição do furo com respeito ao sistema de coordenadas do robô (Figura 7).

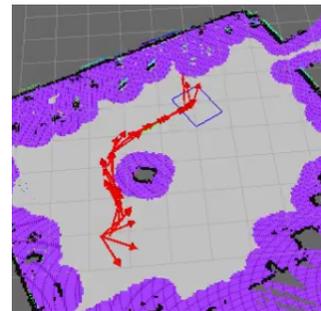
### 4.3 Posicionamento do manipulador sobre o furo

O manipulador, *Schunk LWA4P*, opera somente após a conclusão da trajetória de navegação. O manipulador recebe as coordenadas da localização do furo calculadas através do processamento das imagens da câmera estéreo. Em seguida, é gerada a cinemática inversa para que o efetuador esteja na posição do furo com orientação voltada para

<sup>2</sup>A demonstração prática deste teste trabalho pode ser visualizada no link <http://www.youtube.com/watch?v=a9Wdf0BJ7X4>.



(a) Mapeamento em ambiente controlado: posição do robô e do furo de detonação. (b) Planejamento de trajetórias: global e local.



(c) Trajetória executado pelo robô para atingir o furo.

Figura 6: Etapas da navegação no experimento real em ambiente controlado.

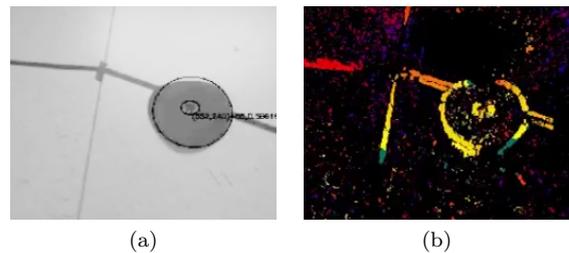


Figura 7: Imagens da câmera estéreo: (a) Localização do furo usando detecção de elipsóides e (b) mapa de disparidade da cena.

baixo. Uma vez que a posição final foi estimada, é iniciado o planejamento e execução da trajetória utilizando o algoritmo RRT. O processo de posicionamento do manipulador pode ser observado na Figura 8.

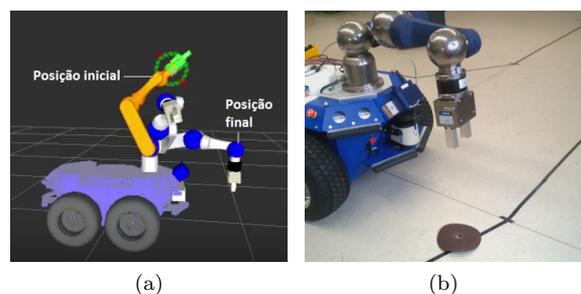


Figura 8: Posicionamento do manipulador sobre o furo: (a) simulação de trajetória no ROS e (b) movimento real.

## 5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste artigo foi apresentado um estudo prospectivo com experimentos reais para a programação de equipamentos autônomos com capacidade de navegação e manipulação de objetos. O caso de uso abordado neste trabalho foi o carregamento de explosivos para furos de detonação na mineração. Esta tarefa foi realizada usando uma plataforma robótica móvel comercial equipada com um braço manipulador e sensores como laser planar, unidade de medição inercial e câmera estéreo.

A proposta desenvolvida neste trabalho envolveu o uso extensivo da plataforma ROS (Robot Operating System) para executar as atividades de navegação e manipulação autônomas. O ROS possibilitou a comunicação e controle dos dispositivos de forma paralela e distribuída; o que facilitou na organização e processamento de dados. Para a tarefa de navegação autônoma foram utilizadas as técnicas SLAM e *Trajectory Rollout*. Através do SLAM foi possível mapear o ambiente e localizar a posição da plataforma simultaneamente. O planejamento e execução de trajetórias com desvio de obstáculos foi realizado com a técnica de *Trajectory Rollout*.

A manipulação utiliza inicialmente a câmera estéreo com a finalidade de reconhecer padrões e indicar o ponto objetivo para o manipulador. Com o ponto objetivo calculado, o algoritmo RRT cria pontos intermediários que permitem traçar uma trajetória para o manipulador.

Os sistemas de navegação, processamento de imagens e manipulação foram integrados em um sistema único. A solução integrada foi validada com sucesso através do teste de conceito proposto.

Em trabalhos futuros serão realizados testes em ambientes externos, usando furos reais de detonação. Futuramente o método proposto será estendido para procurar as melhores rotas em ambientes não estruturados, evitando obstáculos e localizando os furos previamente definidos via coordenadas de GPS ou similar. Futuras extensões deste trabalho também envolvem o uso de sensores 3D mais acurados para detecção do furo e diferentes tipos de manipuladores.

## 6 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à equipe do Laboratório de Robótica do Instituto Tecnológico Vale. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e Vale S.A.

## Referências

Bonchis, A., Duff, E., Roberts, J. and Bosse, M. (2014). Robotic explosive charging in mining and construction applications, *IEEE T-ASE* **11**(1): 245–250.

- DeFatoOnline (2014). Perfuratriz autônoma, em teste na mina brucutu, trabalha sem operador na cabine, <https://goo.gl/oo60Ir>. (Acessado 11/01/2017).
- Desmontec (2012). Colocação de explosivos manuais para desmonte de rocha, <https://goo.gl/mCmjkb>. (Acessado 01/04/2017).
- Dijkstra, W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische mathematik*.
- Fornaciari, M., Prati, A. and Cucchiara, R. (2014). A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications, *Pattern Recognition* **47**(11): 3693–3708.
- Fox, D. (2003). Adapting the sample size in particle filters through kld-sampling, *The international Journal of robotics research* **22**(12): 985–1003.
- Grisetti, G., Stachniss, C. and Burgard, W. (2007). Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters, *IEEE transactions on Robotics* **23**(1): 34–46.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics* **4**(2): 100–107.
- Joseph, L. (2015). *Mastering ROS for robotics programming*, Packt.
- Kuffner, J. and RRT-Connect, S. L. (2000). An efficient approach to single-query path planning ieee international conference on robotics and automation, *San Francisco* pp. 473–479.
- Memar, A. H. and Esfahani, E. T. (2015). Modeling and dynamic parameter identification of the schunk powerball robotic arm, *ASME 2015*, ASME, pp. V05CT08A024–V05CT08A024.
- Mendes, M. L. (2010). *Curso de desmonte de rochas por explosivos*, Rio Grande Consult. e Serv. em Mineracao.
- Mesquita, P., Carvalho, P. and Ogando, L. (2016). Desenvolvimento e inovação em mineração e metais, *BNDES Setorial, Rio de Janeiro* (43).
- Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D. and Wegbreit, B. (2003). Fastslam 2.0: An improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges, *IJCAI 16*.
- Mourao, J. (2014). Notícias mineracao - vale usa robôs na construção de túneis do projeto s11d, <https://goo.gl/DERNQK>. (Acessado 11/01/2017).
- Roberts, J., Tews, A., Pradalier, C. and Usher, K. (2007). Autonomous hot metal carrier navigation and manipulation with a 20 ton industrial vehicle, *2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, IEEE, pp. 2770–2771.
- Shim, I., Shin, S., Bok, Y., Joo, K., Choi, D.-G., Lee, J.-Y., Park, J., Oh, J.-H. and Kweon, I. S. (2016). Vision system and depth processing for drc-hubo, *ICRA 2016*, IEEE, pp. 2456–2463.
- Stückler, J. and Behnke, S. (2009). Integrating indoor mobility, object manipulation, and intuitive interaction for domestic service tasks, *9th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*.
- Young, A. (2002). Project designed to reduce risk to miners, *Engineering Dimensions* **23**(2): 20–21.

SBAI 2017

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE INTERFACES DE TELEOPERAÇÃO

## METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE INTERFACES DE TELEOPERAÇÃO

ALINE XAVIER FIDÊNCIO\*<sup>†</sup>, JHONY ALAN TAVARES FERREIRA\*<sup>†</sup>, GUSTAVO MEDEIROS FREITAS\*,  
PAULO MARCOS DE BARROS MONTEIRO<sup>†</sup>, FELIPE RIGUEIRA CAMPOS<sup>†</sup>, HÉCTOR AZPÚRUA\*, WILSON  
MIOLA\*

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

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

Emails: [aline.fidencio@gmail.com](mailto:aline.fidencio@gmail.com), [jhonytavares@yahoo.com.br](mailto:jhonytavares@yahoo.com.br),  
[gustavo.medeiros.freitas@itv.org](mailto:gustavo.medeiros.freitas@itv.org), [rigueiracampos@gmail.com](mailto:rigueiracampos@gmail.com), [hector.azpuru@itv.org](mailto:hector.azpuru@itv.org),  
[pmemop@gmail.com](mailto:pmemop@gmail.com), [wilson.miola@itv.org](mailto:wilson.miola@itv.org)

**Abstract**— In the mining industry, operator's safety has always been crucial. Furthermore, achieving a consistent and efficient production process is also relevant. To increase productivity and safety in mining operations, researches try to achieve a semi-autonomous or even autonomous mine and the utilization of teleoperation techniques rises as a relevant solution to the problem. However, besides the development of teleoperation interfaces, also important is to evaluate its suitability to the user. Hence, this paper presents the application of a methodology for evaluating teleoperation interfaces. A simplified experiment was conducted in laboratory using a commercial mobile robotic platform driven through a testing scenario with obstacles and a teleoperation interface consisting of video and haptic devices. Results indicate that the utilization of such methodology can significantly contribute to the development of robust teleoperation interfaces.

**Keywords**— robotics platforms, teleoperation, evaluation methodology, force feedback

**Resumo**— Na indústria da mineração, a segurança do operador sempre foi crucial. Além disso, a busca por um processo de produção consistente e eficiente é também relevante. Para aumentar a produtividade e a segurança nas operações da mineração, pesquisas têm buscado alcançar uma mina semiautônoma, ou mesmo autônoma, e a utilização de técnicas de teleoperação é apresentada como uma solução relevante para o problema. No entanto, além do desenvolvimento de interfaces de teleoperação, é também necessário validar sua adequação diante do operador. Dessa forma, este trabalho apresenta a aplicação de uma metodologia para avaliação de interfaces de teleoperação. Um experimento simplificado foi conduzido em laboratório utilizando uma plataforma robótica móvel comercial guiada em um cenário teste com obstáculos e uma interface de teleoperação contendo dispositivos de vídeo e háptico. Os resultados indicam que a utilização de tal metodologia pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de interfaces robustas de teleoperação.

**Palavras-chave**— plataformas robóticas, teleoperação, metodologia de avaliação, realimentação de força

### 1 Introdução

A indústria da mineração é caracterizada por altos investimentos em capital e tempo. Tais investimentos envolvem, em diferentes estágios do empreendimento, atividades de inspeção, monitoramento e manipulação em ambientes perigosos ou de difícil acesso ao ser humano.

A utilização de equipamentos autônomos vem crescendo como uma das formas mais eficientes de se reduzir custos operacionais e aumentar a produtividade e a segurança do operador. Mas, devido principalmente às dificuldades inerentes às tarefas a serem realizadas pelos equipamentos, em muitos casos a intervenção do operador, mesmo que mínima, ainda se faz necessária. Assim, a utilização de equipamentos teleoperados é apresentada como uma solução relevante para o problema.

Os desafios impostos pela tarefa de teleoperação de equipamentos são inúmeros, e as soluções encontradas envolvem as mais diversas áreas de conhecimento. Apesar da separação física entre operador e equipamento, deseja-se criar uma

experiência natural e realista com o ambiente remoto, de modo que ele tenha a sensação de estar interagindo diretamente com o ambiente, porém sem as perturbações típicas do mesmo (ruído, vibrações, calor, etc) e com a possibilidade de ampliação dessa percepção pela inclusão de dispositivos de instrumentação tais como sensores de torque e força, câmeras estéreo ou hiperespectrais, microfones, etc.

Dessa forma, pesquisas tem sido desenvolvidas com o objetivo de aplicar técnicas de teleoperação a equipamentos de mineração. No entanto, não somente é necessária a implementação de tais sistemas, mas também sua validação diante do usuário. Essa validação deve incluir a análise de aspectos que afetam o senso de imersão do usuário e sua satisfação geral com a teleoperação.

Neste trabalho, a aplicação de uma metodologia para avaliação de interfaces de teleoperação é analisada. A metodologia adotada utiliza questionários que focam em analisar como características do controlador e o conforto do usuário com o dispositivo aumentam o senso de imersão e alteram

o desempenho. Para validar a viabilidade da aplicação da metodologia, um teste de conceito foi realizado através de um experimento teste inicial conduzido em laboratório utilizando uma plataforma robótica móvel comercial. O experimento consistiu em guiar a plataforma robótica em um cenário contendo obstáculos, utilizando uma interface de teleoperação composta por dispositivos de vídeo e háptico.

A organização do artigo é descrita a seguir. A Seção 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre teleoperação de equipamentos e trabalhos que propõem metodologias de avaliação de interfaces de teleoperação. A metodologia de avaliação aplicada neste trabalho é apresentada na Seção 3. Na Seção 4 é apresentado o procedimento experimental adotado. A Seção 5 apresenta e discute os resultados obtidos a partir dos experimentos. Por fim, a Seção 6 finaliza este artigo com as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

Teleoperação, vista como um dos aspectos mais antigos da própria robótica, pode ser definida como robótica à distância (Niemeyer et al., 2008). Na teleoperação, qualquer planejamento de alto nível ou decisão são feitos pelo operador, enquanto que o equipamento é responsável pela implementação mecânica do sistema.

O conceito de teleoperação não é recente e o primeiro trabalho desenvolvido é atribuído a Raymond C. Goertz (Goertz, 1952; Goertz e Bevilacqua, 1952; Goertz, 1954), que desenvolveu sistemas eletro-mecânicos para manipulação de materiais radioativos nas décadas de 1940-1950.

O estudo da teleoperação foi sempre impulsionado por motivos de:

- segurança humana em ambientes adversos (plantas nucleares e químicas);
- alto custo para se atingir certos locais (espaço);
- dificuldade de acesso (micromanipulação).

Com isso, sua aplicação se estende às mais diversas áreas: robótica espacial (Yoshida e Wilcox, 2008; Bibby e Necessary, n.d.), ambientes perigosos e situações de regaste (Murphy et al., 2008; Murphy, 2004), sistemas médicos e reabilitação (Van der Loos e Reinkensmeyer, 2008) e na indústria da mineração (Corke et al., 2008).

Além da definição das interfaces de teleoperação, são necessárias metodologias para avaliação da adequação dessas interfaces diante dos usuários. Isso porque, apesar da separação física entre operador e equipamento, deseja-se prover ao operador uma experiência natural e realista com o ambiente remoto, de tal forma que ele tenha a sensação de estar presente no ambiente.

De acordo com Witmer (Witmer e Singer, 1998), presença é o estado psicológico de “estar

lá” mediado por um ambiente que engaja nossos sentidos, captura nossa atenção e promove nosso envolvimento ativo. O nível de presença observado depende da fidelidade dos componentes sensoriais, da natureza das interações e tarefas solicitadas e da concentração do usuário.

Dessa forma, propostas de metodologias para avaliar o desempenho de interfaces de teleoperação do ponto de vista do usuário vem sendo estudadas há anos. Em grande parte, essas propostas focam em desenvolver medidas para analisar o grau de presença e envolvimento dos usuários durante a realização das tarefas de teleoperação.

Trabalhos de autores que propuseram diferentes metodologias para avaliar o senso de presença de usuários são relacionados em (Witmer e Singer, 1998). Além disso, é proposto o *Presence Questionnaire (PQ)*, um questionário que tem sido amplamente utilizado como uma das principais metodologias de avaliação do senso de presença e imersão de usuários de interfaces de teleoperação (Sallnäs et al., 2000; Kechavarzi et al., 2012; Silva et al., 2016; Lee et al., 2016). Esse questionário conta com 33 questões e seus itens podem ser agrupados em quatro fatores principais envolvidos no senso de presença: (1) Envolvimento, (2) Adaptação/Imersão, (3) Fidelidade Sensorial e (4) Qualidade da Interface.

## 3 Metodologia de Avaliação

A metodologia aplicada foca em como o conforto do usuário com o controlador e suas características aumentam o senso de imersão e alteram o desempenho, em termos de tempo e acurácia de realização da tarefa, além da satisfação geral do usuário com a teleoperação.

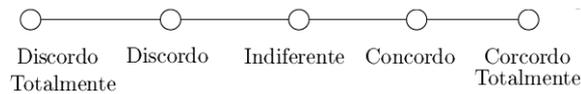
Para aplicação dessa metodologia devem ser definidos um experimento teste, no qual a interface possa ser utilizada, e um grupo de participantes. Idealmente, considerando que a familiaridade com novas tecnologias possa ter efeito sobre o desempenho, os participantes devem possuir diferentes áreas de atuação. Ao se diversificar a amostra, é possível analisar a adequação da interface de teleoperação diante de usuários não treinados.

Depois de realizar cada uma das tarefas propostas, os participantes são submetidos a um questionário para avaliar sua satisfação com o dispositivo e seu senso de imersão. A metodologia adotada utiliza uma adaptação do *PQ* para medir o grau de presença observado pelos participantes.

O questionário original foi adaptado de tal forma que suas perguntas se tornaram itens em uma escala de Likert. O questionário final possui três escalas: envolvimento, adaptação/imersão e qualidade da interface. Juntas, elas definem o nível de presença observado pelo usuário.

Itens de Likert são amplamente utilizados quando se deseja conhecer em detalhes a opinião

do entrevistado diante de uma afirmação apresentada. Dessa forma, ao final dos testes é possível analisar cada item separadamente ou em conjunto (escala) e, através da utilização de análises estatísticas adequadas, algumas informações e conclusões podem ser obtidas. Um exemplo seria a seguinte afirmação “A explicação sobre a escala de Likert foi esclarecedora.”, juntamente com as seguintes opções de resposta:



Por fim, a metodologia adotada contém uma entrevista conduzida ao final do experimento com todos os participantes. O objetivo dessa entrevista é obter a percepção diretamente dos usuários com relação à interface e à experiência de teleoperação e traçar o perfil do usuário com relação à sua familiaridade com dispositivos hápticos e com a teleoperação de robôs.

A partir dos dados obtidos com os questionários e entrevista, algumas análises estatísticas podem ser conduzidas para avaliação dos resultados obtidos. Para os experimentos realizados neste trabalho, considerando que o número de amostras analisadas é, estatisticamente falando, pequeno ( $n < 100$ ), o teste  $t$  (Trochim, 2006), utilizado para avaliar se duas médias são estatisticamente diferentes, foi utilizado nas análises.

Para expressar os resultados obtidos a partir da aplicação do teste  $t$ , a seguinte nomenclatura foi adotada:  $T(gl) = valor1, p = .valor2$ , onde  $gl$  representa os graus de liberdade;  $valor1$ , o valor  $t$ , e  $valor2$  representa o valor  $p$ . Além disso, os dados das amostras são expressos em termos de sua média ( $M$ ) e erro padrão ( $EP$ ):  $M = média$ ;  $EP = erro\ padrão$ .

A viabilidade da aplicação desta metodologia foi analisada através de um teste em laboratório. Um ambiente simplificado representando um cenário com obstáculos foi montado em escala experimental e o objetivo do operador era controlar a navegação da plataforma robótica no ambiente, evitando colisões com os obstáculos e realizando as tarefas propostas.

## 4 Procedimento Experimental

Nesta seção, é apresentado o procedimento utilizado para avaliação da interface de teleoperação.

### 4.1 Participantes

Os participantes deste estudo foram recrutados através da divulgação direta do experimento a ser conduzido. Foram selecionados 15 homens e 1 mulher, com idade média de 26 anos, a partir de sua disponibilidade, e com diferentes níveis e escolari-

dade e áreas de atuação : 3 de Humanas (Música, Administração), 10 de Ciências Exatas (Computação, Eng. Elétrica, Eng. de Controle e Automação, Eng. Mecânica) e 3 não declarados. Além disso, como pode ser observado ao final do experimento através da entrevista conduzida, os participantes possuíam diferentes níveis de familiaridade com dispositivos hápticos e com a teleoperação de robôs.

Cabe ressaltar que o número de participantes selecionados será elevado em experimentos futuros. No entanto, para o teste inicial proposto este número é suficiente.

### 4.2 Componentes

Abaixo são descritos os equipamentos e demais materiais utilizados neste experimento.

#### 4.2.1 Plataforma Robótica

Os experimentos foram conduzidos utilizando uma plataforma robótica móvel Seekur Jr. (Figura 1) e um cenário simplificado representando um ambiente com obstáculos montado em laboratório.



Figura 1: Plataforma Robótica Seekur Jr.

O Seekur Jr. integra diversos dispositivos:

- Câmera PTZ RVision SEE
- Câmera estéreo MobileRanger C3D
- Laser range finder SICK LMS-111
- GPS Trimble AG-372 GNSS receiver

Para o experimento em questão, somente o laser foi utilizado para detecção de obstáculos. O laser realiza a medição da distância de objetos localizados a até 20m em uma faixa de 270°. Caso os objetos detectados estejam dentro da área de colisão com a plataforma robótica, uma força proporcional a essa distância é aplicada no *joystick*. A direção desta força é definida pela localização do obstáculo detectado.

Além disso, uma câmera Axis P1224E foi integrada ao Seekur Jr.. As imagens obtidas dessa câmera foram projetadas em um monitor LCD, for-

recendo as imagens utilizadas pelo operador para teleoperar a plataforma.

#### 4.2.2 Dispositivo de Controle

Dispositivos hápticos são amplamente utilizados em diversas áreas. Para aumentar o desempenho do operador, em ambientes simulados ou teleoperados, interfaces hápticas são utilizadas para proporcionar aos operadores a sensação de estar tocando o ambiente real diretamente (Hannaford e Okamura, 2008).

Além de tentar replicar ou aprimorar a sensação de toque ou manipulação, as interfaces hápticas são utilizadas para ampliar a percepção do ambiente real. Neste experimento, como ao utilizar uma câmera monocular a noção de profundidade é perdida por parte do operador, a realimentação de força é utilizada em um dispositivo háptico para suprir a deficiência causada pela perda de informações. Com isso, a realimentação de força proporciona ao usuário informações adicionais sobre a presença de obstáculos ao redor da plataforma robótica ao longo do percurso.

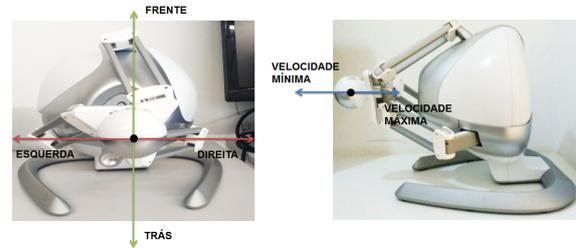
Assim, para controlar a plataforma robótica, foi utilizado o Novint Falcon, um *joystick* háptico de 3 graus de liberdade. Inicialmente desenvolvido para jogos, o Falcon tem encontrado espaço em diversas aplicações por possuir o recurso de realimentação de força e preço acessível (Martin e Hillier, 2009; Vanacken et al., 2010; Renon et al., 2013; Davies et al., 2009). Cabe ressaltar que o Falcon é comumente utilizado para propósitos de testes de conceito em laboratório, diferenciando-se, portanto, de *joysticks* desenvolvidos para controle de equipamentos.

Para atuar como dispositivo de controle, duas configurações de comando foram estabelecidas para o Falcon. Essas configurações se diferenciam quanto aos eixos que são utilizados e a função de cada um deles. Os comandos para as configurações 1 e 2 do Falcon podem ser vistos nas Figuras 2a e 2b, respectivamente. Durante os experimentos, os participantes utilizaram as duas configurações.

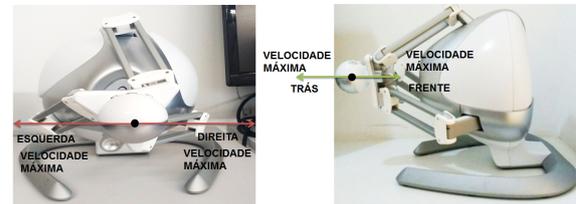
A realimentação de força do Falcon foi definida de acordo com a detecção de obstáculos no ambiente. Para isso, foram utilizados os dados de distância e ângulo de medição obtidos do laser situado na plataforma robótica.

#### 4.2.3 Questionário e Entrevista

Durante os experimentos, os participantes realizaram duas tarefas distintas utilizando as diferentes configurações do Falcon, com e sem realimentação de força. Depois de realizar cada tarefa, eles responderam o questionário para avaliar sua satisfação com o dispositivo e seu senso de imersão.



(a) Comandos para a Configuração 1 do Falcon.



(b) Comandos para a Configuração 2 do Falcon.

Figura 2: Comandos para as configurações do Falcon.

As questões foram adaptadas<sup>1</sup> de (Witmer e Singer, 1998) para adequá-las à realidade dos experimentos conduzidos através da exclusão de perguntas referentes a som e à manipulação de objetos, uma vez que a montagem utilizada não fornecia tais recursos. Assim, as questões incluíam perguntas tais como quão bem eles puderam controlar os eventos, quão naturais as interações com o ambiente foram e quão ciente eles estavam dos dispositivos de vídeo e de controle.

#### 4.3 Condução dos Experimentos

Ao chegar ao laboratório, os participantes puderam ver o robô que iriam controlar remotamente, mas não puderam controlá-lo previamente ou estudar o ambiente no qual as tarefas seriam realizadas. Cada participante realizou duas tarefas, cujas representações esquemáticas podem ser vistas na Figura 3.

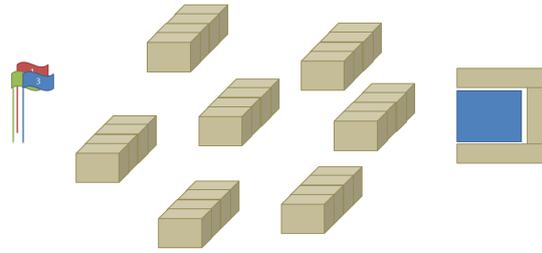
A Figura 4 mostra o ambiente no qual os testes foram realizados, destacando a separação física entre o operador e a plataforma robótica teleoperada<sup>2</sup>.

Na primeira tarefa, o objetivo era percorrer o caminho entre as paredes, contornar o conjunto de cones e estacionar o robô no seu ponto inicial. Para a segunda tarefa, a única diferença é que os cones deveriam ser contornados de acordo com a cor-numeração: 1-vermelho, 2-verde, 3-azul.

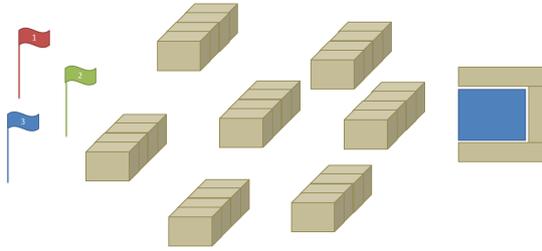
A primeira tarefa foi realizada uma vez com cada configuração do *joystick* sem a realimentação de força. Nesse caso, a ordem com que as configurações foram apresentadas para os participantes foi aleatória. Logo após, foi solicitado que o participante escolhesse a configuração preferida.

<sup>1</sup>O questionário utilizado pode ser encontrado em <https://github.com/aline-fidencio/presenceQuestionnaire>.

<sup>2</sup>Um vídeo sobre os testes realizados pode ser encontrado em: <https://youtu.be/4HMjSov66mU>



(a) Representação esquemática da primeira tarefa.



(b) Representação esquemática da segunda tarefa.

Figura 3: Representação esquemática das tarefas.

Com a configuração escolhida, o participante repetiu a primeira tarefa com a realimentação de força do Falcon ativada. Por fim, o participante realizou a segunda tarefa utilizando a configuração escolhida, com e sem realimentação de força, e, de forma semelhante, a ordem de utilização ou não da realimentação de força foi aleatória.

Durante a realização das tarefas, o tempo de execução de cada uma foi anotado, bem como o número de obstáculos colididos. Além disso, foi estabelecido um nível de conclusão das tarefas.

Após completar cada uma das cinco tarefas, os participantes responderam o questionário de avaliação da experiência, totalizando cinco questionários por participante. Por fim, após a realização de todas as tarefas, os participantes responderam à entrevista final, na qual foram abordadas questões envolvendo o conforto e a facilidade de uso das configurações, a sensação de imersão do participante e sua percepção diante do uso da realimentação de força para a detecção de obstáculos.

## 5 Resultados

Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

### 5.1 Tarefa e Tempo de Execução

A Tabela 1 apresenta os tempos de execução de cada tarefa para cada configuração do *joystick*.

De acordo com o teste *t*, não existem diferenças significativas entre os tempos de execução das tarefas ( $T(49) = 0.79, p = .44$ ). A comparação direta entre os tempos de execução, no entanto, sugere que o tempo para completar a segunda tarefa ( $M = 00:06:26; EP = 00:01:01$ ) é maior que para a primeira tarefa ( $M = 00:05:32; EP = 00:00:33$ ). Esse resultado é consistente com as características das tarefas



(a) Ambiente do operador (local).



(b) Ambiente da plataforma robótica (remoto).

Figura 4: Ambiente de realização dos testes.

uma vez que a segunda tarefa demandou que o participante navegasse com o robô por um trajeto mais longo. No entanto, o tempo de execução varia de forma significativa entre as configurações ( $T(48) = 2.21, p = .03$ ) e a comparação desses tempos sugere que o tempo de realização das tarefas com a configuração 1 do Falcon ( $M = 00:07:01; EP = 00:00:02$ ) é maior que para a configuração 2 ( $M = 00:04:46; EP = 00:00:00$ ).

Ao analisar se as áreas de atuação dos participantes teriam algum efeito sobre seu desempenho, diferenças significativas foram encontradas enquanto comparando as áreas de Humanas *vs* Exatas ( $T(64) = 2.54, p = .007$ ) e Exatas *vs* Não Declarados ( $T(59) = 3.30, p = .002$ ). Nenhuma diferença significativa foi encontrada entre os tempos de execução para Humanas *vs* Não Declarados ( $T(28) = 1.29, p = .021$ ). Esse resultado sugere que participantes atuantes em áreas nas quais a exposição à tecnologia tipicamente é maior tendem a mais rapidamente se familiarizarem ao dispositivo de controle e realizar as tarefas.

### 5.2 Acurácia no Controle e Conclusão da Tarefa

O desempenho de cada participante também foi avaliado mediante observação da movimentação do robô no ambiente e do nível de conclusão da tarefa. A Tabela 2 apresenta a porcentagem de conclusão de cada uma das tarefas.

Não existe diferença significativa na acurácia ao se comparar as configurações do *joystick* ( $T(78) = 1.66, p = .10$ ) ou as tarefas

Tabela 1: Tempo médio (min) para execução e erro padrão (EP) para as tarefas e configurações para todos os participantes (n = 16).

Configuração		Tarefa 1	Tarefa 2
		Sem força	M = 00:05:55; EP = 00:00:53
Configuração 1	Com força	M = 00:06:55; EP = 00:02:24	M = 00:08:23; EP = 00:02:49
	Sem força	M = 00:05:14; EP = 00:00:44	M = 00:03:57; EP = 00:00:21
Configuração 2	Com força	M = 00:04:41; EP = 00:00:20	M = 00:04:43; EP = 00:00:26

Tabela 2: Porcentagem de conclusão das tarefas.

	Tarefa 1	Tarefa 2
Configuração 1	54.17	62.50
Configuração 2	75.00	75.00

( $T(78) = 0.40, p = .69$ ). Logo, observa-se que as configurações não tem efeitos distintos sobre a acurácia na realização das tarefas e que a relação configuração-tarefa também não afeta a acurácia.

Ao analisar a quantidade de obstáculos atingidos em cada caso, também não foram encontradas diferenças significativas, exceto para a primeira tarefa, utilizando a configuração 2 do Falcon com realimentação de força (M = 1.00; EP = 0.27) e sem realimentação de força (M = 2.97; EP = 0.62) ( $T(20) = 2.86, p = .01$ ). No entanto, a comparação direta entre os valores sugere que a realização das tarefas com a realimentação de força reduz o número de obstáculos atingidos (Tabela 3).

Considerando a percepção dos participantes através da entrevista final, a maioria concordou (82.3%<sup>3</sup>) que a realimentação de força aumentou a percepção de obstáculos. Além disso, os participantes se mostraram indiferentes (54.7%<sup>3</sup>) diante da facilidade de realização das tarefas sem a realimentação de força e concordaram (67.2%<sup>3</sup>) que foi mais fácil a realização das tarefas com a realimentação (mesmo não havendo diferenças significativas nos tempos e acurácia de execução). Segundo muitos participantes, a realimentação de força contribuiu significativamente para a detecção de obstáculos; no entanto, ela limitava a liberdade de comando. Essa percepção pode ter contribuído para a baixa aceitação da realimentação de força, sendo um fato que merece, portanto, um estudo mais aprofundado.

### 5.3 Senso de Imersão

Nenhuma diferença significativa foi encontrada ao comparar as diferentes configurações utilizadas, tanto com realimentação de força quanto sem, em termos do senso de imersão percebido pelo participante. Isso sugere que nenhuma das configurações do *joystick* apresenta vantagens ou desvantagens evidentes. Além disso, não há evidências de que a avaliação do usuário para cada configuração tenha alguma relação com o senso de imersão do mesmo.

<sup>3</sup>porcentagem obtida através da escala de Likert.

Cabe ressaltar, no entanto, que o senso de imersão (67.5%) sugere que os participantes se envolveram nas tarefas que estavam realizando. No entanto, alterações no sistema podem trazer melhorias nesse sentido. Dentre os 16 participantes, 10 mencionaram que a resolução e os atrasos das imagens da câmera dificultaram a realização das tarefas e a identificação do ambiente. Além disso, sendo o *joystick* e a experiência de teleoperação novos para a maioria dos participantes, a ansiedade dos mesmos diante desse novo sistema pode ter atuado como um fator de distração.

### 5.4 Entrevista Final

A entrevista final mostrou que, de maneira geral, os participantes se mostraram satisfeitos com a teleoperação. Eles foram solicitados a descrever a experiência utilizando três palavras. Foram obtidas 35 palavras distintas. Essas palavras foram agrupadas em positivas (*e.g.* interessante, contagiante, instigante), negativas (*e.g.* doloroso, instável, incapacidade), neutras (*e.g.* real, nova, usual) e outras (*e.g.* eu, experiência, avançada). A maioria, 45%, avaliou de maneira positiva, 14% de maneira negativa, 22% foram avaliações neutras e 17% foram palavras que não puderam ser encaixadas nas categorias anteriores.

As configurações do Falcon também foram avaliadas de acordo com três quesitos: intuitividade, facilidade de utilização e confiança no uso. Os resultados mostram que não existe um consenso entre as configurações, como pode ser visto na Figura 5. Nesse ponto, cabe ressaltar que alguns participantes não avaliaram as duas configurações segundo todos os quesitos. No entanto, esse resultado sugere que tornar as configurações de comando de um dispositivo de controle parametrizáveis a cada operador pode trazer maiores benefícios ao cobrir diferentes expectativas.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Com o objetivo de minimizar os riscos a que estão expostos os operadores em diferentes atividades e aumentar a produtividade, diversas empresas tem buscado a utilização de sistemas automatizados. Muitas soluções propostas apontam para a utilização de técnicas de teleoperação de equipamentos, uma vez que em muitos casos a intervenção do operador/especialista, mesmo que mínima, ainda

Tabela 3: Quantidade média de obstáculos atingidos e erro padrão (EP) para as tarefas e configurações para todos os participantes (n = 16).

Configuração		Tarefa 1	Tarefa 2
		Sem força	M = 2.50; EP = 0.47
Configuração 1	Com força	M = 1.88; EP = 0.83	M = 2.13; EP = 0.58
	Sem força	M = 2.94; EP = 0.62	M = 2.63; EP = 0.53
Configuração 2	Com força	M = 1.00; EP = 0.27	M = 2.38; EP = 0.93

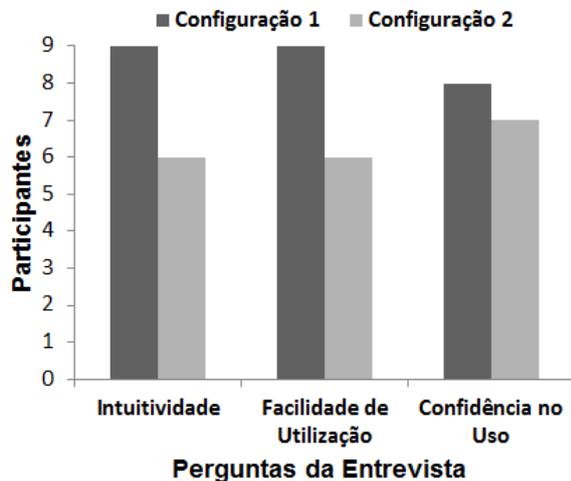


Figura 5: Avaliação das configurações do Novint Falcon na entrevista final.

se faz necessária. Esse cenário, obviamente, não é diferente dentro das indústrias de mineração.

Com a aplicação da teleoperação, é possível, além de reduzir os riscos a que o operador está exposto durante a realização de suas atividades, melhorar o desempenho na operação dos equipamentos. No entanto, ao se construir uma interface de teleoperação, é igualmente relevante a validação dessa interface do ponto de vista do usuário.

Desse modo, este trabalho apresentou a utilização de uma metodologia para avaliação de interfaces de teleoperação. Sua aplicação foi analisada durante um experimento teste simplificado, e os resultados mostram que ela aponta para pontos fracos e fortes na interface sendo analisada.

Apesar desses resultados serem preliminares, alguns fatores importantes puderam ser observados. Há evidências de que usuários que tem maior contato com tecnologia apresentam maior facilidade de adaptação ao dispositivo de controle e conseguem realizar as tarefas mais rapidamente. Enquanto esse resultado sugere que é interessante a seleção de operadores de acordo com algumas características preexistentes, ele também mostra que é importante o contato com tecnologia para permitir a um público maior a habilidade e confiança para teleoperar robôs.

Além disso, a avaliação das configurações do *joystick* mostra que, por cobrir diferentes expectativas, a possibilidade de personalização a cada operador pode trazer benefícios ao permitir a adaptação do sistema a diferentes usuários.

Por fim, apesar da baixa aceitação da realimentação de força, a maioria dos participantes concorda que ela aumentou significativamente a percepção de obstáculos. Esse resultado mostra que fornecer informações adicionais ao operador através de diferentes sentidos influencia positivamente a execução de suas tarefas.

Com isso, é possível observar que a aplicação de tais metodologias pode trazer benefícios significativos durante o desenvolvimento de interfaces robustas de teleoperação.

Considerando a interface utilizada para o experimento inicial, os resultados mostram que, apesar de positivos, ainda existem vários pontos que podem e devem ser melhorados. Assim, trabalhos futuros incluem:

- Realizar o experimento com uma amostra de tamanho mais significativo;
- Realizar o experimento com usuários de perfis voltados para a operação de equipamentos de mineração;
- Utilizar tarefas com níveis de dificuldade mais distintos durante a realização dos testes;
- Melhorar as informações visuais fornecidas ao operador através da inclusão, por exemplo, de um óculos de realidade virtual e uma câmera estéreo;
- Permitir que o participante possa comandar a plataforma robótica previamente.

Por fim, tendo como alvo as aplicações na indústria da mineração, deseja-se desenvolver uma interface de teleoperação que possa ser aplicada a equipamentos de mineração, sejam eles utilizados em operações de exploração mineral, engenharia ou lavra. Assim, o objetivo é o desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação de interfaces de teleoperação que possa ser aplicada a esta interface a ser desenvolvida durante testes reais com equipamentos de mineração. Cabe ressaltar que para um cenário real a aplicação de tal metodologia apresentará diferentes níveis de dificuldades e que estas deverão ser consideradas durante o planejamento e a execução dos experimentos.

### Agradecimentos

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

### Referências

- Bibby, J. e Necessary, R. (n.d.). Robonaut 1, <https://robonaut.jsc.nasa.gov/R1/>. Acesso em: 07/12/2016.
- Corke, P., Roberts, J., Cunningham, J. e Hainsworth, D. (2008). *Mining Robotics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1127–1150.
- Davies, R. A., Maskery, J. S. e John, N. W. (2009). Chemical education using feelable molecules, *Proc. of the 14th Int. Conf. on 3D Web Technology*, ACM, pp. 7–14.
- Goertz, R. (1952). Fundamentals of general-purpose remote manipulators, *Nucleonics (U.S.) Ceased publication* **10**(11): 36–42.
- Goertz, R. (1954). Mechanical master-slave manipulator, *Nucleonics (U.S.) Ceased publication* **10**(11): 45–46.
- Goertz, R. e Bevilacqua, F. (1952). A force-reflecting positional servomechanism, *Nucleonics (U.S.) Ceased publication* **10**(11): 43–45.
- Hannaford, B. e Okamura, A. M. (2008). *Haptics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 719–739.
- Kechavarzi, B. D., Sabanovic, S. e Weisman, K. (2012). Evaluation of control factors affecting the operator's immersion and performance in robotic teleoperation, *2012 IEEE RO-MAN*, pp. 608–613.
- Lee, M., Kim, K., Daher, S., Raij, A., Schubert, R., Bailenson, J. e Welch, G. (2016). The wobbly table: Increased social presence via subtle incidental movement of a real-virtual table, *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 11–17.
- Martin, S. e Hillier, N. (2009). Characterisation of the novint falcon haptic device for application as a robot manipulator, *Australasian Conf. on Robotics and Automation (ACRA)*, Citeseer, pp. 291–292.
- Murphy, R. R. (2004). Trial by fire [rescue robots], *IEEE Robot. Automa. Mag.* **11**(3): 50–61.
- Murphy, R. R., Tadokoro, S., Nardi, D., Jacoff, A., Fiorini, P., Choset, H. e Erkmen, A. M. (2008). *Search and Rescue Robotics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1151–1173.
- Niemeyer, G., Preusche, C. e Hirzinger, G. (2008). *Telerobotics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 741–757.
- Renon, P., Yang, C., Ma, H. e Cui, R. (2013). Haptic interaction between human and virtual icub robot using novint falcon with chai3d and matlab, *Pro. of the 32nd Chinese Control Conf.*, pp. 6045–6050.
- Sallnäs, E.-L., Rasmus-Gröhn, K. e Sjöström, C. (2000). Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback, *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* **7**(4): 461–476.
- Silva, G. R., Donat, J. C., Rigoli, M. M., de Oliveira, F. R. e Kristensen, C. H. (2016). A questionnaire for measuring presence in virtual environments: factor analysis of the presence questionnaire and adaptation into brazilian portuguese, *Virtual Reality* **20**(4): 237–242.
- Trochim, W. M. (2006). The t-test, [https://www.socialresearchmethods.net/kb/stat\\_t.php](https://www.socialresearchmethods.net/kb/stat_t.php). Acesso em: 05/04/2017.
- Van der Loos, H. M. e Reinkensmeyer, D. J. (2008). *Rehabilitation and Health Care Robotics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1223–1251.
- Vanacken, L., De Boeck, J. e Coninx, K. (2010). *The Phantom versus the Falcon: Force Feedback Magnitude Effects on User's Performance during Target Acquisition*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 179–188.
- Witmer, B. G. e Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire, *Presence: Teleoperators and virtual environments* **7**(3): 225–240.
- Yoshida, K. e Wilcox, B. (2008). *Space Robots and Systems*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1031–1063.

### C.3 ABM WEEK 2017

#### ROBÓTICA NA MINERAÇÃO

## ROBÓTICA NA MINERAÇÃO

Eduardo Cota<sup>1</sup>  
Marcos Paulo Torre<sup>1</sup>  
Jhony Alan Tavares Ferreira<sup>1</sup>  
Aline Xavier Fidêncio<sup>1</sup>  
Guilherme Brito Rodrigues<sup>2</sup>  
Filipe Augusto Santos Rocha<sup>3</sup>  
Héctor Azpúrua<sup>4</sup>  
Gustavo Medeiros Freitas<sup>5</sup>  
Wilson Miola<sup>6</sup>

### Resumo

Graças à miniaturização e aumento na robustez de equipamentos eletrônicos, a robótica tem estendido as suas aplicações até às mais diversas áreas. Atualmente a mineração possui muitos desafios a serem resolvidos com soluções tecnológicas autônomas ou teleoperadas. Este trabalho aborda a descrição de algumas das técnicas e projetos do estado da arte da robótica que estão sendo aplicados em ambientes de mineração no Brasil e no mundo.

**Palavras-chave:** Robótica; Teleoperação; Automação; Mineração

### MINING ROBOTICS

#### Abstract

Thanks to the miniaturization and robustness increase of electronic equipment, robotics has extended its applications to the most diverse areas. Today, mining has many challenges to be solved with technological solutions. This work addresses some of the state of the art robotics techniques and projects currently being applied in mining environments in Brazil and worldwide.

**Keywords:** Robotics; Tele-operation; Automation; Mining

<sup>1</sup> *Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Mestrando(a), Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

<sup>2</sup> *Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

<sup>3</sup> *Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Pesquisador assistente, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

<sup>4</sup> *Mestre em Ciências da Computação, Pesquisador assistente, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

<sup>5</sup> *Doutor em Engenharia Elétrica, Pesquisador assistente, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

<sup>6</sup> *Doutor em Engenharia de Minas, Pesquisador titular, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade tradicional no Brasil, mas possui riscos para operadores humanos. Dado o grande número de tarefas repetitivas e perigosas, a mineração possui um enorme escopo para aplicações robóticas. Operações mineradoras requerem o manuseio de enormes quantidades de material de forma economicamente viável e segura. Altos custos operacionais, a necessidade de grande produtividade e melhores resultados de saúde e segurança impulsionam ainda mais o uso de robôs. As abordagens existentes para otimizar produtividade e segurança através de treinamento, práticas de trabalho e design de máquinas maiores têm retornado cada vez menos os investimentos aplicados. A indústria se aproxima de uma nova era, na qual robôs e automação irão ditar o futuro em termos de produtividade e segurança (Siciliano et al. [1]).

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: altas temperaturas; excesso de umidade; poeira; solo irregular; exposição a riscos de queda e desabamento - que elevam os gastos de desenvolvimento, execução e manutenção. Além disso, considerando que a análise dos recursos de uma mina, que determina a sua rentabilidade, é um cálculo que pode variar, a introdução de novas tecnologias poderia oferecer riscos aos lucros da mineradora.

Mesmo diante das dificuldades encontradas, o aumento da necessidade de se produzir mais e da inaceitabilidade de acidentes humanos e danos ambientais, faz com que, atualmente, o investimento seja indispensável. Na literatura são sinalizados aumentos significativos de produção e segurança aplicando-se técnicas de automação. Por exemplo, tem se observado o aumento em 20% na produtividade através da automação aplicada a pás carregadeiras de minas subterrâneas (Load Haul Dump), e em outro caso, a automação de veículos carregadores efetivamente reduz custos de manutenção e aumenta continuidade de produção (Siciliano et al. [1]). Quase uma década depois, (Siciliano et al. [2]) salienta que as companhias mineradoras atuais têm renovado esforços em abordagens inovativas como solução para exploração de recursos naturais.

No Laboratório de Controle e Robótica do Instituto Tecnológico Vale (ITV), em Ouro Preto-MG, são desenvolvidos projetos visando satisfazer as necessidades atuais de atividades mineradoras realizadas pela VALE. Neste artigo será abordado o estado da arte da robótica na mineração e serão detalhados alguns dos trabalhos de robótica aplicada na mineração realizados no laboratório.

O restante do texto se encontra dividido em: Seção 2, na qual serão descritos alguns dos trabalhos de robótica mais relevantes na área de mineração; Seção 3, são detalhados alguns dos trabalhos relevantes desenvolvidos dentro do Brasil; Seção 4, onde são descritos os projetos robóticos realizados no Instituto Tecnológico da Vale (ITV); e finalmente Seção 5, onde são mostradas as considerações finais e ideias futuras.

## 2 ESTADO DA ARTE

No trabalho de Singh [3], o estado da arte da automação aplicada a equipamentos relacionados à mineração, como: tratores, escavadeiras e carregadeiras, era apontada apenas como uma tendência. Duas décadas depois, a tendência se confirma e as aplicações de automação e robótica na mineração se fazem cada vez mais necessárias para empresas que querem atingir metas em um mercado globalizado.

Saúde e segurança é um tema recorrente no ramo da mineração. Mesmo que o número de fatalidades tenha sido reduzido consideravelmente, segundo o MSHA [4], somente em 2016, 25 pessoas morreram em atividades mineradoras nos EUA. O ambiente de mineração sempre oferecerá riscos ao homem, mas as atividades de exploração precisam continuar para suprir as necessidades das indústrias de todo o mundo. Uma maneira óbvia de garantir que não haverá danos ao homem é retirar todo o contingente humano das áreas de operações perigosas. Com este intuito, muitos investimentos em atividades teleoperadas e autônomas têm sido realizados.

### 2.1 Teleoperação

Na mineração, é muito comum a utilização de explosivos para o desmonte de rochas. Este procedimento é necessário para que a rocha seja fragmentada em tamanhos que seja possível o carregamento e transporte com os atuais equipamentos. Após o processo de desmonte, porém, permanecem alguns fragmentos com tamanhos não desejáveis. Visando corrigir este problema, Duff et al. [5] desenvolveram um sistema robótico teleoperado para quebrar estes fragmentos em tamanhos menores para adequá-los ao processo de transporte.

O objetivo do trabalho é demonstrar a viabilidade da implementação de um sistema de controle aplicado a longas distâncias considerando efetividade e segurança. Além de não expor o operador do equipamento ao ambiente hostil de operação, a teleoperação pode causar aumento da produtividade pelo não deslocamento do mesmo até o local de fragmentação de rocha. Inserir o operador neste local de forma virtual é um desafio pela limitação dos sensores e câmeras. Como o máximo de informações auxilia em uma melhor tomada de decisão, utilizou-se uma abordagem híbrida que envolve o uso de visualização direta através de câmeras e visualização sintética através do uso de sensores e computação gráfica. Os testes realizados apresentaram resultados positivos. Com apenas meia hora de interação com o sistema de controle, o operador foi capaz de quebrar pedaços de rocha a quilômetros de distância. Apesar do sucesso, algumas considerações foram registradas em relação à dificuldade de operar com grandes fragmentos; a problemas de concentração devido ao alto número de telas e às limitações da representação do ambiente real.

O processo de carregamento de explosivos pode ser caracterizado como perigoso simplesmente pela potencial destruição causada pelos mesmos. Tendo como objetivo a minimização dos riscos e dificuldades desta atividade, Bonchis et al. [6] desenvolveram e testaram um sistema robótico para a execução do carregamento de explosivos. O dispositivo possui sistema de detecção de furos, onde são carregados os explosivos; e opção de posicionamento do braço automático ou teleoperado. Devido às limitações das funções automáticas, a opção

teleoperada se faz necessária.

De acordo com Hayashi et al. [7], a performance da teleoperação é limitada em relação à operação direta, por razão da perda de consciência e sensibilidade causada pelo ambiente remoto. Para tentar compensar essa lacuna, foi proposto o desenvolvimento de um *feedback* tátil para a teleoperação de uma escavadeira. Neste sentido, foi desenvolvida a função de vibração do controle à medida que a pá do equipamento se aproxima do chão. Dessa forma, a falta de sensibilidade causada pela ausência de sentidos do ambiente real é diminuída com informações adicionais da posição do equipamento.

## 2.2 Operação autônoma

A evolução dos sistemas teleoperados seriam os sistemas autônomos. A grande diferença é dada pelo fato de que um sistema considerado autônomo é preparado para tomar decisões sem a necessidade da intervenção humana. Ou seja, o sistema possui percepção e é equipado com atributos suficientes para realizar uma decisão de acordo com as informações adquiridas. Segundo Larsson et al. [8], apesar do enorme potencial para se aumentar produtividade e segurança, os sistemas completamente autônomos nem sempre são aplicáveis ou economicamente viáveis. Considerando isso, foi implementado um sistema de autonomia local (aplicada apenas na fase de transporte) em um equipamento teleoperado, utilizado para carregamento e transporte de minério e estéril em minas subterrâneas.

A ideia de se aplicar autonomia local tem como intenção o aumento da velocidade de transporte, visando uma maior produtividade; a redução da latência, visto que menos comandos de controle seriam enviados; e a diminuição de colisões devido à diminuição da carga cognitiva sobre o operador, o que reduz custos de manutenção. A avaliação da eficiência do trabalho foi feita por meio da medição o tempo gasto para a locomoção do equipamento e a contagem do número de incidentes ocorridos durante a locomoção, com e sem o uso das novas implementações.

Os resultados se mostraram positivos e nenhum dos incidentes ocorridos foi registrado durante locomoção por autonomia local. Além da segurança ocasionada, a autonomia resultou em tempos menores de operação (para locomoção reta), inclusive se comparado à operação na qual o operador está embarcado. Dessa forma, a autonomia, apesar de local - aplicada somente na fase de transporte, se mostrou uma alternativa clara para o aumento de produtividade, segurança e a redução de custos para o transporte de materiais em minas subterrâneas.

Outro exemplo de sucesso da aplicação de autonomia em atividades mineradoras é apresentado por Jordan [9]. Caminhões com capacidade de 330 toneladas, usados para transporte de estéril e minério no deserto mais seco do mundo - o Atacama, no Chile - operam de forma autônoma sem qualquer intervenção humana durante a locomoção do equipamento. Bellamy et al. [10] apresentam uma avaliação da utilização de veículos semelhantes em minas na Austrália. Em um comparativo realizado, é mostrada a diferença de ociosidade de um equipamento autônomo e operado: o veículo autônomo opera o equivalente a 22 dias a mais por ano que o operado. Dessa forma, é nítido o aumento da produtividade e a redução de custos atingida. Os autores ainda destacam que minas anteriormente definidas como economicamente inviáveis poderão ser reativadas

com os recursos financeiros economizados com o uso de veículos autônomos.

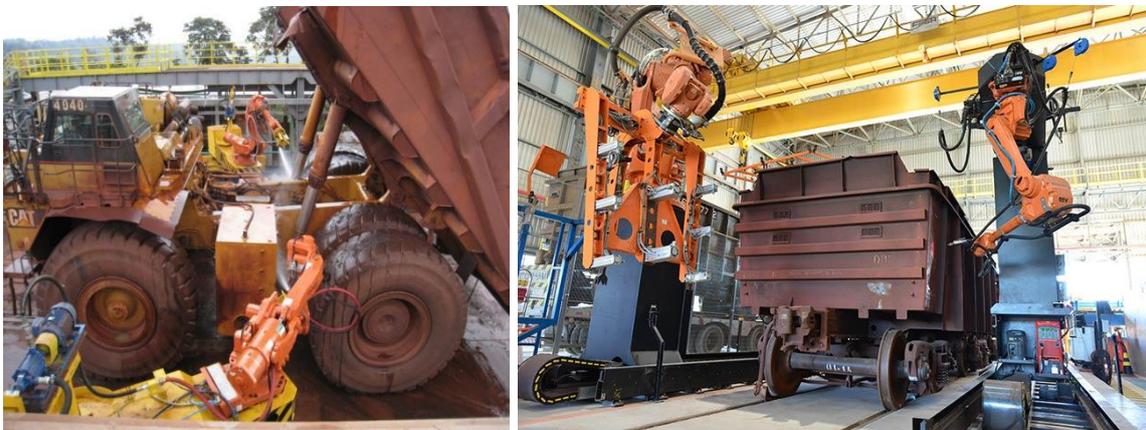
De acordo com Henderson et al. [11], a empresa Rio Tinto já utiliza uma frota de caminhões inteiramente autônomos no oeste da Austrália. Segundo Rio Tinto Media [12], a frota de caminhões autônomos já moveu 300 milhões de toneladas em Pilbara, Austrália. Com uma frota de 53 veículos autônomos percorreu-se quase quatro milhões de quilômetros em Yandicoogina, Nammuldi e Hope Downs 4, também na Austrália.

### 3 MINERAÇÃO E ROBÓTICA NO BRASIL

O Brasil possui algumas das maiores reservas de minérios do mundo e dispõe de uma indústria de mineração muito ativa. A mineração é vista como uma das indústrias mais maduras da região, mas devido ao grande custo operacional e humano envolvido na adaptação de tecnologias de automação e robótica dentro da mina ou porto, o Brasil ainda se encontra explorando o que as novas tecnologias podem acrescentar nos processos tradicionais de extração, processamento, inspeção, e monitoramento. Para as mineradoras, novas tecnologias representam uma grande oportunidade para ganhos em produtividade e segurança Mesquita et al. [13].

No Brasil, a empresa Vale já utiliza diferentes robôs em suas operações, que visam padronizar e aumentar a eficiência dos processos, assim como reduzir custos e riscos para seus empregados. Os sistemas robóticos são usados na montagem, manutenção e limpeza de equipamentos de mineração, além da preparação e manipulação de amostras durante ensaios laboratoriais.

Esses dispositivos estão presentes, por exemplo, na limpeza de caminhões fora de estrada (Figura 1 (a)). São veículos com altura de um prédio de dois andares e um tanque que comporta 4,5 mil litros de óleo diesel. As dimensões de um gigante como este tornam a limpeza manual uma tarefa perigosa para os empregados. O lavador de caminhões de Carajás emprega dois robôs industriais, um em cada lateral do lavador, que se locomovem por até 19 metros de trilhos e alcançam 4,5 metros de altura, movimentando-se conforme a programação definida. Com a tecnologia e a padronização, o serviço ganhou em produtividade e, ao mesmo tempo, reduziu impactos ambientais. Cerca de 80% da água é reutilizada no processo.



(a)

(b)

Figura 1 - Automação na mina: (a) Lavador de caminhões robotizado e (b) recomposição de chapas de vagões.

Outro exemplo da utilização de sistemas robóticos na Vale é o da recomposição de chapas de vagões que circulam na Estrada de Ferro Carajás (EFC) (Figura 1 (b)). Como na linha de montagem da indústria automobilística, o sistema usado na EFC é composto de braços mecânicos capazes de realizar o corte e a solda de placas de aço carbono presentes na lateral dos vagões. Na fase manual da atividade, a troca de chapas de apenas um vagão era realizada em 48 horas. Com o robô, é possível fazer a manutenção de dois vagões em 22 horas.

Na oficina mecânica de pelletização em Vitória, um braço robótico realiza o serviço de montagem de barras de grelha. Cada carro de grelha é formado por 360 barras, cada uma pesando cinco quilos. O emprego do robô no serviço mais pesado resultou na redução imediata de 20% a mão de obra nessa atividade, permitindo aos empregados se dedicarem a outras atividades relacionadas à manutenção. Com isso, a média diária de manutenção dos carros de grelha dobrou. Na usina de pelletização 8, também em Vitória, um robô é usado no controle de amostragem das pelotas. Com este equipamento, foi possível aumentar a segurança operacional, reduzir a quantidade de equipamentos envolvidos no processo e diminuir a movimentação do material até a área de testes.

Em Carajás (PA), o Laboratório de Preparação e Ensaios Físicos também possui uma célula robótica capaz de realizar testes para determinação da granulometria do minério de ferro com mais segurança e confiabilidade. Basta o técnico alimentar o robô com o minério e programar o ensaio para que o equipamento selecione a peneira, realize as pesagens, peneiramento e envie os dados consolidados para um banco de dados. Já o laboratório de Itabira (MG) consiste num sistema composto por quatro células robotizadas, onde são preparadas e manipuladas amostras prensadas e fundidas para análises químicas de mineração. Esta robotização melhorou as condições de segurança e produtividade das análises. No Laboratório de Ensaios Físicos de Vargem Grande (MG), um robô manipula amostras de minérios entre esteiras, pulverizadores, britador e estufa. O sistema robótico é utilizado para aumentar a padronização e eficiência do processo.

## 4 DESENVOLVIMENTOS DO INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE

Esta secção descreve algumas das tecnologias e trabalhos de robótica mais relevantes sendo desenvolvidos atualmente no Instituto Tecnológico Vale, os quais são diretamente aplicados como soluções de mineração.

### 4.1 Atividades com manipuladores robóticos

A maioria dos robôs industriais utilizam *softwares* proprietários e controladores nativos, de arquitetura fechada, fazendo com que a integração com dispositivos de fabricantes diferentes, algoritmos e sensores se torne uma tarefa difícil de ser feita diretamente. Segundo Bartolomeu et al. [14], 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.

Uma possível solução para o problema de integração é a implementação do controle dos equipamentos à partir de um sistema unificado, possibilitando tomadas de decisão mais adequadas e cruzamento de informações. Além disso, um sistema unificado permite dar mais flexibilidade à aplicação, pois diversos tipos diferentes de algoritmos para interagir com o sistema podem ser aplicados de maneira mais simples, como de otimização, tratamento de imagens e visão computacional.

Desta forma, foi introduzida a utilização do sistema ROS, uma ferramenta flexível para implementação de *softwares* para robôs, apresentando uma coleção de ferramentas, bibliotecas e convenções, geralmente escritas nas linguagens de programação C++ ou Python (ROS [15]). O manipulador robótico utilizado para a prova de conceito foi o IRB 120 da ABB, cujo controlador é o IRC5 Compact. Ele utiliza a mesma linguagem de programação dos braços robóticos de grande escala presentes atualmente na Vale. Dessa forma, toda modificação realizada pode ser transferida de igual maneira para os sistemas robóticos que estão em operação.

O desenvolvimento deste projeto consiste em controlar totalmente o braço robótico através do ROS, utilizando uma ferramenta para planejamento de trajetórias chamada MoveIt!. O robô pode ser posicionado através de uma interface gráfica interativa, onde é possível definir pontos dentro do espaço de trabalho do robô e a melhor trajetória entre o ponto inicial e final é calculada. Outra funcionalidade que pode ser desenvolvida através desta integração é o desvio de obstáculos. Na Figura 2 é mostrado um objeto verde incorporado à cena e o caminho feito pelo manipulador para evitar a colisão com o objeto. O próprio *software* identifica a colisão com o obstáculo e calcula a melhor trajetória para que o desvio ocorra.

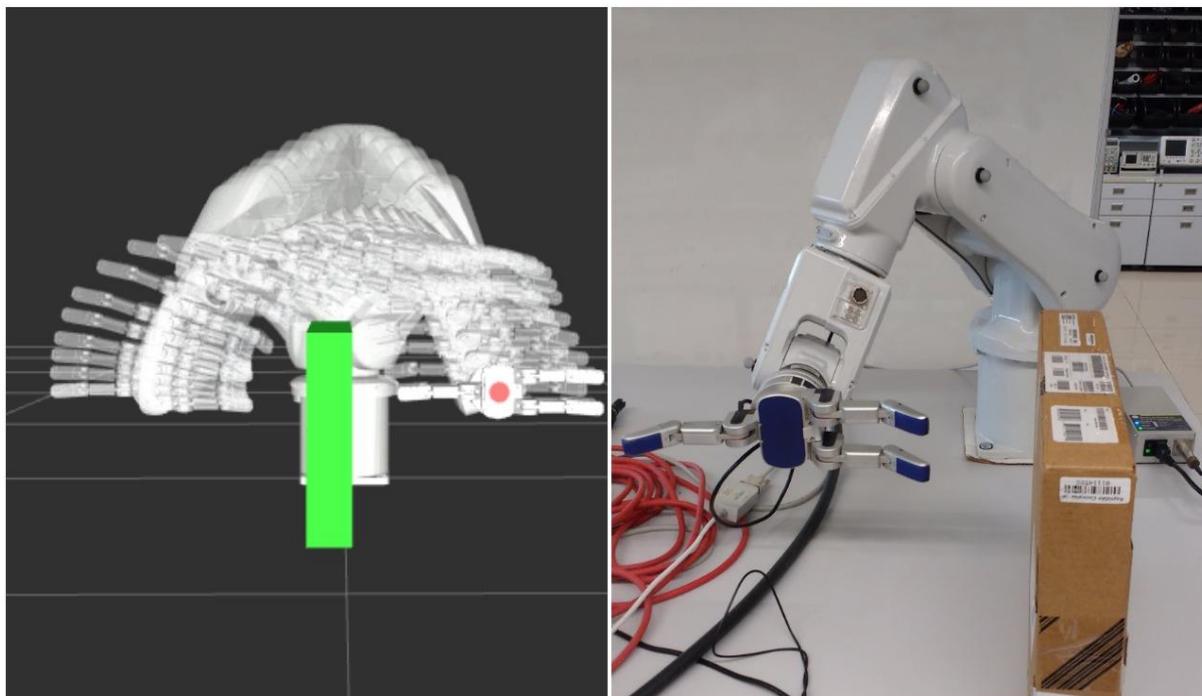


Figura 2 - Trajetória planejada com desvio de obstáculo e pose final executada pelo robô real.

O método abordado apresenta grande flexibilidade e robustez, devido ao sistema ser centralizado no *framework* ROS. Apesar de sua flexibilidade, este método exige uma grande reformulação no sistema da célula robótica que receberá a aplicação. Para projetos de novas plantas, seu uso deve ser considerado, pois

facilitará, no futuro, a integração com novos dispositivos e sistemas.

#### 4.2 Robô de exploração de cavidades

É recorrente nas áreas de exploração mineral o descobrimento de cavidades naturais. Por questões legais e ambientais, não é permitido explorar economicamente estas áreas sem antes haver catalogação do ambiente. A investigação então é crucial para viabilizar a extração mineral em regiões onde há cavidades. Os espeleólogos são os cientistas especializados em realizar estas explorações, entretanto, cavidades naturais podem ser ambientes hostis e perigosos.

Com iniciativa da área de espeleologia da Vale, e tendo em vista a segurança dos colaboradores, está sendo desenvolvido no Instituto Tecnológico Vale (ITV) um robô com o intuito de realizar o mapeamento de cavidades. Os operadores podem utilizar os dados coletados para analisar antecipadamente os riscos do ambiente.

Conhecido como EspeleoRobô, este dispositivo é inspirado no robô hexápode RHex (Boston Dynamics [16]). Devido à heterogeneidade dos terrenos que podem ser encontrados em cavidades naturais é usada locomoção mista entre rodas e pernas dependendo da situação (Figura 3). Os modos de locomoção podem ser alterados mediante um sistema de troca rápida desenvolvida especialmente para o robô.

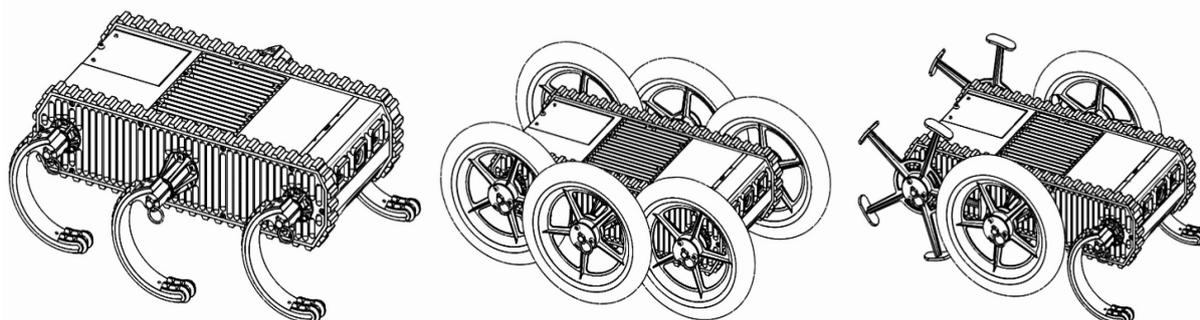
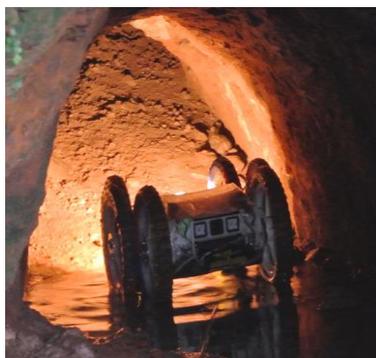


Figura 3 - Configurações de locomoção do EspeleoRobô hexápode original, apenas com rodas e híbrida, respectivamente.

Mecanicamente, o protótipo do robô desenvolvido é constituído de peças em poliacetal e alumínio; materiais de baixa densidade. A comunicação com a base de operações é realizada através do rádio *wireless* digital Ubiquiti Rocket M900. Há seis motores CC para acionamento de cada eixo do robô, separadamente. A comunicação com estes é realizada através de barramento CAN. O computador central de controle do robô é um Intel® NUC de alto desempenho. Toda a programação do dispositivo foi feita utilizando ROS.

O robô já foi a campo em diferentes tipos de terreno. Na mina da Passagem (Mariana-MG) foram testadas a locomoção e, principalmente, a comunicação em ambientes subterrâneos; foi atingida a marca de 175m de comunicação sem fio em ambiente confinado. Em parceria com a prefeitura de Ouro Preto, o robô foi levado a uma mina abandonada em área de risco (Figura 4(a)). Mesmo com solo lamacento e com filetes d'água, o dispositivo demonstrou boa mobilidade e funcionamento. Mais recentemente o EspeleoRobô foi levado para inspecionar a galeria da barragem do

Rio do Peixe, Itabira-MG (Figura 4(b)). Foram obtidas inclusive imagens com luzes infravermelhas do interior da galeria.



(a) Mina abandonada localizada em área de risco, Ouro Preto-MG



(b) Barragem de Rio Peixe, Itabira-MG

Figura 4 - Testes de campo

Apesar de ter sua concepção focada na exploração de cavidades, o robô já se mostrou polivalente para investigar outros tipos de ambientes. Sua flexibilidade no modo de locomoção utilizado permite que este seja usado nos mais variados tipos de terreno, sejam eles confinados ou não. O EspeleoRobô se mostra então uma ferramenta já concebida muito relevante quando há a necessidade de explorar um ambiente onde o ser humano não possa, ou não deva, ir.

#### 4.3 Teleoperação de equipamentos de mineração

Dentre os diversos equipamentos de mineração aos quais as técnicas de teleoperação são aplicadas, as escavadeiras são uma aplicação potencial. No processo de transporte, estes equipamentos são os mais utilizados para movimentação do material até caminhões ou outros mecanismos de transporte. Devido às dificuldades técnicas em se obter uma escavadeira verdadeiramente autônoma, as técnicas de teleoperação tem sido extensivamente aplicadas com o objetivo de se otimizar tal operação (Moon et al. [17]; Yusof et al. [18]).

No ITV, a aplicação da teleoperação à escavadeira está sendo investigada por meio da realização de testes de conceito em laboratório utilizando uma plataforma robótica móvel equipada com um braço robótico e diversos equipamentos sensores. O objetivo é analisar que tipo de informação efetivamente contribui para que a teleoperação mais eficiente, eficaz e segura. Para tal, um sistema de teleimersão está sendo desenvolvido. Este sistema permitirá a interação entre o operador (sistema local) e a plataforma robótica (sistema remoto). O sistema local utilizará um óculos de realidade virtual e uma plataforma robótica móvel Seekur Jr. equipada com um braço manipulador Schunk Powerball de seis graus de liberdade contendo um sensor de força e torque no efetuador, sendo capaz de representar e operar de maneira similar a equipamentos da mineração.

O Seekur Jr. integra uma série de dispositivos: Câmera PTZ RVision SEE, Câmera estéreo MobileRanger C3D, Laser range finder SICK LMS-111 e IMU. Os sensores visuais fornecerão as imagens até o operador usando óculos de realidade virtual com a finalidade de aumentar a imersão. Os dispositivos hápticos serão utilizados para prover ao operador uma sensação mais realista de todas as

interações mecânicas entre o equipamento teleoperado e o meio.

Dois dispositivos hápticos são utilizados: um Novint Falcon e um Phantom Omni. O Falcon será utilizado para comandar a locomoção do robô. Com isso, será possível realimentar para o operador a informação caso o robô esteja, por exemplo, prestes a atingir um obstáculo, de tal forma que, caso o operador insista em direcionar o robô no sentido do obstáculo, ele literalmente sinta resistência no dispositivo háptico. Enquanto que o Phantom será utilizado para comandar o manipulador robótico e a possibilidade de realimentação de informações de colisão também se aplicará a este caso, considerando-se que o manipulador robótico integra em seu efetuator um sensor de força e torque através do qual as informações sobre as forças externas atuando sobre o mesmo serão obtidas. Os dados coletados pelo laser presente na plataforma robótica serão utilizados para o mapeamento do ambiente onde o equipamento teleoperado se encontrará. Esta informação, ao ser transmitida para o operador, irá aprimorar sua capacidade de visualização do ambiente remoto e poderá ser utilizada na definição do caminho a ser percorrido pelo equipamento e na detecção de possíveis obstáculos a serem transpostos.

Na Figura 5 é mostrado o ambiente no qual testes preliminares de locomoção foram realizados, destacando a separação física entre o operador e a plataforma robótica teleoperada.



(a) Ambiente local (operador)

(b) Ambiente remoto (robô)

Figura 5: Ambiente de realização de testes

Assim, é esperado que os resultados experimentais apontem para uma forma eficaz de se construir um ambiente de teleoperação que permita ao operador uma sensação o mais realista possível ao interagir com o ambiente remoto e o equipamento teleoperado.

#### 4.4 Carregamento de explosivos

Uma das atividades que envolvem alto risco na mineração é o carregamento e detonação de explosivos. Nós propomos uma possível solução aos riscos da atividade, através do carregamento autônomo de explosivos na região de desmonte de minério usando robôs móveis.

Tradicionalmente, o carregamento de explosivos requer uma equipe especialista que, na região de desmonte, insere uma mangueira no furo de detonação para carregar os explosivos através de uma bomba. Essas atividades, que normalmente seriam executadas pela equipe treinada, seriam futuramente realizadas por uma plataforma móvel equipada com um braço manipulador.

A plataforma móvel utilizada é também o Seekur Jr. A emulação do

carregamento de explosivos executada pela plataforma proposta é dividida em 3 etapas: (i) Navegação até a região do furo, localização e inserção da mangueira no furo. A navegação autônoma até a região do furo é realizada através de técnicas de mapeamento e localização simultâneas (SLAM) e algoritmos de planejamento de trajetória (Dijkstra e Trajectory Rollout); (ii) A localização do furo é feita através de processamento de imagens (detecção de círculos e elipses) adquiridas por uma câmera estéreo; (iii) E, por último, com a posição do furo calculada, o braço manipulador utiliza algoritmos de busca em árvores (RRT) para planejar uma trajetória e projetar o braço sobre o furo (Figura 6).

O sistema foi avaliado em ambientes controlados de laboratório mostrando a factibilidade da aplicação deste tipo de tecnologia em ambientes de mina. Futuros experimentos serão realizados em ambientes reais, com o uso de sensores mais robustos para a adequação ao ambiente.

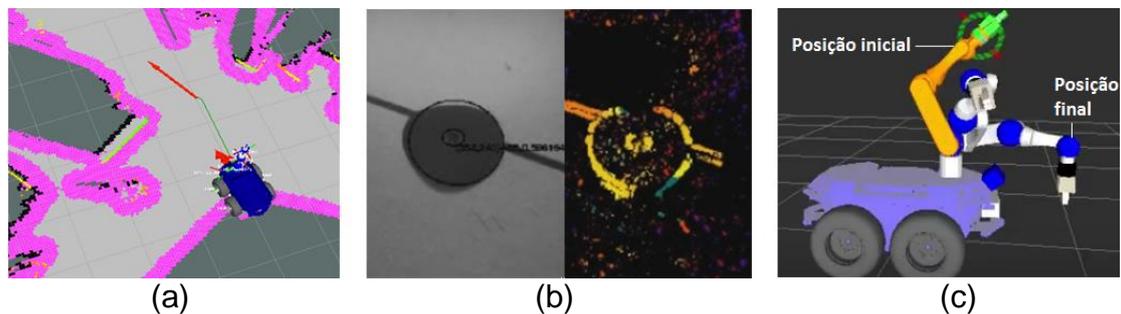


Figura 6: Emulação do carregamento de explosivos: (a) mapeamento e navegação autônoma, (b) detecção do furo, (c) posicionamento do manipulador sobre o furo

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma visão geral sobre o estado da arte da robótica na mineração no mundo, e especificamente um conjunto de alguns dos trabalhos mais relevantes sendo desenvolvidos na mineração no Brasil. Muitos dos problemas abordados pela robótica na mineração tratam sobre segurança e aumento da eficiência. Existe o uso de robôs teleoperados, semi-autônomos e autônomos, diminuindo o risco de operadores. Ao redor do mundo temos uso de veículos de transporte totalmente autônomos funcionando praticamente 24h/dia e sistemas de controle robustos que gerenciam e controlam todo o movimento do minério, desde a sua extração na mina até o envio final no porto. O uso de robótica de manipuladores é muito estendido para tarefas altamente repetitivas ou perigosas como troca de pneus de caminhão ou posicionamento de barras de metal, o que traz uma grande vantagem em segurança para os operadores.

Também foram mostradas as dificuldades de implantação das novas tecnologias em ambientes difíceis como a minas a céu aberto ou portos, onde: poeira, alta temperatura, excesso de umidade e dificuldade de acesso, tornam a tarefa de automatização um grande desafio tecnológico.

Embora a robótica esteja avançada o suficiente para resolver alguns dos problemas clássicos da mineração como transporte, monitoramento, inspeção e segurança, o Brasil ainda é uma região onde existem muitos desafios a serem resolvidos devido à grande oportunidade de inserção de tecnologias novas. Com a

abertura das empresas ao uso de novas tecnologias e aumento dos investimentos em pesquisa dentro da mina, o uso da robótica para suporte das operações será comum nos próximos anos, sendo ele um dos pilares da Mineração 4.0.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à equipe do Laboratório de Robótica do Instituto Tecnológico Vale. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, Vale S.A e FAPEMIG.

## REFERÊNCIAS

- 1 SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer handbook of robotics**. Springer, 2008.
- 2 SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer handbook of robotics**. 2ª. Springer, 2016.
- 3 SINGH, Sanjiv. State of the art in automation of earthmoving. **Journal of Aerospace Engineering**. 1997; v. 10, n. 4, p. 179-188.
- 4 United States Department of Labor: Mine Safety and Health Administration. ALL MINING FATALITIES BY STATE by CALENDAR YEAR 2017. 2017 [acesso em 12 jun. 2017]. Disponível em: <https://arlweb.msha.gov/stats/charts/allstates.pdf>.
- 5 DUFF, Elliot et al. The development of a telerobotic rock breaker. In: **Field and Service Robotics**. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 411-420.
- 6 BONCHIS, Adrian et al. Robotic explosive charging in mining and construction applications. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**. 2014; v. 11, n. 1, p. 245-250.
- 7 HAYASHI, Kouki; TAMURA, Takayuki. Teleoperation performance using excavator with tactile feedback. In: **Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on**. IEEE, 2009. p. 2759-2764.
- 8 LARSSON, Johan; BROXVALL, Mathias; SAFFIOTTI, Alessandro. An evaluation of local autonomy applied to teleoperated vehicles in underground mines. In: **Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on**. IEEE, 2010. p. 1745-1752.
- 9 JORDAN, Pav Jordan. Chile's new Gaby copper mine steps into the future. Reuters. 2008. [acesso em 10 jun. 2017]; Disponível em: <http://uk.reuters.com/article/chile-codelco-gaby-idUKN2133325020080521>.
- 10 BELLAMY, Drew; PRAVICA, Luka. Assessing the impact of driverless haul trucks in Australian surface mining. **Resources Policy**. 2011. v. 36, n. 2, p. 149-158.
- 11 HENDERSON, Jason; SPENCER, Jason. Autonomous Vehicles and Commercial Real Estate. **Cornell Real Estate Review**. 2016 v. 14, n. 1, p. 14.
- 12 Rio Tinto Media. Rio Tinto improves productivity through the world's largest fleet of owned and operated autonomous trucks. 2014 [acesso em 12 jun. 2017]. Disponível em: [http://www.riotinto.com/media/media-releases-237\\_10603.aspx](http://www.riotinto.com/media/media-releases-237_10603.aspx).
- 13 MESQUITA, P. P. D.; CARVALHO, P. S. L. de; OGANDO, Laura Duarte. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. 2016. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro**, n. 43.
- 14 BARTOLOMEU, Paulo et al. Integração de Informação na equipa de Futebol Robótico CAMBADA. **Electrónica e Telecomunicações**. 2005. v. 4, n. 4, p. 467-477.
- 15 ROS. 2013 [acesso em 22 jan. 2017]; Disponível em: <http://www.ros.org/about-ros/>
- 16 RHEX, Boston Dynamics. 2017. [acesso em 30 jan. 2017]. Disponível em: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_rhex.html](http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html).
- 17 MOON, S. M. et al. Development of tele-operation control station for intelligent excavator. **IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications**, 2009. p.123-128.
- 18 YUSOF, Ahmad Anas et al. Modern practical application and research on teleoperated excavators control, feedback and perception issues in post disaster recovery operation. In: **Robotics and Intelligent Sensors (IRIS), 2015 IEEE International Symposium on**. IEEE, 2015. p. 179-185.