



Lucas Carvalho Gonçalves

Modelagem, Controle e Realimentação de Força para a Teleoperação de Manipuladores Móveis do Tipo Escavadeira

Belo Horizonte - Minas Gerais

Janeiro, 2022

Lucas Carvalho Gonçalves

**Modelagem, Controle e Realimentação de Força para
a Teleoperação de Manipuladores Móveis do Tipo
Escavadeira**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica - PPGEE

Orientador: Gustavo Medeiros Freitas

Belo Horizonte - Minas Gerais
Janeiro, 2022

G635m

Gonçalves, Lucas Carvalho.

Modelagem, controle e realimentação de força para teleoperação de manipuladores móveis do tipo escavadeira [recurso eletrônico] / Lucas Carvalho Gonçalves. - 2022.

1 recurso online (xxxii, 106 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Gustavo Medeiros Freitas.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f.100-106.

Bibliografia: f. 90-99.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Interfaces (Computador) – Teses. 3. Simulação (Computadores) – Teses. 4. Soluções em mineração – Teses. I. Freitas, Gustavo Medeiros. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

**"Modelagem, Controle e Realimentação de Forças para a
Teleoperação de Manipuladores Móveis do Tipo
Escavadeira"**

Lucas Carvalho Gonçalves

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 28 de janeiro de 2022.

Por:



Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Armando Alves Neto
DELT (UFMG)



Prof. Dr. Douglas Guimarães Macharet
DCC (UFMG)



Prof. Dr. Gustavo Pessin
Controle e Robótica (Instituto Tecnológico Vale - ITV)

Dedico este trabalho a todos que de alguma forma contribuíram para que ele se tornasse realidade, em especial à minha irmã que sempre me inspira e em memória das minhas avós que tanto acreditaram e sonharam comigo enquanto puderam.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, fonte da minha vida, inspiração e sabedoria. Agradeço também aos meus pais e à minha família que sempre me mostraram o poder da educação e do conhecimento no fomento do meu próprio destino.

Gostaria de agradecer a Universidade Federal de Minas Gerais e ao Instituto Tecnológico Vale pelos recursos oferecidos para pesquisa realizada nesta dissertação, por meio do projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*. Agradeço também a equipe de pesquisadores e colegas, em especial ao Gustavo Pessin pelo suporte por meio do ITV; ao Paulo Rezeck, pesquisador do VeRLab, pela paciência e solicitude em compartilhar os seus conhecimentos, sendo fundamental para concretização desta dissertação, e principalmente, pela amizade construída; e ao meu orientador Gustavo Medeiros Freitas pelos seus ensinamentos e por me conceder essa oportunidade única.

Gostaria de agradecer aos principais órgãos de fomento, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsas de mestrado, e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos oferecidos ao projeto.

Por fim, e não menos importante, agradeço imensamente à minha namorada Keicy Anni de Paula pela motivação em realizar o mestrado e pelo apoio em momentos difíceis dessa trajetória. Obrigado por estarmos juntos.

*“One, remember to look up at the stars and not
down at your feet. Two, never give up work.
Work gives you meaning and purpose and life
is empty without it. Three, if you are lucky
enough to find love, remember it is there and
don’t throw it away.”*
Stephen Hawking

Resumo

Teleoperação pode ser definida como a operação de equipamentos ou dispositivos localizados fisicamente distantes do operador, estendendo a capacidade humana de manipular objetos e controlar equipamentos remotamente, provendo ao operador as informações necessárias para tornar a interação o mais natural e transparente possível. Tais sistemas podem ser aplicados em diferentes áreas, como cirurgia médica, exploração espacial, manipulação de materiais radioativos, inspeção de áreas confinadas e mineração. No caso da mineração, a teleoperação pode auxiliar na redução da presença física de trabalhadores em campo, aumentando a segurança e o conforto para os operadores de equipamentos de mineração, bem como possibilitar o aumento de produtividade. Neste contexto, o projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*, realizado em parceria entre o Instituto Tecnológico Vale (ITV) e o Laboratório de Visão Computacional e Robótica (VeRLab) do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), tem como objetivo principal desenvolver um arcabouço computacional de teleoperação para realizar tarefas remotas com um veículo do tipo escavadeira. Esta dissertação faz parte do projeto e apresenta um estudo e investigação de técnicas consideradas como estado da arte para compor três configurações de realimentação de força do arcabouço: a primeira configuração sem nenhum tipo de informação háptica do ambiente remoto; a segunda com realimentação de força permitindo ao operador sentir as interações da caçamba da escavadeira com objetos; a terceira combinando as forças de interação com forças que direcionam o operador ao local de escavação/depósito. As diferentes estratégias de teleoperação são verificadas experimentalmente, por meio de testes realizados em laboratório utilizando uma plataforma móvel com um braço manipulador, semelhante a uma escavadeira em escala reduzida. Os experimentos consistiram no uso de um dispositivo háptico e de um *joystick* para operar a escavadeira robótica e emular uma tarefa de carregamento/descarregamento de materiais. Por fim, o *NASA Task Load Index* (NASA-TLX) foi utilizado com um grupo de voluntários para medir a carga de trabalho ao teleoperar a plataforma robótica usando as configurações de operação propostas. Os resultados mostram que a realimentação de força diminui o consumo de energia do equipamento e atenua o estresse físico do equipamento ao ter contato direto com uma superfície, assistindo o operador e trazendo segurança à máquina durante a teleoperação. Contudo, a carga de trabalho para realização da tarefa, medida por meio do NASA-TLX, aumentou para a maioria dos voluntários, revelando a necessidade de especialização de mão de obra à medida que o sistema se torna automatizado.

Palavras-chave: Teleoperação, Realimentação de Força, Dispositivo Háptico, Equipamentos de Mineração, Manipuladores Móveis.

Abstract

Teleoperation can be defined as the operation of equipment or devices located physically distant from the operator, extending the human capacity to manipulate objects and control equipment remotely, providing the operator with the necessary information to make the interaction as natural and transparent as possible. Such systems can be applied in different areas such as medical surgery, space exploration, handling radioactive materials, inspection of confined areas and mining. In the case of mining, teleoperation can help reduce the physical presence of field workers, increasing safety and comfort for mining equipment operators, as well as enabling the increase in productivity. In this context, the project *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*, carried out in partnership between Instituto Tecnológico Vale (ITV) and Laboratório de Visão Computacional e Robótica (VeRLab) of the Computer Science Department at Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), aims to develop a teleoperation computational framework to perform remote tasks with an excavator-type vehicle. This master thesis is part of the project and presents a study and investigation of techniques considered as state of the art to compose three framework force feedback configurations: the first configuration without any kind of haptic information from the remote environment; the second with force feedback allowing the operator to sense the excavator's bucket interactions with objects; the third combining the interaction forces with those that direct the operator to the excavation/deposit site. The different teleoperation strategies are experimentally verified, through tests carried out in an indoor environment using a mobile platform with a manipulator arm, similar to a scaled-down excavator. The experiments consisted of using a haptic device and a joystick to operate the robotic excavator and emulate a material loading/unloading task. Finally, the *NASA Task Load Index* (NASA-TLX) was used with a group of volunteers to measure the workload when teleoperating the robotic platform using the proposed operating configurations. The results show that the force feedback reduces the equipment's energy consumption and the physical stress of the equipment during direct contact with a surface, assisting the operator and providing safety to the machine during teleoperation. However, the workload to perform the task, measured through the NASA-TLX, increased for most volunteers, revealing the necessity for labor specialization as the system becomes automated.

Keywords: Teleoperation, Force Feedback, Haptic Device, Mining Equipment, Mobile Manipulators.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Arcabouço computacional utilizado no projeto.	8
Figura 2 – Arcabouço de teleoperação composto por dois modos de realimentação: de força via dispositivo háptico, e visual e auditiva via câmera 360° e câmera RGB-D. O módulo de realimentação de força, destacado por um retângulo vermelho, é o foco desta dissertação.	9
Figura 3 – Diagrama de um sistema de teleoperação (adaptada de (Peer et al., 2010)).	16
Figura 4 – Manipulação de material radioativo por meio de teleoperadores elétricos e mecânicos (Siciliano e Khatib, 2016).	16
Figura 5 – Dimensões nas tecnologias de comunicação determinantes para qualidade da telepresença.	18
Figura 6 – Teleoperação de pá-carregadeira de esteira em Brucutu (Vale).	25
Figura 7 – Decomposição de um robô móvel movido a eletricidade.	31
Figura 8 – Robôs móveis do tipo (a) monociclo, (b) diferencial e (c) SSMR com sistema de coordenadas R representados com respeito ao sistema inercial I	31
Figura 9 – Representação do modelo cinemático do monociclo.	32
Figura 10 – Modelo cinemático do robô com rodas diferencial.	33
Figura 11 – Modelo cinemático do SSMR.	35
Figura 12 – Representação da cadeia cinemática serial de um robô manipulador.	38
Figura 13 – Representação das transformações de coordenadas em um robô manipulador.	39
Figura 14 – Diagrama de controle de velocidade a nível de juntas.	42
Figura 15 – Diagrama de controle cinemático proporcional com ação <i>feedforward</i>	43
Figura 16 – Diagrama de controle cinemático proporcional de regulação.	45
Figura 17 – Abstração do sistema háptico. Uma ferramenta com uma dada geometria em contato com um objeto é operada à distância por meio da construção imaginária de um bastão sem massa e infinitamente rígido. Isso seria equivalente a segurar a ferramenta diretamente (Adaptado de (Hayward e MacLean, 2007)).	47

Figura 18 – Diagrama de blocos de alto nível de uma interface háptica. A caixa em linha pontilhada representa cálculos feitos em um computador. Se o dispositivo tiver vários graus de liberdade, a etapa $f_{a_i}(\bar{d}_{a_{i-1}})$ inclui pelo menos cinco subetapas: converter leituras brutas do sensor em unidades significativas, mudança de coordenadas para mapear as leituras do sensor em coordenadas nas quais o ambiente remoto é representado, mapear as forças do ambiente remoto em torques do motor e mapear os torques em comandos brutos do atuador. (Adaptado de (Hayward e MacLean, 2007)).	48
Figura 19 – Circuitos (Diagramas) mecânicos abstratos.	48
Figura 20 – Ilustração de uma escavadeira com suas partes discriminadas: base móvel e braço manipulador.	51
Figura 21 – Ilustração de um manipulador robótico com 3 juntas ativas representando um braço de escavadeira.	52
Figura 22 – Ilustração do dispositivo háptico com cadeia cinemática semelhante ao manipulador de 3 DoFs.	53
Figura 23 – Diagrama de controle cinemático.	57
Figura 24 – Diagrama de realimentação de força de interação com o ambiente.	58
Figura 25 – Diagrama de realimentação de força atrativa do sistema de direção assistida.	60
Figura 26 – Diagrama de realimentação de forças de interação com o ambiente combinadas com a força atrativa do sistema de direção assistida.	62
Figura 27 – Modelos comerciais dos robôs utilizados no protótipo em escala laboratorial de uma escavadeira.	65
Figura 28 – Arquitetura do sistema de teleoperação proposto e esquema do manipulador móvel.	65
Figura 29 – Ilustração dos botões do <i>joystick</i> não háptico utilizados no arcabouço computacional de teleoperação.	67
Figura 30 – Representação do modelo de comunicação utilizado no <i>Robot Operation System</i> (ROS).	68
Figura 31 – Esquema geral de controle da base móvel usando o arcabouço ROS.	69
Figura 32 – Esquema geral da implementação das estratégias de realimentação de força.	72
Figura 33 – Ambiente montado para o experimento utilizando um local de escavação.	74
Figura 34 – Modelos virtuais do ambiente de experimentação e da plataforma robótica.	75
Figura 35 – Ambiente montado para o experimento utilizando múltiplos locais de escavação.	75
Figura 36 – Realimentação de força nos experimentos de interação com o ambiente.	77

Figura 37 – Demonstração de uma possível consequência da ausência de realimentação de força na teleoperação de uma escavadeira: (a) início do ensaio utilizando a configuração <i>C1</i> ; (b) momento em que a caçamba toca a caixa de escavação; e (c) caçamba da escavadeira robótica sendo arrancada devido aos esforços excessivos contra a caixa de escavação.	78
Figura 38 – Ensaio em laboratório sobre a identificação de corpos volumosos e rígidos durante a execução de uma tarefa de escavação: (a) momento em que o objeto é enterrado; (b) tentativa de escavar material na caixa onde o objeto foi enterrado; e (c) resposta da realimentação de força no dispositivo háptico.	79
Figura 39 – Realimentação de força nos experimentos com campo potencial atrativo.	79
Figura 40 – Resultados das dimensões do NASA-TLX para cada sujeito.	81
Figura 41 – Módulo das forças aplicadas, pelo voluntário 4, à caçamba durante a tarefa. A força de pico significa interação crítica entre a caçamba e os objetos.	83
Figura 42 – Gráficos de intensidade da carga de trabalho.	83
Figura 43 – Ensaio em laboratório que simula uma sequência de tarefas na lavra de precisão: (a) escavação no primeiro local desejado; (b) escavação no segundo local desejado; (c) escavação no terceiro local desejado; e (d) depósito do material escavado no quarto local desejado.	84
Figura 44 – Representação da <i>pose</i> de um corpo rígido.	101
Figura 45 – Sistemas de coordenadas satisfazendo as premissas DH1 e DH2.	105

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Definições das 6 dimensões do NASA-TLX.	62
Tabela 2 – Resumo dos experimentos.	81
Tabela 3 – Desempenho do usuário em cada configuração.	82
Tabela 4 – Resumo do consumo de potência (Watts).	82
Tabela 5 – Premissas dos sistemas de coordenadas de DH.	106

Lista de Abreviaturas e Siglas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ASI	<i>Autonomous Solutions, Inc.</i>
ATV	<i>All-Terrain Vehicle</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CASE	<i>Conference on Automation Science and Engineering</i>
CFTV	Circuito Fechado de Televisão
DLS	<i>Damped Least-Squares</i>
DH	Denavit-Haterberg
DoF	Grau de Liberdade, do inglês, <i>Degree of Freedom</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HITL	<i>Human-In-The-Loop</i>
HMD	<i>Head-Mounted Device</i>
ITV	Instituto Tecnológico Vale
LHD	<i>Load, Haul, Dump</i>
MRT	<i>Multiple Resource Theory</i>
MTH	Matriz de Transformação Homogênea
NASA-TLX	<i>NASA Task Load Index</i>
NREC	<i>National Robotics Engineering Center</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde

PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RCT	<i>Remote Control Technologies</i>
RHI	<i>Rubber Hand Illusion</i>
ROS	<i>Robot Operation System</i>
RPY	<i>Roll, Pitch e Yaw</i>
S3D	<i>Stereoscopic 3D</i>
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>
SSMR	<i>Skid-Steering Mobile Robot</i>
SWAT	<i>Subjective Workload Analysis Technique</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
URDF	<i>Unified Robot Description Format</i>
VeRLab	Laboratório de Visão Computacional e Robótica
VR	<i>Virtual Reality</i>
WP	<i>Workload Profile</i>

Lista de Símbolos

$\mathbf{0}_{1 \times 3}$	Vetor linha nulo com 3 posições
$\mathbf{0}_{3 \times 1}$	Vetor coluna nulo com 3 posições
$\mathbf{0}_{1 \times n}$	Vetor linha nulo com n posições
a	Distância, em relação a X_R , do centro do robô móvel até o centro de cada roda
a_i	Parâmetro da convenção de Denavit-Haterberg (DH) chamado comprimento do i -ésimo elo
b	Distância, em relação a Y_R , do centro do robô móvel até o centro de cada roda
C	Sistema de coordenadas de um corpo rígido
\mathbf{c}_1	Vetor com as constantes geométricas que representam a distância do centro do robô móvel para a posição da roda 1
\mathbf{c}_2	Vetor com as constantes geométricas que representam a distância do centro do robô móvel para a posição da roda 2
\mathbf{c}_3	Vetor com as constantes geométricas que representam a distância do centro do robô móvel para a posição da roda 3
\mathbf{c}_4	Vetor com as constantes geométricas que representam a distância do centro do robô móvel para a posição da roda 4
d_a	Deslocamento do equipamento após o primeiro instante de contato com o objeto
d_i	Parâmetro da convenção de Denavit-Haterberg (DH) chamado deslocamento da i -ésima junta
d_{th}	Distância limiar do objetivo final que alterna entre os potenciais cônico e quadrático
$\bar{d}_{a_{i-1}}$	Deslocamento do $i - 1$ -ésimo DoF do equipamento após o primeiro instante de contato com o objeto

\det	Determinante de uma matriz
e	Número de euler, base dos logaritmos naturais
e_s	Erro em malha fechada de controle do servomotor da junta do robô manipulador
f_a	Valor absoluto da força realizada na extremidade do equipamento ao entrar em contato com um objeto
f_{a_i}	Valor absoluto da força realizada na extremidade do i -ésimo DoF do equipamento ao entrar em contato com um objeto
\mathbf{f}_{att}	Vetor de forças atrativas gerado pelo campo potencial
$f_{att,x}$	Componente x do vetor de forças atrativas gerado pelo campo potencial
$f_{att,y}$	Componente y do vetor de forças atrativas gerado pelo campo potencial
$f_{att,z}$	Componente z do vetor de forças atrativas gerado pelo campo potencial
f_d	Valor absoluto da força realizada no dispositivo háptico após o equipamento ao entrar em contato com um objeto
\mathbf{F}_E	Vetor resultante de forças e torques aplicados ao efetuador do robô manipulador
$f_{E,x}$	Componente x da força do vetor de forças e torques aplicados ao efetuador do robô manipulador
$f_{E,y}$	Componente y da força do vetor de forças e torques aplicados ao efetuador do robô manipulador
$f_{E,z}$	Componente z da força do vetor de forças e torques aplicados ao efetuador do robô manipulador
f_h	Valor absoluto da força sentida na mão do operador quando a extremidade do equipamento entra em contato com um objeto
\mathbf{f}_i	Vetor de forças de interação aplicadas ao efetuador do robô manipulador
$f_{i,x}$	Componente x da força de interação aplicada ao efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
$f_{i,y}$	Componente y da força de interação aplicada ao efetuador do manipulador planar de 3 DoFs

$f_{i,z}$	Componente z do vetor de forças de interação aplicadas ao efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
$\bar{\mathbf{f}}_{\text{att}}$	Vetor de forças atrativas normalizado de acordo com as limitações do dispositivo háptico
$\bar{f}_{\text{att},x}$	componente x normalizado da força atrativa aplicada ao efetuador do robô manipulador
$\bar{f}_{\text{att},y}$	Componente y normalizado da força atrativa aplicada ao efetuador do robô manipulador
$\bar{f}_{\text{att},z}$	Componente z normalizado da força atrativa aplicada ao efetuador do robô manipulador
$\bar{\mathbf{f}}_i$	Vetor de forças de interação normalizado de acordo com as limitações do dispositivo háptico
$\bar{f}_{i,x}$	Componente x normalizado da força de interação aplicada ao efetuador do robô manipulador
$\bar{f}_{i,y}$	Componente y normalizado da força de interação aplicada ao efetuador do robô manipulador
$\bar{f}_{i,z}$	Componente z normalizado da força de interação aplicada ao efetuador do robô manipulador
\mathbf{H}	Matriz de Transformação Homogênea genérica
\mathbf{H}_C^I	Matriz de Transformação Homogênea do sistema de coordenadas do corpo rígido em relação ao inercial
\mathbf{H}_d	Matriz de Transformação Homogênea da configuração desejada do efetuador do robô manipulador
\mathbf{H}_E^B	Matriz de Transformação Homogênea do sistema de coordenadas do efetuador do robô manipulador em relação ao sistema da base
\mathbf{H}_e^b	Matriz de Transformação Homogênea do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs em relação ao sistema da base
\mathbf{H}_i^{i-1}	Matriz de Transformação Homogênea do sistema de coordenadas associado ao i elo do robô manipulador
I	Sistema de coordenadas inercial
$\mathbf{I}_{3 \times 3}$	Matriz identidade de terceira ordem

$\mathbf{I}_{n \times n}$	Matriz identidade de ordem n
\mathbf{J}_C	Matriz Jacobiana de um corpo
\mathbf{J}_h	Matriz Jacobiana do dispositivo háptico
\mathbf{J}_{aM}	Matriz Jacobiana analítica do robô manipulador
\mathbf{J}_{gM}	Matriz Jacobiana geométrica do robô manipulador
\mathbf{J}_{gM}^{-1}	Matriz Jacobiana geométrica inversa do robô manipulador
\mathbf{J}_{gM}^T	Matriz Jacobiana geométrica transposta do robô manipulador
\mathbf{J}_{gm}^T	Matriz Jacobiana geométrica transposta do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{J}_{gM}^\dagger	Pseudo-inversa de Moore-Penrose da matriz Jacobiana geométrica do robô manipulador
\mathbf{J}_{gm}	Matriz Jacobiana geométrica do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{J}_O	Matriz Jacobiana que relaciona a contribuição da velocidade das juntas para a velocidade angular do efetuador do robô manipulador
\mathbf{J}_{O_1}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da primeira junta para a velocidade angular do efetuador do robô manipulador
J_{o_1}	Elemento da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da primeira junta para a velocidade angular do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{J}_{O_2}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da segunda junta para a velocidade angular do efetuador do robô manipulador
J_{o_2}	Elemento da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da segunda junta para a velocidade angular do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
J_{o_3}	Elemento da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da terceira junta para a velocidade angular do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{J}_{O_i}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da i -ésima junta para a velocidade angular do efetuador do robô manipulador
\mathbf{J}_{O_n}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da n -ésima junta para a velocidade angular do efetuador do robô manipulador

\mathbf{J}_P	Matriz Jacobiana que relaciona a contribuição da velocidade das juntas para a velocidade linear do efetuador do robô manipulador
\mathbf{J}_{P_1}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da primeira junta para a velocidade linear do efetuador do robô manipulador
\mathbf{J}_{p_1}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da primeira junta para a velocidade linear do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{J}_{P_2}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da segunda junta para a velocidade linear do efetuador do robô manipulador
\mathbf{J}_{p_2}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da segunda junta para a velocidade linear do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{J}_{p_3}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da terceira junta para a velocidade linear do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{J}_{P_i}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da i -ésima junta para a velocidade linear do efetuador do robô manipulador
\mathbf{J}_{P_n}	Vetor da matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades da n -ésima junta para a velocidade linear do efetuador do robô manipulador
\mathbf{J}_{rM}	Matriz Jacobiana de representação do robô manipulador
$\dot{\mathbf{J}}_C$	Derivada da matriz Jacobiana de um corpo
k_D	Ganho de amortecimento do controle para calcular o torque na junta <i>waist</i> na estratégia de realimentação de força do sistema de direção assistida
\mathbf{K}_M	Matriz definida positiva de ganho proporcional de controle do robô manipulador
k_M	Ganho proporcional de controle do robô manipulador
k_P	Ganho proporcional do controle para calcular o torque na junta <i>waist</i> na estratégia de realimentação de força do sistema de direção assistida
K_s	Ganho de controle proporcional do servomotor de uma junta do robô manipulador
$\lim_{t \rightarrow \infty}$	Limite de uma função quando o tempo tende a infinito

\mathbf{p}	Vetor de posição genérico
\mathbf{p}_C^I	Vetor de posição do sistema de coordenadas de um corpo rígido com relação ao inercial
$p_{C,x}^I$	Componente x de posição do sistema de coordenadas de um corpo rígido com relação ao inercial
$p_{C,y}^I$	Componente y de posição do sistema de coordenadas de um corpo rígido com relação ao inercial
$p_{C,z}^I$	Componente z de posição do sistema de coordenadas de um corpo rígido com relação ao inercial
\mathbf{p}_d	Vetor das coordenadas desejadas do efetuador do robô manipulador
$p_{d,x}$	Coordenada planar x da posição desejada do efetuador do robô manipulador
$p_{d,z}$	Coordenada planar z da posição desejada do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{p}_E^B	Vetor de posição do sistema de coordenadas do efetuador do robô manipulador com relação ao sistema da base
\mathbf{p}_e^b	Vetor de posição do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs com relação ao sistema da base
$p_{e,x}^b$	Coordenada planar x da posição do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
$p_{e,z}^b$	Coordenada planar z da posição do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{p}_{goal}	Vetor das coordenadas de posição 3D do objetivo
$p_{p,x}^h$	Coordenada planar x da posição da ponta da caneta do dispositivo háptico
$p_{p,z}^h$	Coordenada planar z da posição da ponta da caneta do dispositivo háptico
\mathbf{p}_{i-1}^B	Vetor de posição do sistema de coordenadas da junta $i - 1$ do robô manipulador com relação ao sistema da base
$\dot{\mathbf{p}}_E^B$	Vetor de velocidades lineares do sistema de coordenadas do efetuador do robô manipulador com relação ao sistema da base
$\dot{\mathbf{p}}_e^b$	Vetor de velocidades lineares do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs com relação ao sistema da base

$\dot{p}_{e,x}^b$	Componente x da velocidade do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
$\dot{p}_{e,z}^b$	Componente z da velocidade do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
$\dot{\mathbf{p}}_f^h$	Vetor de velocidades do sistema de coordenadas do ponto de pega do dispositivo háptico com relação ao sistema da base
$\dot{p}_{f,x}^h$	Componente x da velocidade do ponto de pega do dispositivo háptico
$\dot{p}_{f,z}^h$	Componente z da velocidade do ponto de pega do dispositivo háptico
$\dot{\mathbf{p}}_p^h$	Vetor de velocidades do sistema de coordenadas da ponta da caneta do dispositivo háptico com relação ao sistema da base
$\dot{p}_{p,x}^h$	Componente x da velocidade da ponta da caneta do dispositivo háptico
$\dot{p}_{p,z}^h$	Componente z da velocidade da ponta da caneta do dispositivo háptico
\mathcal{Q}	Representação mínima de quatérnios
q_1	Configuração da primeira junta de um robô manipulador
\mathbf{q}_C	Vetor de configuração de um corpo
\mathbf{q}_h	Vetor de configuração das juntas do dispositivo háptico
q_i	Configuração da i -ésima junta de um robô manipulador
q_{i-1}	Configuração da junta $i - 1$ de um robô manipulador
\mathbf{q}_M	Vetor de configuração das juntas de um robô manipulador
\mathbf{q}_m	Vetor de configuração das juntas do robô manipulador planar de 3 DoFs
q_n	Configuração da n -ésima junta de um robô manipulador
\mathbf{q}_R	Vetor da <i>pose</i> $2D$ do robô móvel
$\dot{\mathbf{q}}_C$	Vetor das velocidades generalizadas de um corpo
$\dot{\mathbf{q}}_M$	Vetor da velocidade das juntas de um robô manipulador
$\dot{\mathbf{q}}_m$	Vetor da velocidade das juntas do manipulador planar de 3 DoFs
$\ddot{\mathbf{q}}_C$	Vetor das acelerações generalizadas de um corpo
\mathbb{R}^2	Espaço Euclidiano bidimensional
\mathbb{R}^3	Espaço Euclidiano tridimensional

\mathbb{R}^6	Espaço de configuração real de vetores de seis posições
$\mathbb{R}^{1 \times n}$	Espaço das matrizes reais de dimensão $1 \times n$
$\mathbb{R}^{1 \times 3}$	Espaço das matrizes reais de dimensão 1×3
$\mathbb{R}^{2 \times 2}$	Espaço das matrizes reais de ordem 2
$\mathbb{R}^{2 \times 3}$	Espaço das matrizes reais de dimensão 2×3
$\mathbb{R}^{3 \times 3}$	Espaço das matrizes reais de ordem 3
$\mathbb{R}^{3 \times 3}$	Espaço das matrizes reais de ordem 3
$\mathbb{R}^{3 \times n}$	Espaço das matrizes reais de dimensão $3 \times n$
$\mathbb{R}^{6 \times n}$	Espaço das matrizes reais de dimensão $6 \times n$
\mathbb{R}^n	Espaço Euclidiano de dimensão n
$\mathbb{R}^{n \times m}$	Espaço das matrizes reais de dimensão $n \times m$
$\mathbb{R}^{n \times n}$	Espaço das matrizes reais de ordem n
R	Sistema de coordenadas do robô móvel
\mathbf{R}	Matriz de rotação genérica
\mathbf{r}	Vetor unitário de um eixo de rotação em relação ao referencial do sistema de coordenadas do corpo
r	Raio efetivo de rolamento da roda do robô móvel
\mathbf{R}_1^B	Matriz de rotação do sistema de coordenadas da junta 1 do robô manipulador em relação ao sistema da base
\mathbf{R}_C^I	Matriz de rotação do sistema de coordenadas do corpo rígido em relação ao inercial
\mathbf{R}_d	Matriz de rotação da orientação desejada do efetuador do robô manipulador
\mathbf{R}_E^B	Matriz de rotação do sistema de coordenadas do efetuador do robô manipulador em relação ao sistema da base
\mathbf{R}_e^b	Matriz de rotação do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs em relação ao sistema da base
\mathbf{R}_{i-1}^{i-2}	Matriz de rotação do sistema de coordenadas da junta $i - 1$ do robô manipulador em relação ao sistema da junta $i - 2$

r_x	Componente x do vetor unitário de um eixo de rotação em relação ao referencial do sistema de coordenadas do corpo
r_y	Componente y do vetor unitário de um eixo de rotação em relação ao referencial do sistema de coordenadas do corpo
r_z	Componente z do vetor unitário de um eixo de rotação em relação ao referencial do sistema de coordenadas do corpo
$\mathbf{R}_{\mathbf{x}_I}(\psi)$	Matriz de rotação elementar ao redor do eixo x , do sistema de coordenadas inercial, dada pelo ângulo ψ , na representação por ângulos de <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i>
$\mathbf{R}_{\mathbf{y}_I}(\theta)$	Matriz de rotação elementar ao redor do eixo y , do sistema de coordenadas inercial, dada pelo ângulo θ , na representação por ângulos de <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i>
$\mathbf{R}_{\mathbf{z}_I}(\phi)$	Matriz de rotação elementar ao redor do eixo z , do sistema de coordenadas inercial, dada pelo ângulo ϕ , na representação por ângulos de <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i>
\mathbb{S}^1	Espaço do círculo unitário
s_x	Fator escalar entre os componentes x das posições do dispositivo háptico (desejada) e do efetuator do robô manipulador.
s_z	Fator escalar entre os componentes z das posições do dispositivo háptico (desejada) e do efetuator do robô manipulador.
$SE(n)$	Grupo Especial Euclidiano de dimensão n
$SE(2)$	Grupo Especial Euclidiano bidimensional
$SE(3)$	Grupo Especial Euclidiano tridimensional
$SO(n)$	Grupo Especial Ortogonal de dimensão n
$SO(2)$	Grupo Especial Ortogonal bidimensional
$SO(3)$	Grupo Especial Ortogonal tridimensional
t	Tempo decorrido
\mathbf{T}_{kin}	Vetor de parâmetros cinemáticos fixos que descrevem a relação entre os sistemas de coordenadas envolvidos nas transformações
\mathbf{T}_r	Matriz de transformação entre velocidades generalizadas da representação analítica para a geométrica da cinemática diferencial do manipulador
U	Função potencial

U_{att}	Potencial atrativo
\mathbf{u}_M	Vetor das entradas de controle proporcional do robô manipulador
\mathbf{u}_m	Vetor das entradas de controle proporcional do manipulador planar de 3 DoFs
u_s	Entrada de controle proporcional do servomotor de uma junta do robô manipulador
$\bar{\mathbf{u}}_M$	Vetor das entradas de controle proporcional da lei que lineariza o sistema do robô manipulador
v_a	Valor absoluto da velocidade produzida na extremidade do equipamento ao entrar em contato com um objeto
v_D	Valor absoluto da velocidade linear das rodas do lado direito do robô móvel
v_d	Valor absoluto da velocidade produzida no dispositivo háptico após o equipamento ao entrar em contato com um objeto
\mathbf{V}_E^B	Vetor de velocidades generalizadas do efetuador do manipulador com relação ao sistema de coordenadas da base
v_E	Valor absoluto da velocidade linear das rodas do lado esquerdo do robô móvel
\mathbf{v}_E^B	Vetor de velocidade linear do efetuador do manipulador com relação ao sistema de coordenadas da base
v_h	Valor absoluto da velocidade produzida na mão do operador quando a extremidade do equipamento entra em contato com um objeto
V_s	Tensão de entrada do servomotor da junta do robô manipulador
v_x^R	Componente x da velocidade linear do robô móvel em relação ao seu próprio sistema de coordenadas
v_y^R	Componente y da velocidade linear do robô móvel em relação ao seu próprio sistema de coordenadas
w	Índice de manipulabilidade do robô
w_0	Índice que define os limites desta vizinhança de uma singularidade
X_b	Eixo x do sistema de coordenadas da base do manipulador planar de 3 DoFs
X_h	Eixo x do sistema de coordenadas da base do dispositivo háptico
X_I	Eixo x do sistema de coordenadas inercial

x_R^I	Coordenada planar x da origem do sistema de coordenadas do robô móvel com relação ao sistema de coordenadas inercial
X_C	Eixo x do sistema de coordenadas do corpo
X_R	Eixo x do sistema de coordenadas do robô móvel
\dot{x}_R^I	Componente x do vetor de velocidade linear do robô móvel
Y_b	eixo y do sistema de coordenadas da base do manipulador planar de 3 DoFs
Y_h	eixo y do sistema de coordenadas da base do dispositivo háptico
Y_C	Eixo y do sistema de coordenadas do corpo
Y_I	Eixo y do sistema de coordenadas inercial
y_R^I	Coordenada planar y da origem do sistema de coordenadas do robô móvel com relação ao sistema de coordenadas inercial
Y_P	Eixo y do sistema de coordenadas da plataforma robótica
Y_R	Eixo y do sistema de coordenadas do robô móvel
\dot{y}_R^I	Componente y do vetor de velocidade linear do robô móvel
Z_b	eixo z do sistema de coordenadas da base do manipulador planar de 3 DoFs
\mathbf{z}_B	Vetor que permite a seleção da terceira coluna (desejada) da matriz de rotação do sistema de coordenadas da junta $i - 1$ com relação ao sistema da base do manipulador
Z_h	eixo z do sistema de coordenadas da base do dispositivo háptico
Z_C	Eixo z do sistema de coordenadas do corpo
Z_I	Eixo z do sistema de coordenadas inercial
\mathbf{z}_{i-1}^B	Terceira coluna da matriz de rotação do sistema de coordenadas da junta $i - 1$ com relação ao sistema da base do manipulador
Z_R	Eixo z do sistema de coordenadas do robô móvel
α_i	Parâmetro da convenção de Denavit-Haterberg (DH) chamado torção do i -ésimo elo
β_{att}	Ganho de ponderação que a contribuição das forças atrativas
β_i	Ganho de ponderação que a contribuição das forças de interação

$\Gamma(\cdot)$	Função não linear da cinemática direta de um robô manipulador
δ	Ângulo de rotação em torno do eixo \mathbf{r}
ϵ	Parte vetorial do quatérnio
ϵ_x	Componente x do vetor do quatérnio
ϵ_y	Componente y do vetor do quatérnio
ϵ_z	Componente z do vetor do quatérnio
η	Parte escalar do quatérnio
ζ	Índice que dimensiona os efeitos do potencial atrativo
θ	Ângulo de <i>pitch</i> , representa uma rotação em torno do eixo y de um sistema de coordenadas em relação ao inercial
θ_1	Ângulo da junta 1 do manipulador planar
θ_2	Ângulo da junta 2 do manipulador planar
θ_3	Ângulo da junta 3 do manipulador planar
θ_{Base}	Deslocamento da junta da base do robô manipulador
θ_{ali}	Ângulo do erro de alinhamento entre o eixo X_b do robô e a direção do local desejado para realização da tarefa
θ_C^I	Componente y de orientação do sistema de coordenadas de um corpo rígido com relação ao inercial
θ_E^B	Componente y de orientação do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador com relação ao sistema da base
θ_d	Orientação desejada do sistema de coordenadas anexado ao efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
θ_e	Deslocamento da junta do cotovelo (<i>elbow</i>) do dispositivo háptico
θ_e^b	Componente y de orientação do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs com relação ao sistema da base
θ_i	Ângulo da i -ésima junta de um robô manipulador (parâmetro da convenção de Denavit-Haterberg (DH))
θ_p	Deslocamento da junta da arfagem (<i>pitch</i>) do dispositivo háptico

θ_p^h	Componente y de orientação do sistema de coordenadas da ponta da caneta do dispositivo háptico com relação ao sistema da base
θ_s	Deslocamento da junta do ombro (<i>shoulder</i>) do dispositivo háptico
θ_w	Deslocamento da junta da cintura (<i>waist</i>) do dispositivo háptico
$\dot{\theta}_1$	Velocidade da junta 1 do manipulador planar
$\dot{\theta}_2$	Velocidade da junta 2 do manipulador planar
$\dot{\theta}_3$	Velocidade da junta 3 do manipulador planar
$\dot{\theta}_e^b$	Velocidade angular do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs em torno do eixo Y_I
$\dot{\theta}_e$	Velocidade da junta do cotovelo (<i>elbow</i>) do dispositivo háptico
$\dot{\theta}_s$	Velocidade da junta do ombro (<i>shoulder</i>) do dispositivo háptico
$\dot{\theta}_w$	Velocidade da junta da cintura (<i>waist</i>) do dispositivo háptico
λ	Fator de amortecimento que leva a um melhor condicionamento numérico da matriz Jacobiana
λ_0	Índice que define o comportamento da solução na vizinhança de uma singularidade
τ	Torque de saída do servomotor de uma junta do robô manipulador
τ_1	Torque na junta 1 do manipulador devido às forças de interação
τ_2	Torque na junta 2 do manipulador devido às forças de interação
τ_3	Torque na junta 3 do manipulador devido às forças de interação
$\tau_{att,w}$	Torque da junta da cintura (<i>waist</i>) do dispositivo háptico resultante das forças atrativas do sistema de direção assistida
τ_{Base}	Torque da junta da base do robô manipulador
$\tau_{E,x}$	Componente x do torque do vetor de forças e torques aplicados ao efetuador do robô manipulador
$\tau_{E,y}$	Componente y do torque do vetor de forças e torques aplicados ao efetuador do robô manipulador
$\tau_{E,z}$	Componente z do torque do vetor de forças e torques aplicados ao efetuador do robô manipulador

τ_e	Torque da junta do cotovelo (<i>elbow</i>) do dispositivo háptico
$\boldsymbol{\tau}_h$	Vetor resultante de torques aplicados às juntas do dispositivo háptico
$\tau_{i,w}$	Torque da junta da cintura (<i>waist</i>) do dispositivo háptico resultante das forças de interação com o ambiente remoto
$\tau_{i,y}$	Componente y do torque de interação aplicado ao efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
$\boldsymbol{\tau}_M$	Vetor resultante de torques aplicados às juntas do robô manipulador
$\boldsymbol{\tau}_m$	Vetor de torques nas juntas do manipulador planar de 3 DoFs devido às forças de interação
τ_s	Torque da junta do ombro (<i>shoulder</i>) do dispositivo háptico
τ_w	Torque da junta da cintura (<i>waist</i>) do dispositivo háptico resultante da combinação das forças de interação com o ambiente remoto e das atrativas do sistema de direção assistida
ρ_f	Norma de distância entre dois vetores de posição $2D$
$\rho_f(\mathbf{p}_C^I)$	Norma de distância entre a posição do robô e do objetivo
ϕ	Ângulo de <i>roll</i> , representa uma rotação em torno do eixo x de um sistema de coordenadas em relação ao inercial
$\boldsymbol{\varphi}_C^I$	Vetor de orientação do sistema de coordenadas do corpo rígido com relação ao inercial
ϕ_C^I	Componente x de orientação do sistema de coordenadas de um corpo rígido com relação ao inercial
$\boldsymbol{\varphi}_E^B$	Vetor de orientação do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador com relação ao sistema da base
ϕ_E^B	Componente x de orientação do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador com relação ao sistema da base
$\dot{\boldsymbol{\varphi}}_E^B$	Vetor de velocidade angular do sistema de coordenadas do efetuador do robô manipulador com relação ao sistema da base
$\boldsymbol{\chi}_C^I$	Vetor da <i>pose</i> do sistema de coordenadas do corpo com relação ao sistema inercial
$\boldsymbol{\chi}_d$	Vetor da <i>pose</i> desejada do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador

$\chi_d(t)$	Trajétória desejada para o sistema de coordenadas do efetuador do manipulador
χ_E^B	Vetor da <i>pose</i> do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador com relação a sua base
χ_e^b	Vetor da <i>pose</i> do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs com relação a sua base
χ_p^h	Vetor da <i>pose</i> do sistema de coordenadas da ponta da caneta do dispositivo háptico com relação a sua base
$\dot{\chi}_C$	Vetor de velocidades lineares e angulares do sistema de coordenadas de um corpo com relação ao sistema inercial
$\dot{\chi}_d$	Vetor da velocidade desejada do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador – ação de <i>feedforward</i> do controle cinemático de seguimento de trajetória
$\dot{\chi}_E^B$	Vetor de velocidade do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador com relação a sua base
$\dot{\chi}_e^b$	Vetor de velocidade do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs com relação a sua base
$\ddot{\chi}_C$	Vetor de aceleração cartesiana do sistema de coordenadas do corpo
$\tilde{\chi}_M$	Vetor de erro da <i>pose</i> do efetuador do robô manipulador
$\tilde{\chi}_M(0)$	Vetor de erro da <i>pose</i> do efetuador do robô manipulador no instante inicial
$\tilde{\chi}_M(t)$	Vetor de erro da <i>pose</i> do efetuador do robô manipulador em função do tempo
$\tilde{\chi}_{m_o}$	Erro de orientação do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
$\tilde{\chi}_{m_p}$	Vetor de erro da posição do efetuador do manipulador planar de 3 DoFs
$\dot{\tilde{\chi}}_M$	Vetor da derivada do erro da <i>pose</i> do efetuador do robô manipulador
ψ	Ângulo de <i>yaw</i> , representa uma rotação em torno do eixo z de um sistema de coordenadas em relação ao inercial
ψ_C^I	Componente z de orientação do sistema de coordenadas de um corpo rígido com relação ao inercial
ψ_E^B	Componente z de orientação do sistema de coordenadas do efetuador do manipulador com relação ao sistema da base

ψ_R^I	Ângulo de rotação em torno do eixo Z_R do robô móvel em relação ao eixo Z_I do sistema de coordenadas inercial
$\dot{\psi}_R^I$	Velocidade angular em torno do eixo Z_R do robô móvel em relação ao eixo Z_I do sistema de coordenadas inercial
ω_1	Velocidade angular das roda 1 do SSMR
ω_2	Velocidade angular das roda 2 do SSMR
ω_3	Velocidade angular das roda 3 do SSMR
ω_4	Velocidade angular das roda 4 do SSMR
ω_D	Velocidade angular das rodas do lado direito do robô móvel
ω_E	Velocidade angular das rodas do lado esquerdo do robô móvel
ω_E^B	Vetor da velocidade angular do efetuador do robô manipulador em relação a sua base
ω_i	Velocidade angular da i -ésima roda do SSMR
ω_R	Vetor da velocidade angular das rodas do robô móvel
ω_z^R	Velocidade angular do robô móvel em torno do eixo Z_I
∇	Gradiente de uma função
∂	Derivada parcial

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	6
1.2	Objetivos	10
1.2.1	Objetivo Geral	10
1.2.2	Objetivos Específicos	10
1.3	Contribuições da Dissertação	11
1.4	Organização da Dissertação	14
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Teleoperação, Telerobótica e Telepresença	15
2.2	Háptica	21
2.3	Teleoperação na Mineração	23
2.3.1	Tecnologias Industriais para Teleoperação na Mineração	24
2.3.2	Pesquisas Desenvolvidas para Teleoperação na Mineração	26
2.4	Ferramentas de Análise de Carga de Trabalho	28
3	Fundamentação Teórica	30
3.1	Modelos Cinemáticos	30
3.1.1	Modelagem Cinemática de Robôs com Rodas	30
3.1.2	Modelagem Cinemática de Robôs Manipuladores	36
3.2	Controle Cinemático de Robôs Manipuladores	42
3.3	Sistemas Hápticos	44
4	Metodologia	50
4.1	Modelagem da Escavadeira e do Dispositivo de Comando	50
4.1.1	Modelagem da Base Móvel	51
4.1.2	Modelagem do Braço Manipulador	52
4.1.3	Modelagem do Dispositivo Háptico	53
4.2	Controle da Escavadeira	54
4.2.1	Comandos da Base Móvel	54
4.2.2	Controle do Manipulador	55
4.3	Teleoperação Imersiva Utilizando Realimentação de Força	57
4.3.1	Realimentação de Força Devido às Forças Interativas	57
4.3.2	Realimentação de Força para Direção Assistida	59
4.3.3	Realimentação Combinando Forças Interativas e Forças de Direção Assistidas	60

4.4	<i>NASA Task Load Index</i> (NASA-TLX)	62
5	Arcabouço Experimental	64
5.1	Arcabouço Computacional de Teleoperação	64
5.2	Implementações em ROS	67
5.2.1	Controle da Plataforma Robótica	69
5.2.2	Estratégias de Realimentação de Força	72
5.3	Ambientes Experimentais	74
6	Experimentos e Resultados	76
6.1	Experimentos e Análise Qualitativa e Quantitativa do Uso da Realimentação de Força	76
6.1.1	Validação da Estratégia de Realimentação de Forças de Interação	77
6.1.2	Validação da Estratégia de Realimentação de Forças de Direção Assistida	78
6.1.3	Experimentos com Voluntários	80
6.2	Verificação do Arcabouço de Teleoperação com Múltiplos Locais de Escavação	84
7	Conclusões	86
7.1	Trabalhos Futuros	88
	Referências	90
	Apêndice A Corpos Rígidos, Descrição Espacial e Cinemática	100
	Apêndice B Convenção de Denavit-Haterberg (DH)	105

Capítulo 1

Introdução

A teleoperação pode ser definida como a operação remota (à distância) de equipamentos. A viabilidade de tais sistemas já foi comprovada em aplicações em diferentes áreas, como cirurgia médica ([Marinho et al., 2019](#)), veículos aéreos não tripulados ([Lee et al., 2013](#)) e teleoperação cooperativa com múltiplos robôs ([Shen et al., 2017](#)).

Em meados dos anos 1940, época da criação do primeiro sistema de teleoperação, o processo de manipulação remota se dava por meio de cadeias cinemáticas mecânicas, dando origem ao conceito conhecido como “mestre-escravo” ([Goertz, 1954](#)). O avanço tecnológico nos sensores, atuadores, processamento de sinais e estruturas de comunicação e conectividade disponibilizou à indústria equipamentos e técnicas de complexidade mais elevada em tais sistemas ([Vermesan et al., 2020](#)).

Assim, o termo teleoperação passou a definir o controle de um sistema, localizado remotamente ao usuário, com realimentação geralmente por vídeo do ambiente manipulado ([Farajiparvar et al., 2020](#)). Portanto, a tomada de decisão é realizada pelo usuário, enquanto a implementação mecânica é baseada no equipamento ([Siciliano e Khatib, 2016](#)).

Um sistema de teleoperação tem como objetivo ampliar as capacidades humanas para manipular objetos remotos e operar equipamentos em ambientes perigosos ([Hokayem e Spong, 2006](#)), minimizando a exposição desnecessária de operadores a situações de risco ou insalubres.

Em sistemas de teleoperação, qualquer decisão ou planejamento de nível superior é feito pelo operador, enquanto o equipamento é meramente responsável pela reprodução da operação mecânica do sistema no ambiente local ([Fidêncio, 2018](#)). Contudo, as ações humanas dependem da percepção do ambiente, enquanto as decisões dependem do correto reconhecimento e interpretação dos estímulos sensoriais ([Billino e Drewing, 2018](#)). Para isso, diversas modalidades sensoriais contribuem com informações, fornecendo diretrizes para a percepção do espaço e do movimento.

Dentre os esquemas de controle propostos para sistemas de teleoperação em que

o nível de autonomia e assistência varia de acordo com cada implementação, um deles é o esquema bilateral (Budolak et al., 2019; Shahbazi et al., 2018; Rahman et al., 2021; Stroppa et al., 2021; Coelho et al., 2021). Na teleoperação bilateral, a interação entre o humano e o ambiente remoto por meio do sistema é geralmente dada por sinais de baixo nível em tempo contínuo, como estímulos detectados por sensores e comandos enviados aos motores do equipamento teleoperado e do dispositivo de comando; e o humano está fortemente acoplado ao ambiente. Portanto, ela pode ser considerada uma tecnologia para facilitar a capacidade de tomada de decisão humana ao resolver tarefas de manipulação em ambientes remotos (Siciliano e Khatib, 2016).

Uma abordagem eficaz para melhorar o desempenho nas tarefas de teleoperação bilateral consiste no uso de realimentação háptica. Na literatura de robótica e realidade virtual, háptica é definida como as interações de forças e torques entre humanos, robôs e ambientes (remotos ou simulados) em suas várias combinações (Park e Khatib, 2006). A realimentação háptica é geralmente empregada como realimentação cinestésica de força, possibilitando ao operador experimentar forças suficientes para resultar em efeitos musculares (Siciliano et al., 2010). O uso da tecnologia háptica permite o controle bidirecional do sistema - o dispositivo háptico recebe informações de força/torque do dispositivo remoto e transmite de volta informações de força/torque aplicadas pelo usuário ao equipamento remoto teleoperado.

A teleoperação háptica é um exemplo típico de sistema *Human-In-The-Loop* (HITL) com o desafio particular de acoplamento físico rígido entre o ser humano e a máquina. A interação háptica não apenas fornece ao operador informações sobre ambiente de operação, mas também permite que ele manipule-o. Isso implica uma troca de energia entre os ambientes local e remoto. A estabilidade desta malha de controle é requisito fundamental, uma vez que um sistema instável – ou seja, a energia que o sistema pode fornecer não é limitada à energia inicialmente disponível – é inoperante e, além disso, perigoso para operador e ambiente, uma vez que ele pode causar movimentos indesejados e danosos ao sistema (operador, dispositivos locais e equipamento teleoperado), bem como ao próprio ambiente de operação.

A transparência é outra premissa importante no projeto de controle do sistema de teleoperação. Um sistema teleoperado é transparente se o operador não distingue entre a teleinteração direta e a teleinteração com um ambiente remoto. Idealmente, ele se sente como se estivesse interagindo diretamente com o ambiente remoto (Hirche e Buss, 2012). Portanto, a transparência do sistema está intimamente ligada à capacidade de reproduzir os estímulos fornecidos pela interação do sistema remoto com o ambiente que ele está inserido, ou seja, a sensação de imersão àquele ambiente.

Graças aos avanços significativos nas técnicas de telecomunicações, imersão e autonomia, dispositivos de detecção de contato físico ganharam grande importância na

última década. A imersão e a telecomunicação são indispensáveis para a teleoperação, pois os dados coletados do ambiente e do modelo dinâmico e de decisão permitem modelar a cena e a interação dos equipamentos com objetos, com o ambiente ou mesmo com humanos (Siciliano e Khatib, 2016). A interação natural – ou seja, o envolvimento de órgãos sensoriais e motores comuns à tarefa – possibilitando uma interação implícita no ambiente remoto é um dos pilares da telepresença (Almeida et al., 2017).

De modo geral, a diferença entre telepresença e teleoperação consiste principalmente em suas aplicações. Os sistemas de telepresença estão principalmente associados a sua capacidade e objetivo de produzir uma medição sensorialmente rica do ambiente, ou seja, permitir que o operador se sinta presente em um local físico remoto. Os sistemas teleoperados, por sua vez, são principalmente associados às aplicações tarefas de manipulação (Triantafyllidis e Li, 2021).

De acordo com Park e Khatib (2006), a teleoperação háptica proporciona telepresença, ou seja, permite que o operador controle remotamente um equipamento-escravo por meio de um dispositivo-mestre enquanto percebe o ambiente remoto, recebendo informações de força devido ao contato com algum objeto, por exemplo.

As arquiteturas bidirecionais típicas, subjacentes às que acoplam dispositivos locais e remotos, são baseadas no esquema de posição-força. A arquitetura posição-força é um método bem estabelecido de estruturar um sistema de teleoperação bilateral háptica. A posição do dispositivo háptico (mestre) é rastreada e enviada para o equipamento remoto (escravo) reproduzir. Quando o dispositivo escravo interage com o ambiente, a força de interação é medida. Então, essa força é enviada de volta ao mestre, compondo uma realimentação de força (Ollas e Soltaniah, 2020).

Nesse contexto, abordagens viáveis de operações remotas para equipamentos na indústria de mineração vem sendo investigadas. Por exemplo, equipamentos de resgate teleoperados, utilizados para entrar nas minas após um incêndio ou explosão quando a atmosfera não é favorável para as equipes de resgate. O *Numbat*, um veículo controlado remotamente em tempo real a partir de uma estação de controle portátil localizada perto da entrada da mina, criado no final da década de 1990, é um desses equipamentos (Ralston e Hainsworth, 1998). Atualmente, estudos usando outros sistemas são realizados com objetivo de fornecer algum nível de imersão (Zhai et al., 2020).

Outro exemplo de aplicação de técnicas de operação consiste no comando remoto de equipamentos de mineração para exploração e inspeção de ambientes confinados. A *Carnegie-Mellon Robotics Institute* construiu, no início dos anos 2000, o *Groundhogbot*, um dispositivo teleoperado construído a partir do chassi de dois *All-Terrain Vehicles* (ATVs), equipado com telêmetros a laser para mapeamento tridimensional (3D) (Baker et al., 2003; Thrun et al., 2003). Atualmente, pesquisadores do Instituto Tecnológico

Vale (ITV) e da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) vem desenvolvendo uma plataforma robótica móvel teleoperada, chamada EspeleoRobô, para exploração e inspeção de cavernas naturais, além de monitoramento de galerias de barragens e drenos, e moinhos de bolas. Buscando facilitar a teleoperação do dispositivo, algoritmos de alerta de risco de colisão, alerta de capotamento, alerta de perda de conexão com a base de controle, de navegação autônoma local para restabelecimento de conexão e de navegação assistida em galerias são propostos e avaliados (Amaral et al., 2020).

As restrições físicas no ambiente de mineração dificultam o uso de tecnologias de comunicação tradicionais, e podem gerar alta latência de conexão. Uma abordagem, utilizando realimentação háptica, para minimizar o problema consiste em gerar forças resistivas aos movimentos do dispositivo háptico, resultando em trajetórias de comando mais lentas que possam ser seguidas pelo manipulador escravo (Maddahi et al., 2016).

Alguns equipamentos pesados da indústria de mineração possuem características que os predispõem à teleoperação, como as recuperadoras, equipamentos móveis de grande porte utilizados para retirar o minério do pátio de estocagem e que operam ao longo da extensão destes pátios sobre bermas (acostamento de uma estrada). Elas possuem mais de 40 metros de altura e mais de 50 metros de comprimento, tornando sua operação extremamente delicada. Portanto, a operação uma recuperadora é feita remotamente por um operador localizado em uma sala de controle central, por meio de uma estação de operação com sistema de supervisão. Nesta estação, há ainda um sistema de Circuito Fechado de Televisão (CFTV), que disponibiliza imagens por diversas câmeras estrategicamente posicionadas, fornecendo toda a informação visual necessária para operação segura da máquina (Damasceno et al., 2013).

Outros equipamentos de grande porte utilizados na mineração são os caminhões fora de estrada, tratores de esteira e escavadeiras. Os caminhões fora de estrada são responsáveis por fazer o transporte dos minérios dentro da mineradora, levando grande quantidade de material de um local para o outro em apenas uma viagem. Os tratores de esteira movimentam materiais com confiança, agilidade e precisão, preparam o terreno previamente à atividade de extração. Por sua vez, as escavadeiras, junto com os tratores de esteira, ajudam a preparar toda a infraestrutura para extração mineral e também contribuem para essa atividade em si, dependendo dos materiais a serem manuseados.

Em São Gonçalo de Rio Abaixo-MG está localizada a mina de Brucutu da Vale S.A., considerada a primeira mina autônoma do Brasil. Os caminhões fora de estrada, originalmente versões comerciais convencionais, operam no local de forma totalmente autônoma a partir de tecnologia embarcada, tais como radares, comunicação via *Global Positioning System* (GPS) e inteligência artificial. O trator que opera nessa mina, apesar de não ser autônomo, é comandado remotamente¹.

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=LXyBD1W9k6U>

Equipamentos como os tratores de esteira e as escavadeiras são projetados para operar em ambientes não estruturados e de rápida mudança, aproveitando suas propriedades mecânicas projetadas, bem como as capacidades de um operador para prever e controlar a reação causada pela interação máquina-solo. Reagir efetiva e autonomamente a eventos imprevisíveis e lidar com eventos contingentes inesperados podem ser preceitos complexos. Portanto, é difícil modelar essa interação máquina-solo para prever a entrada em todos os níveis de controle, conforme solicitado por um sistema totalmente autônomo (Granot e Feldman, 2004).

Assim, tanto tratores com esteiras quanto escavadeiras operadas remotamente seriam beneficiados com o desenvolvimento de uma arquitetura de controle baseada em agentes capazes de tomar ações independentes para assistir o operador. Por um lado, o problema de controle não é trivial e por outro é caracterizado por uma reação relativamente lenta, uma vez que a máquina se move devagar o suficiente para permitir a percepção de mudanças relevantes em seu ambiente. O equipamento possui grandes dimensões, o que praticamente permite que todo o *hardware* necessário seja facilmente embarcado. No projeto deste sistema, não há limitações rígidas de volume, peso ou energia como na maioria das outras aplicações (Granot e Feldman, 2004). Além do mais, o sistema de teleoperação deve fornecer ao operador as informações necessárias do equipamento e do ambiente para permitir o desempenho eficiente da tarefa (Dudley, 2014).

Neste contexto, o projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*, desenvolvido em parceria entre o ITV e a UFMG, busca desenvolver um arcabouço computacional que possibilite a realização remota de tarefas de escavação e/ou remoção de materiais em ambientes de mineração de forma mais eficiente e segura. O projeto conta com a elaboração de um protótipo em escala laboratorial. O protótipo emula o funcionamento de uma escavadeira e passou por diversos estágios de construção até chegar ao modelo atual que conta com dois dispositivos robóticos comerciais, uma plataforma móvel com um braço manipulador anexado em sua parte superior.

E, para prover diversas modalidades sensoriais, o arcabouço conta com técnicas de visão ativa, interfaces hápticas e visualização de dados. Estas técnicas para fornecer imersão à teleoperação foram avaliadas e, após validadas, foram integradas ao arcabouço computacional como módulos de teleoperação.

A presente dissertação propõe técnicas de realimentação de força por meio de um dispositivo háptico. Inicialmente, foi testada a teleoperação sem nenhum tipo de informação háptica do ambiente remoto utilizada como comparativo para as métricas empregadas para avaliar as técnicas propostas. Uma estratégia proposta consiste em calcular os torques enviados bidirecionalmente entre dispositivo háptico e plataforma robótica, causados pela interação com o ambiente remoto. A outra corresponde à produção de forças atrativas por um campo potencial artificial gerado no local desejado de execução da tarefa. A

partir destas forças atrativas são gerados torques nas juntas do dispositivo háptico que proporcionam uma sensação de direção assistida ao operador. Considerando o controle direto da plataforma robótica, a direção assistida corresponde a uma ferramenta para auxiliar o operador a comandar a base móvel da escavadeira, fazendo com que seja mais fácil guiá-la ao local desejado de operação. A validação experimental é feita por meio de vários experimentos que comparam o uso de realimentação de força na teleoperação, utilizando uma ferramenta de medição perceptual de carga de trabalho dos voluntários para teleoperar a plataforma em cada experimento.

1.1 Motivação

A mineração desempenha um papel crucial no desenvolvimento dos países em escala global. No Brasil, a atividade data do século XVII, onde a mineração era realizada manualmente, com situações de trabalho precárias como falta de ventilação, altas temperaturas, pouco espaço para locomoção, etc. A evolução das operações de lavra no Brasil, começou no século XVIII e ocorreu gradualmente até meados do século XX ([Germani, 2002](#)). Atualmente, apesar da modernização da prática, essa atividade ainda ocorre em ambientes não estruturados e de rápida mudança, tanto no que diz respeito às características geomórficas, quanto às características laborais. Ou seja, além das mudanças decorrentes das atividades de mineração, como perfuração, desmonte, escavação, carga, entre outros. Diversas máquinas de grande porte dividem o espaço da mina entre si e com outros recursos, tais como os próprios colaboradores que compõem a mão de obra da mina ([Germani, 2002](#); [Granot e Feldman, 2004](#); [Spitz e Trudinger, 2019](#)).

Nas últimas décadas, há referências de esforços crescentes para melhorar as condições de trabalho dos operadores, especialmente com a adoção de procedimentos para diminuir o estresse e aumentar a segurança geral ([Germani, 2002](#)). O autor ainda comenta que a crescente demanda de abertura de frentes de exploração e mesmo de aumento de produção tem como um dos principais obstáculos a limitação de mão de obra especializada, o que pode ser mitigado ao serem providas condições mais atraentes de trabalho (mesmo para áreas remotas).

Novas tecnologias na indústria de mineração, usando técnicas modernas de automação e robótica, mostram eficácia em várias tarefas ([Maske et al., 2018](#)), proporcionando maior produtividade e reduzindo o número de acidentes, além de tornar menos desafiadoras a atração e a retenção de talentos.

No entanto, a maioria dessas intervenções em tarefas críticas ainda depende das capacidades de controle do ser humano. Assim, fundamentalmente, a teleoperação pode ser aplicada como alternativa para atividades de mineração com estas características. Ainda, considerando os desafios técnicos de desenvolver uma escavadeira – equipamento

foco do projeto – totalmente autônoma, a teleoperação de tais máquinas é a forma mais promissora de reduzir a exposição humana nessa operação (Fidêncio, 2018).

A teleoperação de equipamentos de mineração pode ter benefícios significativos para a saúde e segurança, permitindo que a mineradora opere os equipamentos de um local seguro, sem exposição aos perigos inerentes a muitas operações de mineração.

O fornecimento de informações de força adiciona uma dimensão relevante ao sistema perceptivo do operador, o que pode ajudar a reduzir os efeitos negativos da perda de visibilidade devido às nuvens de poeira produzidas pela operação de escavação. Outros benefícios incluem maior segurança, ciclo de vida útil prolongado do equipamento e conseqüentemente custos de manutenção reduzidos (Ahn, 2004).

Esta dissertação realiza a avaliação de técnicas de realimentação de força em um dispositivo háptico para comporem um módulo do arcabouço computacional do projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*. Resultados iniciais do desenvolvimento do módulo de realimentação de força para a teleoperação de escavadeiras estão apresentados em (Lima et al., 2019). Os autores avaliam a metodologia por meio da simulação, no *software* Gazebo integrado com o *Robot Operation System (ROS)*² – uma coleção de *frameworks* de *software* para desenvolvimento de robôs. Tarefas de carregamento de minério são simuladas considerando um braço manipulador fixo. O estudo realizado nesta dissertação adapta e implementa a estratégia anteriormente proposta para o arcabouço computacional do projeto, e propõe uma nova estratégia de direção assistida que também utiliza interação háptica.

Uma visão geral do arcabouço computacional do projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*, bem como dos módulos que o compõe são descritos a seguir. A partir desta visão geral é possível identificar as contribuições desta dissertação na integralização do arcabouço computacional.

Projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*

O projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*, realizado em parceria entre o ITV e o Laboratório de Visão Computacional e Robótica (VeRLab) do Departamento de Ciência da Computação da UFMG, teve como objetivo principal desenvolver um arcabouço computacional de teleoperação que possibilite um operador realizar tarefas remotas de equipamentos em ambientes de mineração.

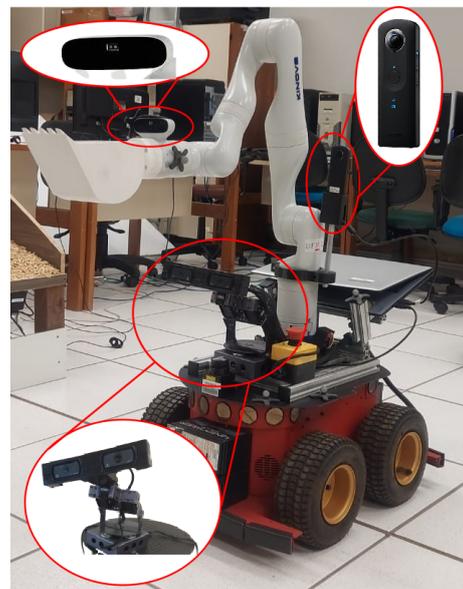
A principal entrega deste projeto foi a investigação de técnicas que fornecem sensações de imersividade por meio da telepresença na teleoperação para realização de operações de mineração. A Figura 1 apresenta os principais dispositivos utilizados na configuração final do arcabouço do projeto, tanto aqueles utilizados pelo operador (Fi-

² <https://www.ros.org/>

gura 1(a)) no ambiente local, quanto o protótipo em escala laboratorial da escavadeira e seus sensores no ambiente remoto (Figura 1(b)). No ambiente local, estão os seguintes dispositivos: um *joystick* háptico, um *joystick* tradicional e um óculos de *Virtual Reality* (VR). No ambiente remoto, a plataforma robótica composta por dois modelos de robôs comerciais, um robô móvel com rodas e um manipulador, contém um dispositivo denominado cabeça robótica, uma câmera RGB-D e uma câmera 360°. Apesar de apresentada na Figura 1(b), a cabeça robótica, testada inicialmente no projeto, foi substituída pelas câmeras RGB-D e 360° devido à complexidade e fragilidade do sistema devido ao elevado número de graus de liberdade (do inglês *Degrees of Freedom*, ou *DoFs*).



(a) Dispositivos do ambiente local.



(b) Dispositivos do ambiente remoto.

Figura 1 – Arcabouço computacional utilizado no projeto.

Os principais módulos validados e integrados ao arcabouço estão sumarizados na Figura 2. A arquitetura destes subsistemas é composta por um módulo local e um remoto, ambos implementados por meio de dois computadores que se comunicam utilizando o arcabouço *WebRTC*³ que provê informação em tempo real de áudio, vídeo e dados.

Os dois computadores utilizados no arcabouço se comunicam por uma arquitetura cliente/servidor, sendo que um deles se localiza no ambiente local e é utilizado como cliente e o outro, no ambiente remoto, opera como servidor. O computador no ambiente local é uma interface com o operador e utiliza o sistema operacional *Windows* com um ambiente da *engine Unity*⁴. O computador do ambiente remoto está embarcado na plataforma robótica e utiliza o sistema operacional *Ubuntu* com *ROS*.

A arquitetura do módulo de realimentação visual e auditiva conta com duas câmeras, uma câmera 360° e uma RGB-D, a primeira possibilita amplo campo de visão,

³ <https://webrtc.org/>

⁴ <https://unity3d.com>

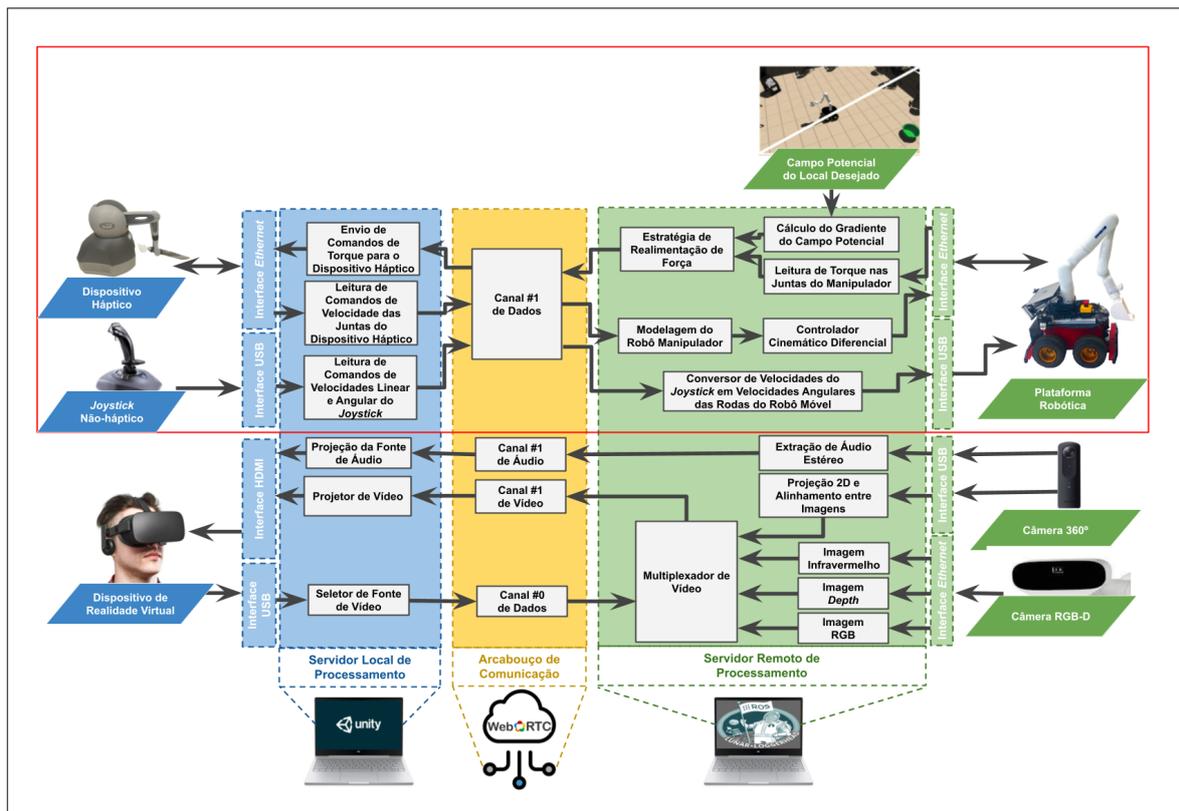


Figura 2 – Arcabouço de teleoperação composto por dois modos de realimentação: de força via dispositivo háptico, e visual e auditiva via câmera 360° e câmera RGB-D. O módulo de realimentação de força, destacado por um retângulo vermelho, é o foco desta dissertação.

a segunda possibilita obtenção de imagens de vídeo por infravermelho e de *depth*, além de RGB. A câmera 360° conectada ao servidor, além de imagem, consegue extrair áudio estéreo por meio de dois microfones. Em relação à extração de imagem 360°, ela é feita por meio de duas câmeras, uma na parte da frente e outra na de trás do dispositivo. As imagens geradas pelas duas câmeras são sobrepostas por meio de projeção 2D e alinhamento entre elas. O computador cliente faz a renderização de áudio e vídeo usando a *Unity* e transmite ao *Head-Mounted Device (HMD)*.

Por sua vez, a câmera RGB-D também conectada ao servidor envia imagens infravermelho, de *depth* e RGB integradas por meio de um multiplexador de vídeo. O tipo de imagem desejada pode ser escolhido pelo operador utilizando um seletor de fonte de vídeo na interface do *HMD* conectada ao cliente. Esta seleção evita congestionamento na banda de comunicação e permite ao operador se adequar melhor ao objetivo da tarefa. Ainda no computador cliente, a imagem selecionada é renderizada usando a *Unity*.

As amostras de áudio e vídeo de ambas as câmeras coletadas pelo servidor são enviadas para o cliente por meio do canal de comunicação *WebRTC*, o mesmo acontece com as amostras de dados coletadas no cliente e enviadas ao servidor.

Por fim, na arquitetura do módulo de realimentação de força são utilizados dois *joysticks*: um para comandar a base móvel e o outro para controlar o manipulador. O *joystick* que controla o manipulador é um dispositivo háptico e, portanto, é possível receber informações de forças produzidas no ambiente remoto por meio dele. Como métrica para avaliar as estratégias propostas, uma abordagem sem realimentação de força também é explorada. As duas estratégias propostas utilizadas neste módulo são: calcular os torques enviados bidirecionalmente entre dispositivo háptico e plataforma robótica; e produzir forças atrativas por um campo potencial artificial gerado com base no local desejado de execução da tarefa. Assim, o computador servidor lê os torques nas juntas do manipulador – no caso da primeira estratégia – e/ou calcula a força produzida via campos potenciais – no caso da segunda – e utiliza tais informações nos mapeamentos das estratégias de realimentação de força desenvolvidas. O canal de comunicação *WebRTC* permite o tráfego das amostras de dados coletados em ambos computadores. O computador cliente é responsável por enviar comandos de torque para o dispositivo háptico.

Além do mais, neste módulo, também foram implementados a modelagem e o controle cinemático do manipulador e o conversor dos comandos de velocidades linear e angular em velocidades angulares das rodas utilizado para movimentar a base móvel. O computador cliente, utilizando a *Unity*, lê os comandos de velocidade enviados por ambos os *joysticks*, estes dados trafegam pelo arcabouço de comunicação e são processados no computador cliente, operando o *ROS*, onde são convertidos aos sinais de velocidade que serão enviados à plataforma robótica tipo escavadeira para movimentação. O módulo, destacado em vermelho na Figura 2, utiliza técnicas de realimentação de força para serem utilizadas em interfaces hápticas e é o objeto de estudo desta dissertação.

1.2 Objetivos

A seguir, são apresentados os objetivos geral e específicos desta dissertação.

1.2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo a investigação e validação de técnicas de realimentação de força para comporem um arcabouço computacional de teleoperação de equipamentos de mineração, com foco em escavadeiras, que auxiliem no aumento da segurança em operações de mineração, bem como na maior produtividade e vida útil do equipamento.

1.2.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos desta dissertação, é possível mencionar:

- Investigação de diferentes técnicas de realimentação de força para auxiliar o operador ao navegar remotamente em ambientes de mineração em que escavadeiras operam e manipulam objetos e materiais durante operações de carregamento de minério;
- Adaptação e implementação das técnicas adequadas de realimentação de força para compor o arcabouço computacional de teleoperação proposto no projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*;
- Implementação de ferramentas para simulação, incluindo modelo virtual do laboratório e também do robô, visando uma verificação preliminar das implementações;
- Desenvolvimento, em escala laboratorial, de um arcabouço experimental:
 - Montagem de um ambiente contendo locais de escavação com materiais de características físicas diferentes, como densidade e rigidez, para emulação da tarefa de carregamento e descarregamento de minério em laboratório;
 - Desenvolvimento de um protótipo composto por dois robôs comerciais, um braço manipulador instalado sobre uma plataforma móvel, que emule as funcionalidades de uma escavadeira;
 - Desenvolvimento de um ambiente local de teleoperação que torne possível ao operador realizar o controle da plataforma;
- Investigação de diferentes ferramentas de análise de carga de trabalho, e definição da mais apropriada para o estudo em questão;
- Integração do módulo de realimentação de força no arcabouço final de teleoperação;
- Realização de experimentos para verificação das estratégias propostas para a realimentação de força;
- Análise qualitativa utilizando a ferramenta de trabalho escolhida ([NASA-TLX](#)) e quantitativa dos resultados obtidos;
- Realização de demonstrações do arcabouço computacional de teleoperação, incluindo o *workshop* de encerramento do projeto.

1.3 Contribuições da Dissertação

As contribuições desta dissertação estão inseridas no contexto do projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*, realizado em parceria entre o [ITV](#) e a [UFMG](#), e contaram com a participação de várias pessoas que fazem parte das equipes de pesquisadores de ambas as instituições.

Uma contribuição consiste no estudo e análise de técnicas de realimentação de força consideradas como estado da arte da telepresença, permitindo a escolha de técnicas para adaptação e implementação no módulo de realimentação de força do arcabouço de teleoperação, e assim possibilitando facilitar a capacidade de tomada de decisão humana ao resolver tarefas de manipulação em ambientes remotos.

O módulo de realimentação foi inicialmente apresentado em (Lima et al., 2019), considerando apenas as forças de interação exercidas na escavadeira para computar as forças de realimentação resultantes no dispositivo háptico. Porém, esta implementação apresentou problemas relacionados à manipulabilidade do dispositivo háptico. Assim, esta dissertação propõe a atuação direta nos torques das juntas do dispositivo háptico, além de apresentar uma nova estratégia de realimentação de forças para assistir a operação remota.

Enquanto a teleoperação implica na operação de uma máquina à distância, a telepresença se refere a um conjunto de tecnologias para fornecer ao usuário a percepção de estar presente no local remoto. Desta forma, são propostas e implementadas estratégias de realimentação de força. A estratégia de realimentação de força devido à interação da máquina com o ambiente remoto permite justamente fornecer ao usuário a percepção de estar presente no local, além de ser útil na tomada de decisões em casos onde a visão está comprometida devido às cortinas de poeira em ambiente reais de mineração. A estratégia de realimentação de força de direção assistida também é útil em casos de cortina de poeira, permitindo ao operador se guiar apenas pela realimentação de força, mas especialmente útil na mineração de precisão.

Os resultados dos estudos e desenvolvimentos realizados durante o mestrado foram publicados em um artigo de congresso internacional:

- [Carvalho et al., 2020] L. Carvalho, P. Rezeck, M. V. Lima, L. Pinto, G. Freitas, E. R. Nascimento, D. G. Macharet, L. Chaimowicz, G. Pessin, e M. F. M. Campos. *On the Evaluation of Force Feedback Augmented Teleoperation of Excavator-like Mobile Manipulators*. In *16th Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2020. Nesse trabalho foram implementadas estratégias de realimentação de força: a primeira permite ao operador sentir as interações da caçamba com objetos, a outra fornece ao operador forças que o direcionam ao local de escavação/depósito, o que é útil na mineração de precisão.

Os resultados alcançados durante o projeto foram apresentados em um *workshop* com participação de membros do *ITV* e da Vale S.A.:

- M. F. M. Campos, D. G. Macharet, E. R. Nascimento, L. Chaimowicz, G. Freitas, L. C. Gonçalves, e P. A. F. Rezeck. *Workshop de Encerramento do Projeto Teleoperação*

Avançada de Equipamentos de Mineiraç o, 2020. Este encontro apresentou a linha temporal do projeto, mostrando os marcos ao longo de sua execu o, tais como, protótipos da plataforma robótica, evolu o dos sensores utilizados para localiza o, visão ativa, interfaces hápticas, visualiza o de dados e planejamento. Além do mais, foram apresentados novos experimentos e resultados, em que os módulos sugeridos no artigo publicado no [CASE](#) foram testados em um ambiente remoto com mais de um local de escava o.

Também, um relatório técnico de projeto foi entregue ao [ITV](#):

- M. F. M. Campos, D. G. Macharet, E. R. Nascimento, L. Chaimowicz, G. Freitas, F. C. Chamone, L. G. N. Pinto, L. C. Gonçalves, M. V. de Lima, e P. A. F. Rezeck. *Relatório Técnico do Projeto de Teleopera o Avançada de Equipamentos de Minera o: Escavadeira*, 2020. Neste documento foram consolidados os resultados alcançados no desenvolvimento do projeto, apresentado o protótipo final e os módulos do arcabouço computacional e seus detalhes de implementa o, experimentos realizados e direoes futuras.

Algumas atividades secundárias, porém cruciais para o seguimento da pesquisa foram realizadas, sendo elas:

- *Upgrade* da versão do sistema operacional utilizado nos computadores do projeto e da versão do [ROS](#) utilizado nas implementa oes do projeto, da versão *Kinetic Kame* – descontinuada no primeiro semestre de 2021 – para a *Melodic Morenia*; com isso, foi necessário realizar a atualiza o de alguns pacotes do [ROS](#) utilizados para implementa o e comunica o do arcabouço computacional de teleopera o;
- Elabora o de um manual sobre como ligar o arcabouço completo do projeto⁵ para auxiliar novos colaboradores no início de suas atividades;
- Repara o de um dos dispositivos hápticos *Geomagic Touch* disponíveis no [VeRLab](#) para realizar alguns experimentos complementares no período de isolamento social devido   pandemia de COVID-19;
- Elabora o de um manual (documento ilustrado) sobre como desmontar o dispositivo *Geomagic Touch* para realizar algum reparo e, posteriormente, remont -lo⁶, uma vez que o fabricante não disponibiliza tal informa o.

⁵ <https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-registros/tree/master/documents/%5BDoc%5D%20Manual%20de%20Instru%20C3%A7%C3%B5es.%20Como%20Ligar%20o%20Arcabou%20C3%A7o%20Completo%20do%20Projeto>

⁶ [https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-registros/tree/master/documents/%5BDoc%5D%20Manual%20de%20Instru%20C3%A7%C3%B5es.%20\(Des\)Montagem%20do%20Dispositivo%20H%C3%A1ptico%20Geomagic%20Touch](https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-registros/tree/master/documents/%5BDoc%5D%20Manual%20de%20Instru%20C3%A7%C3%B5es.%20(Des)Montagem%20do%20Dispositivo%20H%C3%A1ptico%20Geomagic%20Touch)

1.4 Organização da Dissertação

O restante desta dissertação está organizado em mais 6 capítulos. A seguir, no Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica da temática abordada nesta dissertação, sendo apresentado um breve histórico sobre a teleoperação e também sobre a tecnologia háptica. Na sequência, é apresentado também o estado da arte da teleoperação na atividade de mineração, bem como algumas pesquisas sobre o tema. As ferramentas de avaliação de análise de carga de trabalho mais usuais também são analisadas neste capítulo.

O Capítulo 3 apresenta os fundamentos teóricos utilizados na modelagem e controle de robôs, com rodas e manipuladores, no contexto da cinemática de corpos rígidos. Os princípios utilizados na modelagem de sistemas hápticos também são abordados neste capítulo.

No Capítulo 4 é explicada a metodologia aplicada para a modelagem e controle da plataforma robótica que emula uma escavadeira. As técnicas de realimentação de força propostas como módulo auxiliar do arcabouço computacional de teleoperação desenvolvido são descritas neste capítulo. Por fim, é realizada uma descrição sobre a ferramenta de análise de carga de trabalho [NASA-TLX](#).

A descrição do arcabouço experimental é apresentada no Capítulo 5, contendo uma apresentação dos equipamentos robóticos utilizados no sistema de teleoperação, as implementações específicas utilizadas no módulo de realimentação de força, e a descrição dos testes realizados em ambientes experimentais.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos comparando as configurações do módulo de realimentação de força com a configuração sem realimentação. O consumo de energia e estresse mecânico dos atuadores do equipamento são comparados, além da influência da automação na interação homem-máquina. Por fim, discussões sobre estes resultados são realizadas neste capítulo.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões sobre a investigação de técnicas de realimentação de força, os benefícios trazidos a processos industriais de mineração e os desafios a serem superados em relação à interação homem-máquina em um processo automatizado. Além do mais, trabalhos futuros são propostos, a fim de aprimorar a telepresença em arcabouços de teleoperação voltados para tarefas de mineração.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica sobre a teleoperação, apresentando um breve histórico sobre o seu surgimento e evolução. Em seguida, as tecnologias e estratégias de realimentação háptica são abordadas. Na sequência, é apresentado o estado da arte da teleoperação na atividade de mineração, bem como algumas pesquisas sobre o tema. Por último, é realizado um estudo sobre análise de carga de trabalho, as ferramentas atualmente utilizadas e os objetivos e implicações do uso de tais modelos.

2.1 Teleoperação, Telerobótica e Telepresença

O termo teleoperação é geralmente usado para indicar que existe uma barreira entre o usuário e o sistema controlado. Porém, essa barreira pode ser superada por meio do controle remoto do equipamento no ambiente. É importante notar que essa barreira pode ser imposta, por exemplo, por ambientes perigosos ou confinados ([Siciliano e Khatib, 2016](#)).

Um sistema de teleoperação geralmente inclui: o ambiente remoto onde se encontra o equipamento a ser operado, também chamado de teleoperador, com seus sensores e atuadores, como microfones, câmeras e sensores proprioceptivos; e o ambiente local, onde acontece a interação humano-robô, com todos os equipamentos e dispositivos necessários para o operador executar a tarefa remota e receber os estímulos do ambiente remoto, tais como óculos de [VR](#) que provê realimentação visual e auditiva, e interfaces hápticas capazes de fornecer realimentação de força de sinais provenientes de sensores proprioceptivos. A [Figura 3](#) apresenta um diagrama geral de um sistema de teleoperação.

De acordo com [Sheridan \(1989\)](#), a linha do tempo da teleoperação começa em meados dos anos 1940, quando o grupo de Goertz construiu o primeiro teleoperador mestre-escravo controlado mecanicamente para manipular com segurança material nuclear radioativo ([Goertz, 1954](#)). Os primeiros sistemas eram controlados por uma série

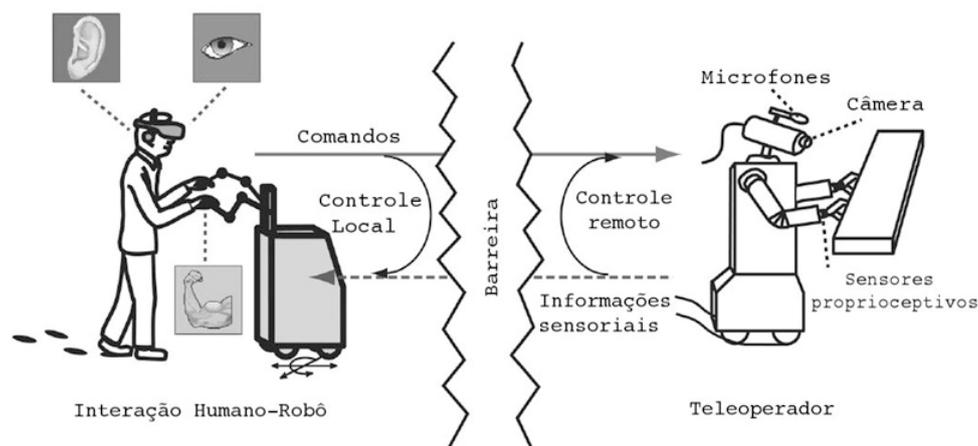


Figura 3 – Diagrama de um sistema de teleoperação (adaptada de (Peer et al., 2010)).

de interruptores liga-desliga para ativar vários motores e mover vários eixos, tornando a operação do sistema lenta e um tanto estranha. Posteriormente, por causa da sobrecarga física e da distância limitada entre o operador e o ambiente, seu grupo aprimorou o sistema mestre-escravo com servomecanismos. Essa descoberta permitiu que o sistema conseguisse a separação física entre o mestre e o escravo. A Figura 4 mostra Goertz operando o sistema para lidar com material radioativo.

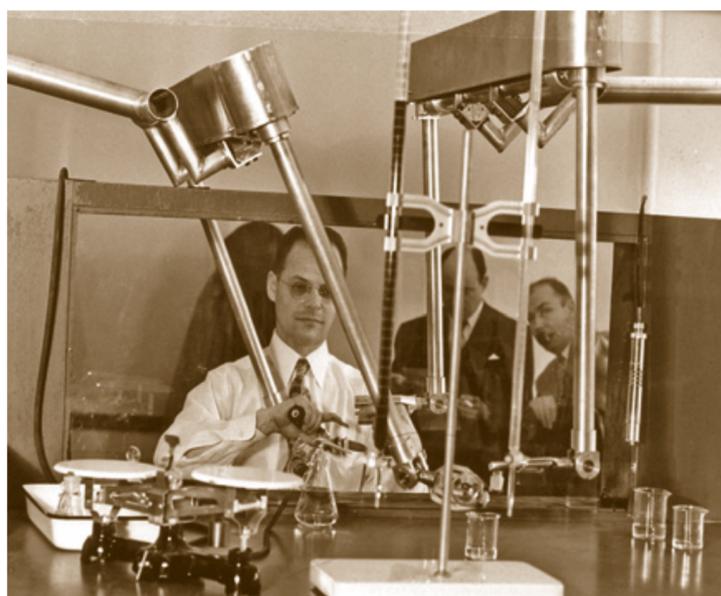


Figura 4 – Manipulação de material radioativo por meio de teleoperadores elétricos e mecânicos (Siciliano e Khatib, 2016).

Durante o início dos anos 1960, um interesse crescente no assunto levou a vários experimentos como uma forma de entender os efeitos do atraso e da latência na teleoperação (Sheridan e Ferrell, 1963; Ferrell, 1965). Para lidar com este problema, o conceito de controle supervisão foi introduzido por Ferrell e Sheridan (1967). O controle supervisão consiste de um sistema com dois níveis separados de controle: 1) controle direto do

equipamento por um computador no ambiente remoto, que processa realimentação e toma decisões rotineiras relativamente simples; 2) supervisão por um operador que ocasionalmente define sequências de submetas para o dispositivo remoto, modifica seus parâmetros e compensa sua capacidade limitada de tomada de decisão. Este trabalho inspirou os próximos anos de desenvolvimento.

O interesse crescente no desenvolvimento da teleoperação fez aumentar a terminologia utilizada nesta área de pesquisa. E, apesar de alguns termos, como telepresença e telerobótica, serem usados quase como sinônimos de teleoperação, eles têm significados diferentes (Sheridan, 1995). Enquanto a teleoperação implica na operação de uma máquina à distância, a telepresença se refere a um conjunto de tecnologias para fornecer ao usuário a percepção de realmente estar presente no local remoto. Ou seja, a telepresença fornece ao usuário não apenas a capacidade de manipular o ambiente remoto, mas também de perceber e interagir de forma transparente com o ambiente remoto (Siciliano e Khatib, 2016).

A telerobótica, por sua vez, é uma forma de teleoperação na qual um operador atua como um supervisor de robôs à distância, principalmente por meio de conexões não cabeadas. Outros termos, como telecirurgia (Gupta et al., 2019), telemonitoramento (Patrone et al., 2019), telexploração (Norris e Davidoff, 2014), entre outros, foram cunhados como derivações de telerobótica quando empregados a uma aplicação específica.

Analisando a evolução do termo telepresença na literatura, é possível identificar três categorias principais de acordo com sua definição: telepresença simples, telepresença cibernética e telepresença experimental (Draper et al., 1998). Telepresença simples pode ser entendida como a destreza para operar em um ambiente sintético, e o uso desta habilidade para controlar máquinas à distância (Draper et al., 1998; Travis et al., 1994). Por outro lado, telepresença cibernética foca na qualidade das interfaces homem-máquina, o que permite que as capacidades humanas sejam projetadas no ambiente sintético, por meio da eficiência de *displays* e controles (Draper et al., 1998; Smith e Smith, 1990). Finalmente, telepresença experimental é sobre a experiência do usuário e a sensação de estar fisicamente presente em um ambiente remoto devido ao estado mental do usuário (Akin et al., 1983; Sheridan, 1996).

Draper et al. (1998) revisam as abordagens teóricas para explicar a telepresença experiencial, que são divididas em dois grupos principais: abordagens tecnológicas e psicológicas. Nas abordagens tecnológicas, a telepresença existe e é causada por características do ambiente sintético. Abordagens psicológicas, por sua vez, afirmam que fenômenos psicológicos conhecidos induzem a telepresença, informação que pode fornecer alguns antecedentes úteis para desenvolvedores de ambiente sintético.

Alguns dos primeiros desenvolvimentos relacionados aos métodos físicos de tele-

presença, especialmente para propósitos de projeto de sistema humano, foram bastante abordados em publicações históricas por [Minsky \(1980\)](#) e [Held e Durlach \(1992\)](#), por exemplo. No entanto, só muito recentemente essas tecnologias têm mostrado que são capazes de entregar estímulos sensoriais críveis a um custo razoável, usando dispositivos de interface humana de tamanho prático.

[Steuer \(1992\)](#) propôs a definição de duas dimensões nas tecnologias de comunicação para possibilitar uma solução de telepresença de alta qualidade. A primeira, vivacidade, refere-se à capacidade de uma tecnologia de produzir uma medição sensorialmente rica do ambiente. A segunda, interatividade, refere-se ao grau em que os usuários de um meio podem influenciar a forma ou o conteúdo do ambiente mediado.

A Figura 5 mostra que a vivacidade é composta por duas variáveis: amplitude sensorial, ou seja, o número de dimensões sensoriais apresentadas simultaneamente; e a profundidade sensorial que fornece a resolução de cada um desses canais perceptivos. A interatividade é composta por três fatores: velocidade, que se refere à taxa na qual o sinal de entrada pode ser assimilado no ambiente mediado; intervalo, que se refere ao número de possibilidades de ação em um determinado momento; e mapeamento, ou seja, a capacidade de um sistema de mapear seus controles para mudanças no ambiente mediado de maneira natural e previsível.

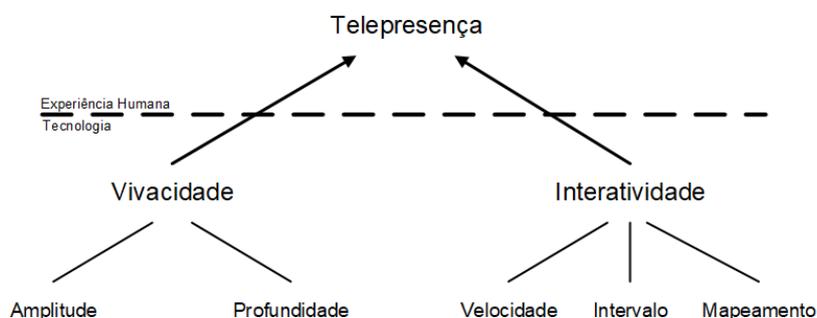


Figura 5 – Dimensões nas tecnologias de comunicação determinantes para qualidade da telepresença.

De acordo com [Siciliano e Khatib \(2016\)](#), a percepção pode ser entendida como uma representação da informação fornecida pelas ferramentas de sensoriamento mencionadas em um modelo orientado para o mundo. O processo de compreensão pode ser dividido em aquisição de dados digitais pelos sensores e transdutores, e em um modelo parcial do ambiente, que inclui informações sobre o estado atual do modelo robótico e recursos externos.

A percepção desempenha uma regra fundamental na telepresença. Ela pode fornecer ao usuário aspectos relevantes do ambiente. Para produzir harmonia entre o controlador e o modelo robótico, é necessário usar todos os sentidos humanos como visão,

audição, paladar, olfato e tato. No entanto, o olfato e o paladar são as sensações mais difíceis de serem transmitidas e também raramente são usadas durante uma tarefa primária de teleoperação. Assim, a percepção do ambiente é geralmente restrita à utilização da visão, audição e tato (Lichiardopol, 2007). É possível afirmar ainda que enquanto interfaces visuais e táteis são muito comuns em sistemas inteligentes, as interfaces baseadas em áudio são uma área relativamente nova e em desenvolvimento.

Sendo um dos sistemas sensoriais mais importantes para a telepresença, a visão é capaz de proporcionar uma sensação de imersão profunda. É possível coletar uma grande variedade de informações dos objetos e do ambiente apenas usando a visão. Normalmente, a tarefa de agarrar um objeto é realizada com base na percepção 3D.

De acordo com McIntire et al. (2014), a percepção visual de profundidade é o resultado da combinação mental de pistas visuais monoculares e binoculares. As informações da profundidade nos permitem determinar formas 3D de objetos, arranjos espaciais e localização. Os sinais monoculares representam informações 2D vistas apenas de um olho, incluindo tamanho relativo, oclusão, sombreamento, frequência espacial de texturas, paralaxe de movimento, etc. Sempre que os sinais monoculares são degradados, a percepção e o desempenho podem ser afetados negativamente. No entanto, graças aos sinais binoculares, que fornecem informações 3D capturadas pelos dois olhos e muitas vezes mais precisas, a percepção de profundidade se torna mais robusta.

A visualização 3D estereoscópica, do inglês, *Stereoscopic 3D* (S3D), é a abordagem que permite que pistas de profundidade monoculares e binoculares coexistam no mesmo sistema de exibição, fornecendo diferentes vistas da cena para o usuário, onde cada olho recebe uma imagem (também chamada de meia-imagem ou par estéreo). Existem muitas aplicações que podem se beneficiar dessa abordagem. Por exemplo, uma tarefa de compreensão espacial de uma cena complexa (análise de imagens), manipulação de objetos virtuais (desenho CAD ou teleoperação de um manipulador robótico) e navegação (teleoperação de um veículo robótico). Dados esses pontos, a S3D é útil para aumentar o interesse do usuário e realismo do assunto, também oferecendo ganhos de desempenho (McIntire et al., 2014). Em (Livatino et al., 2014), os autores avaliam a S3D em teleoperação endoscópica médica por meio da usabilidade de um broncoscópio estereoscópico flexível. Eles comparam diferentes sistemas de telenavegação com o objetivo de auxiliar os projetistas destes sistemas na tomada de decisões.

Depois de comparar a síntese de experiências visuais virtuais, Begault e Trejo (2000) publicaram que a transformação da experiência por meio de simulação de áudio espacial é mais fácil e convincente de realizar. Para melhorar a qualidade de um sistema de telepresença, é difícil ignorar o sentido da audição. A imersão em um ambiente de realidade virtual pode ser melhorada se as ações forem acompanhadas por sons apropriados que são aparentemente emitidos de seus locais apropriados. O som 3D pode apresentar vantagem

sobre a visão, pois várias fontes de sons virtuais podem ser sintetizadas para ocorrer em qualquer lugar no espaço de 360° ao redor de um ouvinte.

A ideia de usar som 3D para experiências imersivas foi explorada por [Sánchez e Lumbreras \(1999\)](#). Os autores tentaram introduzir entretenimento educacional interativo e imersivo para crianças cegas e demonstraram que experiências auditivas 3D podem renderizar imagens ambientais espaciais. Usando apenas técnicas de som espacial, eles reproduziram ambientes completos com sucesso. Para testar a metodologia, sete crianças com deficiência visual exploraram o ambiente virtual e tentaram recriar o ambiente com blocos de LEGO. Resultados mostram que as crianças conseguiram reconstruir com sucesso a cena virtual.

No contexto da teleoperação, [Black et al. \(2019\)](#) recriaram um caso de uso típico de cirurgia transnasal com um ambiente de teste que simula uma intervenção deste tipo, incluindo um robô contínuo – um tipo de robô caracterizado por infinitos graus de liberdade e número de juntas – simulado. O método emprega um conjunto de amostras de canto gravadas para fornecer dicas de navegação. Um sintetizador de áudio em tempo real responde à posição do efetuador. Afastamentos das distâncias planejadas vertical e horizontal e da profundidade são mapeados para os parâmetros do sintetizador de exibição auditiva. A adição de um *display* auditivo para aumentar a interação com um robô contínuo teleoperado mostrou um bom desempenho e usabilidade.

Muitas técnicas que proveem a percepção tátil têm sido desenvolvidas e estudadas. A capacidade de avaliar parâmetros como a aspereza, temperatura, e a força aplicada em um objeto pode ser definida como sensação háptica. Como o objetivo desta dissertação consiste na investigação, implementação e adaptação de técnicas de realimentação de força em interfaces hápticas, a Seção 2.2 é dedicada a apresentar tecnologias de realimentação háptica.

O projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração* busca desenvolver um arcabouço computacional de teleoperação utilizando telepresença cibernética, como apresentado em ([Draper et al., 1998](#); [Smith e Smith, 1990](#)), e telepresença experimental, como apresentado em ([Akin et al., 1983](#); [Sheridan, 1996](#)). Além do mais, o projeto investiga tecnologias de comunicação que forneçam as dimensões necessárias para possibilitar telepresença de alta qualidade, definidas por ([Steuer, 1992](#)). Portanto, são avaliadas técnicas de realimentação sensorial, tais como de realimentação visual e auditiva, estudadas por [McIntire et al. \(2014\)](#) e por [Begault e Trejo \(2000\)](#), respectivamente.

2.2 Háptica

Háptica é a tecnologia de criar e experimentar sensações de toque. Tarefas simples, como abotoar um casaco e apertar a mão de alguém, tornam-se extremamente difíceis de realizar sem uma realimentação háptica adequada. Para melhorar o desempenho de um operador em ambientes simulados e teleoperados, as interfaces hápticas buscam gerar uma sensação convincente de que o operador está tocando diretamente um ambiente real (Siciliano e Khatib, 2016).

Nos anos 1990, a miniaturização de componentes eletrônicos permitiu a fabricação de dispositivos hápticos. Além do mais, o interesse na utilização destes sistemas hápticos cresceu com o desenvolvimento da simulação de computador e da realidade virtual que surgiram como uma via paralela na pesquisa de teleoperação.

Inicialmente, por ter sido um produto de nicho muito especializado, os dispositivos hápticos tornaram-se predominantes, especialmente para jogos de computador, mas também para certas tarefas CAD de realidade virtual e para treinamentos cirúrgicos (Massie et al., 1994). Isso permitiu uma queda significativa no preço das interfaces hápticas e maior facilidade de programação, o que, por sua vez, atraiu comunidades de pesquisa e bases de aplicação muito maiores.

Um exemplo é o estudo dos aspectos da psicomotricidade associada a dispositivos hápticos realizados por psicólogos e fisiologistas. Doubler e Childress (1984) observaram que a percepção do operador de teleoperação pode ser considerada semelhante ao conceito de propriocepção fisiológica estendida desenvolvido para próteses. Ou seja, se o operador for responsivo o suficiente, após o treinamento o dispositivo parecerá uma parte do corpo. A principal vantagem é que a carga cognitiva para o operador é amplamente reduzida e certas manipulações podem ser realizadas quase instintivamente.

Apesar da colaboração da ciência para a evolução de sistemas hápticos nas décadas de 1980 e 1990, os modelos comerciais de teleoperação geralmente contavam apenas com realimentação visual. Por exemplo, dois sistemas comerciais, com origem no projeto militar *US-DARPA*, entraram no mercado de teleoperação cirúrgica, *Intuitive Surgical's da Vinci* e *Computer Motion's Zeus*. A háptica ainda não estava presente nestes modelos, de modo que o cirurgião não conseguia sentir o que estava fazendo. Assim, surgiu um esforço crescente para avaliar o quanto a realimentação háptica ajudaria a melhorar a segurança do paciente e a reduzir a carga de trabalho mental do cirurgião (Zemiti et al., 2004; De Gersem, 2005).

Com a democratização do uso de interfaces hápticas e o crescente interesse na sua utilização em sistemas de teleoperação, Hayward et al. (2004) discutem sobre estas interfaces e suas aplicações. A função de vários dispositivos é descrita como parte de um problema mais geral da criação de interfaces hápticas. A finalidade dessas interfaces é re-

tratada como uma tentativa de explorar as habilidades motoras sensoriais para melhorar a comunicação entre humanos e máquinas. Os autores mostram que vincular o desempenho do dispositivo ao desempenho humano é importante, fazendo crescer o interesse em pesquisas sobre esse problema.

Esta democratização impulsionou trabalhos como o de [Hayward e MacLean \(2007\)](#) que descrevem métodos que foram pesquisados e desenvolvidos para obter a geração de sensações hápticas, os meios para construir dispositivos experimentais de complexidade modesta e os componentes de *software* necessários para gerá-los. Outro exemplo é proposto por [MacLean e Hayward \(2008\)](#) que apresentam alguns conceitos básicos do *design* de interação háptica, juntamente com várias aplicações interessantes baseadas nessa tecnologia. Os autores retratam os fundamentos da construção de dispositivos hápticos experimentais de complexidade modesta, os componentes de *software* necessários para conduzi-los e os conceitos de *design* de interação importantes para a criação de sistemas utilizáveis.

Segundo [Park e Khatib \(2006\)](#), a teleoperação háptica fornece telepresença, permitindo que um usuário controle remotamente um robô escravo por meio de um dispositivo mestre enquanto percebe ao mesmo tempo o ambiente remoto. Uma variedade de modelos robóticos são controlados por dispositivos hápticos, incluindo exoesqueletos, garras atuadas, manipuladores paralelos e seriais, dispositivos semelhantes a *mouses* de computador para pequenos espaços de trabalho e dispositivos de grande espaço de trabalho que capturam o movimento do braço e até do corpo completo.

A telepresença fornecida por esses sistemas, de acordo com [Siciliano e Khatib \(2016\)](#), pode ser originária da duas funções do sistema nervoso humano desempenham um papel principal na sensação do toque: cinestesia (a sensação interna de forças e deslocamentos dentro dos músculos, tendões e articulações) e a sensação tátil (a sensação de deformações da pele). A háptica incorpora ambos e está associada a atividades como manipulação ou exploração. Dispositivos hápticos idealmente incluiriam exibições de força e táteis, como sensações de aspereza e de temperatura, embora isso raramente tenha sido feito devido às limitações de tamanho e peso dos atuadores.

Uma interface de controle baseada em cinestesia pode ser usada para gerar uma realimentação de força para o usuário quando houver um risco maior de colisão. Nesses sistemas, a magnitude da força está relacionada ao risco de uma colisão e a direção da força aponta diretamente para longe do objeto que representa o maior risco. Por exemplo, baseando-se em funções potenciais usadas no planejamento de caminhos robóticos, [Lam et al. \(2009\)](#) propuseram um campo de risco paramétrico para calcular o risco de uma colisão.

Além do mais, a realimentação háptica tem se mostrado eficaz para auxiliar na navegação ([Abayazid et al., 2016](#); [Pacchierotti et al., 2014](#); [Chevrie et al., 2019](#); [Selvaggio](#)

et al., 2018; Abi-Farraj et al., 2019) e fornecer informações do ambiente (Meli et al., 2017; Chinello et al., 2017; Bimbo et al., 2017; Pacchierotti et al., 2012). Por exemplo, Majewicz e Okamura (2013) usaram uma interface háptica para comandar a posição desejada da ponta da agulha no espaço cartesiano e fornecer realimentação de força representando restrições cinemáticas e o erro de posição do sistema robótico.

Pacchierotti et al. (2014) apresentaram um sistema de teleoperação háptica para agulhas flexíveis. Ele permite que os médicos manobrem a ferramenta cirúrgica enquanto lhes fornece orientação de navegação por meio de realimentação de força, tanto cinestésica, quanto vibrotátil.

Owada e Tsumaki (2017) mostram uma abordagem diferente para melhorar a percepção de um operador. Eles aproveitaram o *Rubber Hand Illusion* (RHI) para reproduzir uma sensação de toque. O RHI é um paradigma criado em 1998 para explorar a relação entre os sistemas sensoriais visuais e táteis. Neste método, o usuário vê a mão artificial e observa a estimulação tátil sendo aplicada à mão artificial. Ao mesmo tempo, a mesma estimulação tátil é administrada à mão do sujeito. A sincronização da estimulação visual e tátil pode causar propriocepção fisiológica. Os autores usam motores de vibração para simular a sincronização entre a mão virtual e a mão do sujeito. Essa técnica melhora a imersão e fornece outra ferramenta para realimentação tátil.

O desenvolvimento de sistemas de teleoperação bilateral com utilização de realimentação háptica tem se mostrado uma alternativa crível para fornecer telepresença tátil, principalmente em procedimentos médico-cirúrgicos. Porém, tarefas da indústria de mineração, como a escavação, são suscetíveis a esforços excessivos que podem causar desde prejuízos ao equipamento até danos indesejados ao ambiente e/ou ao operador. Portanto, a utilização de técnicas de realimentação háptica, principalmente para fornecer informações do ambiente, como apresentado por Majewicz e Okamura (2013), e para auxiliar na navegação, como proposto em (Lam et al., 2009), é uma potencial solução para os problemas destacados em ambientes de mineração. Assim, esta dissertação utiliza como base os trabalhos citados anteriormente para propor estratégias que compõem o módulo de realimentação de força do arcabouço de teleoperação do projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*.

2.3 Teleoperação na Mineração

A seguir, são apresentadas as tecnologias atuais empregadas em atividades de mineração. Uma vez que a indústria baseia seus produtos e serviços em tecnologias que surgiram de pesquisas, também é apresentada uma breve descrição dos principais trabalhos de teleoperação nos últimos anos que se concentraram em aplicações de mineração.

2.3.1 Tecnologias Industriais para Teleoperação na Mineração

A teleoperação pode ser aplicada com sucesso em muitas áreas, por exemplo, em atividades de mineração. No início, a extração de recursos minerais era realizada manualmente, sendo aperfeiçoada graças à mecanização dos equipamentos e a aplicação de recursos computacionais para a automatização das tarefas.

A automação e a teleoperação foram propostas como uma solução para reduzir os custos de mineração e os riscos associados ao trabalho manual. As abordagens tecnológicas relacionadas ao conceito de teleoperação permite ao operador controlar máquinas remotamente sem estar necessariamente no mesmo ambiente.

Desde a década de 1990, com o aprimoramento do poder da computação e a difusão de novos recursos, diversos resultados de pesquisas em teleoperação foram publicados. Esses avanços geraram inúmeras indústrias que prestam serviços nesta área.

Um dos prestadores de serviços de teleoperação é a Hard-Line¹, fundada em 1996. O sistema de teleoperação oferecido pela Hard-Line permite operar máquinas pesadas – por exemplo, freios, brocas, escavadeiras, LHDs, carregadeiras de rodas, tratores – a partir de uma estação de controle remoto, evitando que o operador trabalhe em zonas de perigo. A infraestrutura independente baseada em WiFi tem a capacidade de se expandir facilmente com o crescimento do local de mineração e a capacidade de interconectar toda a mina para eventual controle remoto.

A empresa americana *Autonomous Solutions, Inc.* (ASI)² há mais de 20 anos começou a desenvolver veículos autônomos que melhoram drasticamente a produtividade enquanto reduzem os custos operacionais. Em 2006, a ASI entrou na indústria de mineração e, em uma parceria entre ela e empresas multinacionais de mineração, um sistema de transporte autônomo foi desenvolvido, denominado *Haulage AI*. O *Haulage AI* permite que um usuário gerencie vários caminhões de transporte continuamente em um único sistema. O principal produto é um *kit* de automação veicular que, segundo a empresa, possui componentes fáceis de instalar em qualquer plataforma, convertendo-o de controle manual para um veículo autônomo. Considerando os diferentes equipamentos presentes, módulos foram desenvolvidos para diferentes tipos de veículos. A mineração é atualmente um dos quatro principais mercados da empresa de automação de veículos.

Quando se trata de pesquisa e desenvolvimento, o *National Robotics Engineering Center* (NREC)³ desenvolve e fabrica tecnologias e soluções de robótica conceitual para a indústria. O instituto de pesquisa científica oferece serviços relacionados à autonomia, detecção e percepção de veículos terrestres não tripulados, aprendizado de máquina, visão

¹ <https://www.hard-line.com/>

² <https://asirobots.com/>

³ <https://www.rec.ri.cmu.edu/>

de máquina, assistência ao operador, mapeamento 3D e estimativa de posição. Aplicado à mineração, o NREC já desenvolveu tecnologias de assistência ao operador, caminhões e carregadeiras autônomas e sistemas de segurança.

Duas empresas inovadoras reconhecidas por fornecer serviços de mineração de qualidade são a *Remote Control Technologies (RCT)*⁴ e a *Hexagon Mining*⁵. Como muitos locais de minas estão localizados em regiões geograficamente difíceis e sensíveis ao clima com pouca visibilidade, grande altitude, baixas temperaturas, superfícies escorregadias e geladas, essas empresas desenvolveram um sistema de teleoperação capaz de contornar esses problemas, aumentando a produtividade na extração e a segurança de empregados.

No Brasil, a Caterpillar⁶ utilizou uma pá-carregadeira de esteira teleoperada na mina autônoma de Brucutu (Vale S.A.) (Figura 6). Em 2018, o estudo já contava com mais de 850 horas de operação remota, sendo realizado com dois operadores treinados e ocasionando vantagens para o processo tradicional como a inclusão de câmeras de neblina e operação noturna contínua. Atualmente, ainda é possível verificar operações remotas com sistemas semelhantes em outras minas da Vale, como na mina Córrego do Feijão⁷.



Figura 6 – Teleoperação de pá-carregadeira de esteira em Brucutu (Vale).

O projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração* também utiliza como base os sistemas apresentados nesta seção para o desenvolvimento e implementação

⁴ <https://rct-global.com/>

⁵ <https://hexagonmining.com/>

⁶ https://www.cat.com/pt_BR.html

⁷ https://www.linkedin.com/posts/wellington-silva-077b86183_seguranaexadotrabalho-geotecnia-ugcPost-6847312108309266432-LFmW/

do arcabouço computacional de teleoperação, levando em conta as dificuldades encontradas em aplicações na mineração.

2.3.2 Pesquisas Desenvolvidas para Teleoperação na Mineração

Um trabalho que marcou o início da teleoperação na mineração foi (Kwitowski et al., 1989). Neste estudo, uma máquina de mineração contínua é acionada por controle remoto em uma área de extração de carvão. Como os túneis construídos não têm sustentação de cobertura, o acesso humano é proibido, portanto, o método de mineração depende totalmente de teleoperação. Embora essas interfaces, sem dúvida, não sejam as mais sofisticadas, elas foram consideradas eficazes no contexto de mineração, onde a capacidade de sobrevivência, a confiabilidade e a eficiência são relevantes em um ambiente de produção hostil.

Muitos veículos de mineração estão sendo projetados para operação semi-autônoma e teleoperação. No trabalho de Park e Kazman (1995), questões importantes em sistemas de teleoperação aplicados à mineração foram discutidos. Um fator importante a ser considerado é a realimentação por vídeo para o operador. Os autores mostraram que os sistemas avaliados eram pobres em oferecer recursos visuais que permitem ao usuário perceber a real estrutura do ambiente. Eles apresentaram um teste em que o operador era capaz de dirigir a máquina em uma mina apenas “sentindo”, ou seja, usando as colisões do veículo com as paredes para ter uma noção da posição. Ao apresentar esses pontos problemáticos, eles propuseram um sistema usando sobreposições gráficas por meio de alimentação por vídeo em tempo real combinado com conceitos de realidade aumentada.

Ralston e Hainsworth (1998) também apresentam resultados de um dos primeiros projetos de pesquisa em teleoperação de mineração. Seu principal objetivo era controlar remotamente um veículo que fornecia vigilância visual em tempo real e análise da qualidade do ar de minas de carvão subterrâneas em situações onde é muito perigoso para a exploração humana.

Além dos problemas gerais em sistemas de teleoperação, existem demandas específicas na extração de cada tipo de minério. Em minas de carvão, por exemplo, a espessura da camada do minério extraído é um fator chave. Para o melhor aproveitamento do minério, Ralston et al. (2001) utilizaram sensores para medir a profundidade e tamanho da camada de carvão visando maximizar a extração e ao mesmo tempo evitar riscos de colapso da mina.

Reid et al. (2010) conduziram um estudo, também aplicado a minas de carvão, do processo de mineração e conseguiram melhorar a extração pelo método *longwall*. Este processo geralmente é considerado o método mais eficiente de extração subterrânea de carvão; nele, a lavra é feita em jazidas subterrâneas com o auxílio de cortadores giratórios

(tosquiadores) que vão fragmentando um bloco de carvão, de 3 a 4 km de comprimento e 250 a 400 m de largura, em uma parede com 0,6 a 1,0 metro de espessura. Esta longa parede de carvão é extraída em uma única fatia e cai sobre um transportador de correia que transfere-a para a superfície. Os autores desenvolveram sistemas práticos que integram os componentes de detecção e processamento que fornecem medição da posição tridimensional em tempo real de uma máquina de corte *longwall* com precisão centimétrica. O sistema de navegação emprega técnicas de *Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)* baseado em *laser* para melhorar o desempenho da navegação medindo de forma independente a distância de fechamento (recuo) do tosquiador e a fluência lateral do sistema de mineração *longwall*, evitando colisões.

Pesquisadores do *ITV* têm buscado desenvolver e validar sistemas de teleoperação, bem como avaliar os efeitos destes sistemas na individualidade do operador. [Fidêncio et al. \(2017\)](#) apresentam 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. Ao operador, estava disponível uma interface de teleoperação contendo dispositivos de vídeo e háptico.

O projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração* também contribuiu com a literatura de teleoperação em equipamentos de mineração, buscando estudar diversas tecnologias com potencial para compor um sistema comercial de teleoperação avançada. [Rezeck et al. \(2018a\)](#) propõem um arcabouço para a operação remota de um braço robótico servo motor usando realimentação háptica. O objetivo é fornecer telepresença por meio de uma interface háptica usando realimentação háptica dos motores do dispositivo e uma visualização **3D** do braço em tempo real.

[Rezeck et al. \(2018b\)](#) propõem um sistema imersivo para visualização estereoscópica acoplado a um dispositivo robótico semelhante a uma cabeça que serve como uma estrutura de prova de conceito para futuras aplicações no ambiente de mineração. Experimentos em ambientes reais indicam melhor desempenho em manipulação, percepção de profundidade, conforto e tempo de resposta.

[Lima et al. \(2019\)](#) propõem uma estratégia de realimentação háptica das forças de interação exercidas na escavadeira que foi validada por meio de simulações considerando um braço manipulador fixo. Esta dissertação prossegue com este estudo, aprimorando os desenvolvimentos anteriores, implementando uma estratégia de direção assistida utilizando realimentação háptica, e avaliando os benefícios das estratégias para o sistema teleoperado e para a interação homem-máquina. Além do mais, os estudos apresentados nesta dissertação podem ser utilizados para avaliar a viabilidade de implementações equivalentes em sistemas comerciais semelhantes, como os utilizados nas minas de Brucutu e do Córrego do Feijão, ambas da mineradora Vale S.A.

2.4 Ferramentas de Análise de Carga de Trabalho

Carga de trabalho é um modelo hipotético que representa a demanda mental necessária para um operador atingir um determinado nível de desempenho durante a execução de uma tarefa específica (Hart e Staveland, 1988). O nível de carga de trabalho que um ser humano experimenta durante a execução da tarefa é influenciado por muitos fatores, incluindo a sua própria capacidade e as metas de desempenho exigidas, além das demandas objetivas impostas pela tarefa. A avaliação da carga de trabalho mental é um ponto fundamental na pesquisa e desenvolvimento de interfaces homem-máquina, em busca de níveis mais elevados de conforto, satisfação, eficiência e segurança no trabalho (Rubio et al., 2004).

A análise da carga de trabalho permite avaliar a experiência dos operadores durante a execução de tarefas. Regular as demandas desta carga pode garantir a segurança, saúde, conforto e eficiência produtiva dos operadores (Rubio et al., 2004). Um objetivo da análise de carga de trabalho é exatamente regular estas demandas para não subcarregar ou sobrecarregar um indivíduo. Embora os perigos da sobrecarga tenham sido reconhecidos há muito tempo, muitas das preocupações recentes são com o estresse da subcarga e o tédio (Becker et al., 1991; Hancock e Warm, 2003), particularmente à medida que as operações se tornam automatizadas em níveis gradualmente mais elevados.

Os operadores são normalmente avaliados durante a interação com os sistemas operados em ambientes reais ou simulados. A análise de carga de trabalho também pode ser implementada no estágio inicial do ciclo de *design*, como a análise de tarefas. Os projetistas ou avaliadores de fatores humanos podem prever pontos de sobrecarga ou subcarga para encontrar gargalos em potencial da tarefa (Hancock e Warm, 2003).

Segundo Huggins e Claudio (2018), diversas ferramentas foram criadas e aplicadas para medir a carga de trabalho perceptual ao longo dos anos. Porém duas delas são mais conhecidas, sendo o NASA-TLX – em português, Índice de Carga de Tarefa da NASA – e a *Subjective Workload Analysis Technique* (SWAT) – em português, Técnica de Análise de Carga de Trabalho Subjetiva. Ambas são medidas multidimensionais baseadas em respostas de classificação. O autor utiliza as duas ferramentas para avaliar a carga de trabalho de enfermeiras em uma área de infusão de uma clínica de câncer com o objetivo de comparar o desempenho das duas ferramentas neste cenário. A pesquisa também explorou relações não lineares entre as dimensões da NASA-TLX com relação ao pontuação total da SWAT e vice-versa.

Em (Rubio et al., 2004), os autores estudam as duas ferramentas, NASA-TLX e SWAT, além de uma terceira, relativamente mais nova que as primeiras, o *Workload Profile* (WP) – em português, Perfil de Carga de Trabalho. A pesquisa mostrou que existe alta validade convergente entre os três instrumentos, ou seja, as ferramentas se

correlacionam positivamente umas com as outras. Desta forma, a escolha da ferramenta mais adequada deve ser realizada de acordo com o objetivo do estudo.

O [NASA-TLX](#) é um dos instrumentos mais amplamente usados para avaliar a carga de trabalho subjetiva geral. Segundo [Hart \(2006\)](#), a ferramenta tem sido aplicada com sucesso em diferentes setores, dos quais os mais relevantes são: aeronáutica ([Hart e Staveland, 1988](#)), sistemas ciberfísicos ([Mingde et al., 2010](#); [Moreira e Ruschel, 2018](#)), transporte ([Battiste e Bortolussi, 1988](#)) e saúde ([Huggins e Claudio, 2018](#)). Esta ferramenta propõe uma escala de classificação comumente usada em pesquisas sobre fatores humanos que se baseia em seis dimensões: demanda mental, demanda física, demanda temporal, esforço, nível de frustração e desempenho. Mais informações sobre a ferramenta e sua aplicação estão disponíveis em ([NASA, 1986](#)).

Da mesma forma, a [SWAT](#) é uma técnica subjetiva composta por três dimensões: carga de tempo, carga de esforço mental e carga de estresse psicológico. Ela conta ainda com três níveis: um (baixo), dois (médio) e três (alto), para cada uma das três dimensões para avaliar a carga de trabalho. Esta ferramenta é comumente utilizada em estudos na área da saúde ([Huggins e Claudio, 2018](#); [Jacoboson et al., 2011](#); [Benin et al., 2012](#)). Mais informações sobre a ferramenta e sua aplicação são descritas em ([Potter e Bressler, 1989](#)).

O [WP](#) é outra técnica de avaliação baseada na *Multiple Resource Theory* ([MRT](#)) – em português, Teoria de Múltiplos Recursos – de [Wickens \(1991\)](#). Ela é construída em 8 dimensões: processamento perceptivo/central, processamento de resposta, processamento espacial, processamento verbal, processamento visual, processamento auditivo, respostas manuais e respostas de fala. Cada dimensão recebe um peso entre zero (a tarefa não representou nenhuma demanda na dimensão que está sendo avaliada) e um (a tarefa requer atenção máxima) para representar a proporção de recursos de atenção usados em uma dimensão específica para uma tarefa específica. Segundo [Rubio et al. \(2004\)](#), a ferramenta é uma ótima escolha se o objetivo for uma comparação entre a carga de trabalho mental de duas ou mais tarefas com diferentes níveis objetivos de dificuldade. Mais informações sobre a ferramenta e sua aplicação são descritas em ([Tsang e Velazquez, 1996](#)).

Conforme exposto por [Rubio et al. \(2004\)](#), as três ferramentas apresentadas se correlacionam positivamente umas com as outras, tornando a escolha da mais adequada uma questão de objetivo de estudo. Contudo, um sistema de teleoperação utilizando interfaces hápticas e realimentação de força pode ser considerado um sistema ciberfísico que, segundo [Hart \(2006\)](#), é um campo em que o [NASA-TLX](#) tem sido amplamente utilizado; desta forma, esta é a ferramenta escolhida nesta dissertação para avaliar a carga de trabalho dos voluntários. Mais informações sobre a ferramenta e sobre sua aplicação estão disponíveis na Seção 4.4.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

Este capítulo descreve os fundamentos teóricos utilizados para descrever a modelagem cinemática de robôs móveis e manipuladores e o controle cinemático destes manipuladores; os fundamentos para a modelagem de sistemas hápticos também são abordados neste capítulo. A primeira seção apresenta o modelo genérico de robôs com rodas e de manipuladores. Já a segunda seção descreve o controle cinemático do modelo de robô manipulador descrito na seção anterior. Na terceira seção, são abordados os aspectos fundamentais para modelagem de sistemas hápticos.

3.1 Modelos Cinemáticos

A cinemática estuda a movimentação de corpos rígidos desconsiderando as ações de forças e/ou torques, ou seja, considera apenas as propriedades baseadas no tempo e geométricas do movimento. A posição, velocidade, aceleração e derivadas de ordem superior são todas descritas pela cinemática. Em robótica móvel, a cinemática se concentra em determinar a posição e orientação do robô em função do deslocamento das rodas. Já o estudo da cinemática de manipuladores determina a posição e orientação do efetuador (ou ferramenta) do robô em função do deslocamento de suas juntas. A cinemática diferencial, por sua vez, relaciona as velocidades do robô móvel com as velocidades de suas rodas. A relação entre as velocidades do efetuador do manipulador e as velocidades de suas juntas também é caracterizada pela cinemática diferencial. Nesta seção, são descritos os aspectos fundamentais da modelagem cinemática de robôs. Uma descrição completa do assunto pode ser encontrada em [Spong et al. \(2006\)](#), [Siciliano et al. \(2010\)](#) e [Siciliano e Khatib \(2016\)](#).

3.1.1 Modelagem Cinemática de Robôs com Rodas

O modelo de uma plataforma móvel converte as velocidades de referência em sinais elétricos de comando enviados aos motores das rodas, movendo o robô até a posição

desejada, conforme descrito na Figura 7. A formulação completa dos subsistemas pode ser encontradas em (Kozłowski e Pazderski, 2004).

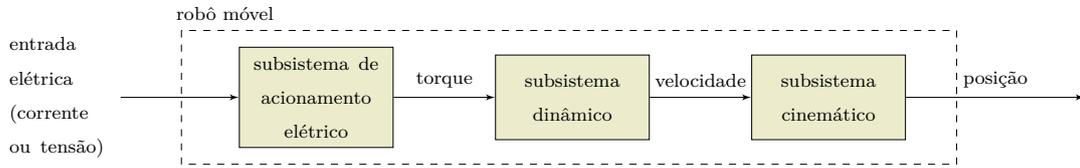


Figura 7 – Decomposição de um robô móvel movido a eletricidade.

A cinemática de um robô móvel trata das relações geométricas e envolve grandezas vetoriais que indicam a direção e posição do robô. O comportamento de todo o sistema mecânico e as restrições impostas a sua movimentação é apresentado a partir do modelo cinemático. Para a modelagem cinemática de um robô móvel planar, é habitual considerar que robô esteja em uma superfície plana com a base ortonormal inercial $(X_I Y_I)$. Portanto, ele possui espaço de configurações $\mathbb{R}^2 \times \mathbb{S}^1$ e sua configuração é representada por:

$$\mathbf{q}_R = \begin{bmatrix} x_R^I \\ y_R^I \\ \psi_R^I \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

onde x_R^I e y_R^I são coordenadas planares da origem do sistema R acoplado à plataforma em relação ao sistema inercial I , e ψ_R^I é o ângulo de rotação em torno do eixo Z_I , como apresentado na Figura 8. Além do mais, um sistema de coordenadas local denotado por $X_R Y_R$ é atribuído ao robô.

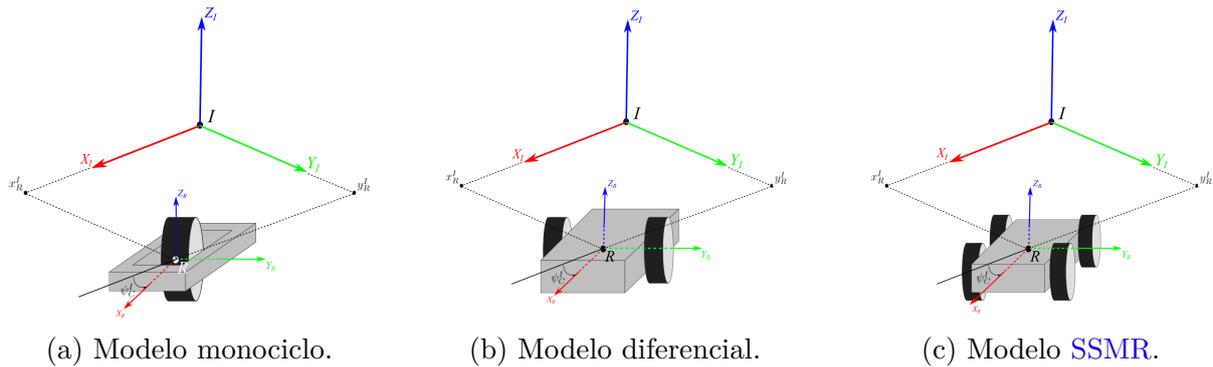


Figura 8 – Robôs móveis do tipo (a) monociclo, (b) diferencial e (c) SSMR com sistema de coordenadas R representados com respeito ao sistema inercial I .

No geral, são três os principais modelos cinemáticos de robôs com rodas que podem descrever a movimentação de um robô terrestre não holonômico sem sistema de giro das rodas: o modelo monociclo, o diferencial e o *Skid-Steering Mobile Robot* (SSMR), que serão discutidos a seguir.

Modelo Monociclo

O modelo monociclo corresponde à forma mais simples do movimento planar de um robô não-holonômico. É comum, para este modelo, assumir as seguintes premissas: o modelo é um corpo rígido, portanto não sofre deformações na sua estrutura, e se movimenta em uma superfície plana e com a roda posicionada perpendicularmente ao plano, sem deslizamento.

Uma restrição imposta a sua movimentação é chamada de restrição não-holonômica, motivo pelo qual ele é considerado um robô não-holonômico, e essa restrição, para o modelo, é dada por

$$\dot{x}_R^I \sin \psi_R^I + \dot{y}_R^I \cos \psi_R^I = 0. \quad (3.2)$$

A partir da derivação desta restrição de movimento, é possível encontrar o modelo cinemático do robô que relaciona a velocidade linear v_x^R com relação ao eixo X_R e angular ω_z^R com relação ao eixo Z_R do robô e com as velocidades lineares \dot{x}_R^I e \dot{y}_R^I e a velocidade angular $\dot{\psi}_R^I$, conforme a Equação 3.3:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R^I \\ \dot{y}_R^I \\ \dot{\psi}_R^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_R^I & 0 \\ \sin \psi_R^I & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^R \\ \omega_z^R \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

onde \dot{x}_R^I e \dot{y}_R^I representam as componentes X_I e Y_I do vetor da velocidade linear e $\dot{\psi}_R^I$ a velocidade angular do robô.

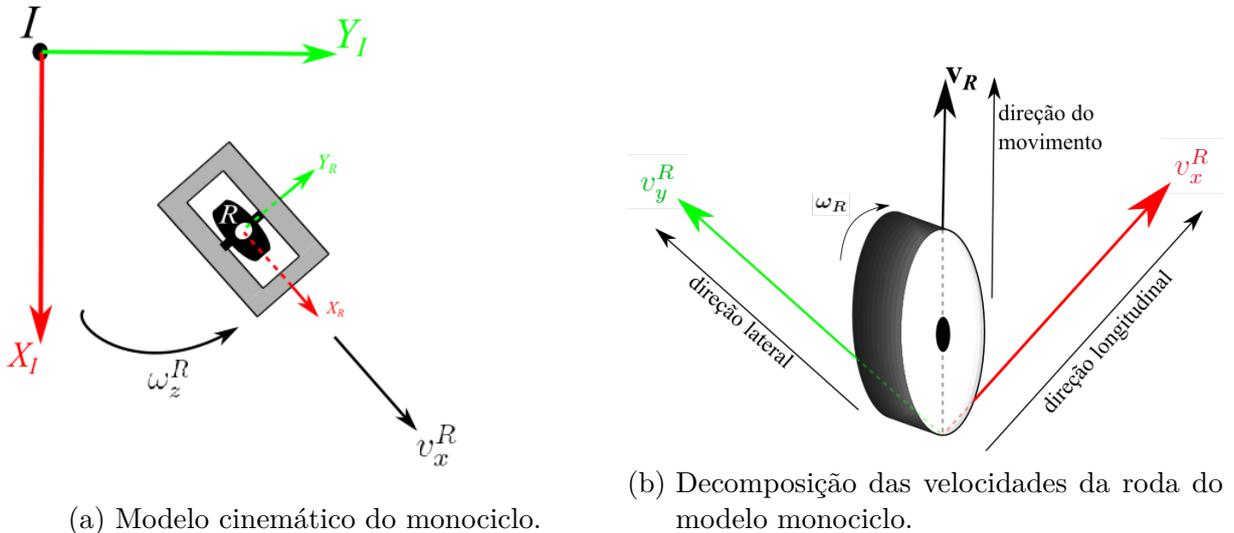


Figura 9 – Representação do modelo cinemático do monociclo.

Apesar de considerar o movimento perfeito do robô, uma vez que deslizamentos não são considerados, o modelo monociclo é afetado por problemas de integração numérica para o cálculo da *pose*, o que resulta em acúmulo de erros propagados temporalmente.

Modelo Diferencial

Um robô com arquitetura diferencial utiliza duas rodas com movimentos individuais e os eixos alinhados para se deslocar no ambiente, podendo ser considerado uma extensão do modelo monociclo. As rodas são espaçadas de uma distância $2b$, onde o seu eixo passa pela origem do sistema de coordenadas R do dispositivo, como mostra a Figura 10. Assim como no modelo monociclo, o escorregamento das rodas não é considerado.

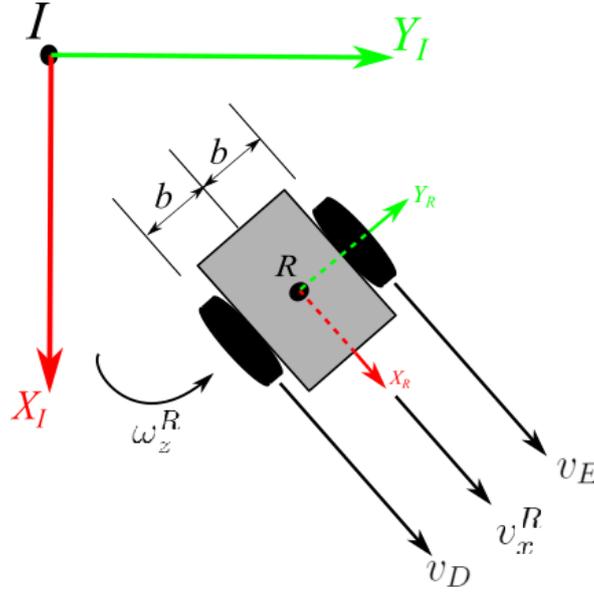


Figura 10 – Modelo cinemático do robô com rodas diferencial.

Basicamente, considerando um robô móvel com as duas rodas de mesmo raio efetivo de rolamento (r), então velocidades idênticas nas rodas proporcionam uma translação linear e um valor diferente aplicado entre elas faz com que o dispositivo realize um movimento curvilíneo. Rotações sobre o próprio eixo também são factíveis ao se aplicar velocidades de sinais inversos nos lados do robô.

A velocidade linear v_x^R e a velocidade angular ω_z^R do modelo são relacionadas a cada uma das velocidades lineares, da roda direita v_D e da roda esquerda v_E , e da distância $2b$ entre rodas. Portanto, essa combinação é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_x^R \\ \omega_z^R \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{b} & -\frac{1}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_D \\ v_E \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

A Equação 3.4 pode ser relacionada àquela do modelo cinemático do monociclo (Equação 3.3), descrevendo o modelo para a arquitetura diferencial onde as entradas são as velocidades lineares das rodas, direita v_D e esquerda v_E , e as saídas são as velocidades lineares \dot{x}_R^I , \dot{y}_R^I e a velocidade angular $\dot{\psi}_R^I$. Este modelo é representado pela Equação 3.5:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R^I \\ \dot{y}_R^I \\ \dot{\psi}_R^I \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \psi_R^I & \cos \psi_R^I \\ \sin \psi_R^I & \sin \psi_R^I \\ \frac{1}{b} & -\frac{1}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_D \\ v_E \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Considerando que o deslizamento entre as rodas e a superfície pode ser desprezado, a velocidade linear de uma roda é dada pelo produto escalar entre o raio efetivo de rolamento r e a velocidade angular da roda. Posto isso, é possível expressar o modelo da Equação 3.5 utilizando como entradas as velocidades angulares das rodas, como apresentado na Equação 3.6:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R^I \\ \dot{y}_R^I \\ \dot{\psi}_R^I \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} \cos \psi_R^I & \cos \psi_R^I \\ \sin \psi_R^I & \sin \psi_R^I \\ \frac{1}{b} & -\frac{1}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_E \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Modelo *Skid-Steering*

Modelos *SSMR* se movimentam por um conjunto de quatro ou mais rodas, conforme apresentado na Figura 8(c), ou ainda por meio de esteiras. Este modelo permite alterar a direção do veículo conforme a diferença entre as velocidades relativas do seu lado esquerdo e direito. Porém, devido ao alinhamento das rodas ao eixo longitudinal do dispositivo o escorregamento esta sempre presente ao realizar giros (Pentzer et al., 2014).

O *SSMR* é uma ótima escolha para veículos teleoperados ou do tipo *all-terrain*, como afirmam Pentzer et al. (2014), devido a sua simplicidade e robustez em termos mecânicos, além de fornecer melhor manobrabilidade, incluindo capacidade de giro com raio zero como no modelo diferencial.

Em contrapartida, a modelagem das forças de atrito é uma prática complexa para a maioria dos robôs com rodas, e em especial, dos *SSMRs*. Essas forças podem depender do solo, do material das rodas, da pressão dos pneus, da umidade do solo e até mesmo da velocidade do robô.

Em geral, todos esses efeitos são estimados empiricamente e são sensíveis a várias condições não controladas. Diante dessas dificuldades, pesquisas mais recentes buscam implementar modelos que independam do modelo do pneu e dos coeficientes de atrito, ou seja, definido a partir das características geométricas do robô. A seguir, são apresentadas as principais etapas de uma destas modelagens alternativas; a descrição completa é encontrada em (Dogru e Marques, 2021).

Primeiramente, é necessário assumir o robô composto por um corpo rígido e quatro rodas rígidas, conforme mostrado na Figura 11. A partir da desta figura é possível notar que as constantes geométricas que representam um vetor que vai do centro do robô para cada posição da roda são dadas pela Equação 3.7:

$$\mathbf{c}_1 = \begin{bmatrix} a \\ -b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_2 = \begin{bmatrix} -a \\ -b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_3 = \begin{bmatrix} -a \\ b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_4 = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

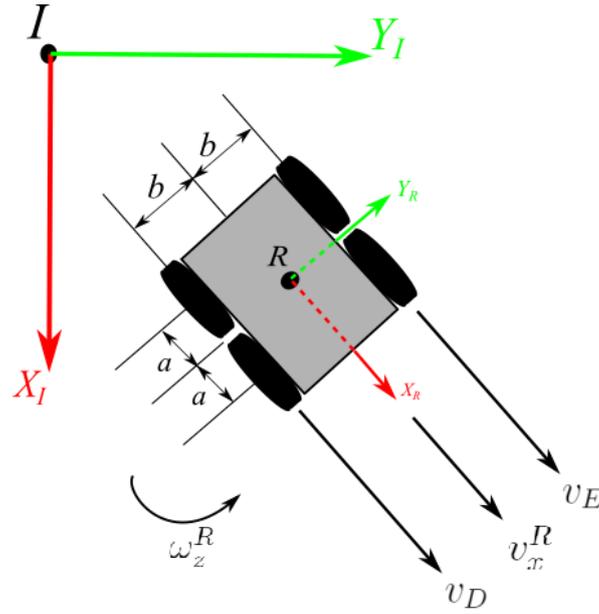


Figura 11 – Modelo cinemático do SSMR.

Comumente, os SSMRs são operados com velocidades iguais para as rodas à esquerda e à direita. Assim, é possível assumir a seguinte premissa:

$$\omega_D = \omega_1 = \omega_2, \quad \omega_E = \omega_3 = \omega_4. \quad (3.8)$$

Para obter o modelo cinemático do SSMR, também é necessário estudar a condição de equilíbrio dinâmico, além de assumir algumas premissas – descritas em (Dogru e Marques, 2021) – acerca da derivação do modelo cinemático do robô.

Analisando o equilíbrio durante o movimento linear, é necessário assumir que $\omega_z^R = 0$ e que, por simetria, neste caso, $\omega_D = \omega_E = \omega_i \forall i \in \{1, 2, 3, 4\}$. No equilíbrio dinâmico linear, o cenário esperado é que a força resultante total à qual o robô está sujeito seja igual a zero e é possível perceber a seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} v_x^R - r\omega_i \\ v_y^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

A segunda igualdade na Equação 3.9, $v_y^R = 0$, representa a restrição não holonômica do modelo. A primeira fornece a condição $v_x^R = r\omega_i \forall i$ conforme esperado.

Agora, na análise do equilíbrio durante o movimento angular puro, ou seja, $v_x^R = v_y^R = 0$. Desta vez, a simetria – o centro geométrico coincide com o de massa – requer que $\omega_D = -\omega_E$. De maneira análoga ao linear, o cenário esperado para o equilíbrio dinâmico angular é que o torque total que atua no robô seja igual a zero, pois implica em $\omega_z^R = 0$.

Considerando a condição da Equação 3.8 e a simetria $\omega_D = -\omega_E$, é possível

generalizar a solução de acordo com a Equação 3.10:

$$\omega_z^R = \frac{b}{a^2 + b^2} r \omega_D = -\frac{b}{a^2 + b^2} r \omega_E. \quad (3.10)$$

A partir das condições de estabilização dadas pelas Equações 3.9 e 3.10 e da relação entre as velocidades angular e linear das rodas é possível estabelecer o modelo cinemático do SSMR. No caso geral, em que as velocidades das rodas do lado esquerdo e direito não são iguais, ou seja, $v_D \neq v_E$, vale considerar sua média aritmética para calcular o movimento linear. Da mesma forma, quando $v_D \neq -v_E$, é possível considerar a média da contribuição das rodas da direita e da esquerda para o movimento angular. Portanto:

$$v_x^R = \frac{v_D + v_E}{2}, \quad \omega_z^R = \frac{b}{a^2 + b^2} \frac{v_D - v_E}{2}. \quad (3.11)$$

Assim, os valores de v_x^R e ω_z^R da Equação 3.5 são apresentados na Equação 3.12:

$$\begin{bmatrix} v_x^R \\ \omega_z^R \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{b}{a^2+b^2} & -\frac{b}{a^2+b^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_D \\ v_E \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

E o modelo completo cinemático do SSMR, em função das velocidades lineares das rodas, é dado pela Equação 3.13:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R^I \\ \dot{y}_R^I \\ \dot{\psi}_R^I \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \psi_R^I & \cos \psi_R^I \\ \sin \psi_R^I & \sin \psi_R^I \\ \frac{b}{a^2+b^2} & -\frac{b}{a^2+b^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_D \\ v_E \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Portanto, o modelo, em função das velocidades angulares das rodas, pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R^I \\ \dot{y}_R^I \\ \dot{\psi}_R^I \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} \cos \psi_R^I & \cos \psi_R^I \\ \sin \psi_R^I & \sin \psi_R^I \\ \frac{b}{a^2+b^2} & -\frac{b}{a^2+b^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_E \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Além disso, observe que o modelo da Equação 3.14 se reduz ao modelo clássico de robô de acionamento diferencial (Equação 3.6) quando $a = 0$. Este é um caso limite em que a distância entre os eixos das rodas dianteiras e traseiras é zero.

3.1.2 Modelagem Cinemática de Robôs Manipuladores

Enquanto robôs móveis são capazes de se movimentar livremente no solo, os robôs manipuladores são aqueles que tem sua base fixa e, geralmente, possuem funções semelhantes às de um braço humano.

A estrutura mecânica de um robô manipulador consiste em uma sequência de corpos rígidos (elos) interligados por meio de articulações (juntas). Um manipulador é

caracterizado por um braço que garante mobilidade por meio da presença das juntas, um pulso que confere destreza e um efetuador que executa a tarefa exigida do robô.

Conforme apresentado no Apêndice A, a posição de um corpo rígido no espaço é expressa em termos da posição de um ponto conveniente no corpo em relação a um sistema de coordenadas de referência (translação), enquanto sua orientação é expressa em termos de componentes dos vetores unitários do sistema de coordenadas fixado ao corpo em relação ao mesmo referencial (rotação).

A estrutura fundamental de um manipulador é a cadeia serial ou cinemática aberta. Do ponto de vista topológico, uma cadeia cinemática é denominada aberta quando há apenas uma sequência de elos conectando as duas extremidades da cadeia.

A mobilidade de um manipulador é garantida pela presença de juntas. A articulação entre dois elos consecutivos pode ser realizada por meio de uma junta prismática ou de revolução. Em uma cadeia cinemática aberta, cada junta prismática ou rotativa fornece à estrutura um único DoF. Uma junta prismática cria um movimento de translação relativo entre os dois elos, enquanto uma junta de revolução cria um movimento de rotação relativo entre os dois elos. As juntas de revolução são mais usuais que as prismáticas em vista de sua compacidade e confiabilidade.

Um robô manipulador com n juntas terá $n + 1$ elos, já que cada junta conecta dois elos. As juntas são numeradas de 1 a n , e os elos de 0 a n , começando da base. Por esta convenção, a junta i conecta o elo $i - 1$ ao elo i . A localização da junta i é considerada fixa em relação ao elo $i - 1$. Quando a junta i é acionada, o elo i se move. Portanto, o elo 0 (o primeiro elo) é fixo e não se move quando as juntas são acionadas. A Figura 12 ilustra essa descrição.

Uma vez que o problema da cinemática direta está relacionado à relação entre as juntas do robô manipulador e a posição e orientação do efetuador, é necessário conhecer as variáveis das juntas dispostas na cadeia cinemática. As variáveis de junta são os ângulos entre os elos no caso de juntas de revolução, e a extensão do elo no caso de juntas prismáticas. Ao se conhecer os valores das variáveis de junta é simples inferir a posição de qualquer ponto no manipulador, uma vez que os elos do manipulador são considerados rígidos e a base é fixa. O conjunto de todas as configurações possíveis é denominado espaço de configuração. Portanto, neste contexto, é comum representar uma configuração por um conjunto de valores, $q_1 \cdots q_n$, para as variáveis das juntas, denotando este vetor de valores por \mathbf{q}_M . Uma representação mais específica, com $q_i = \theta_i$ para uma junta de revolução e $q_i = d_i$ para uma junta prismática, pode ser adotada.

Por sua vez, o conjunto de todas as configurações possíveis do manipulador forma um volume varrido pelo seu efetuador, denominado espaço de trabalho. O espaço de trabalho de um manipulador é restringido pela sua geometria, bem como restrições

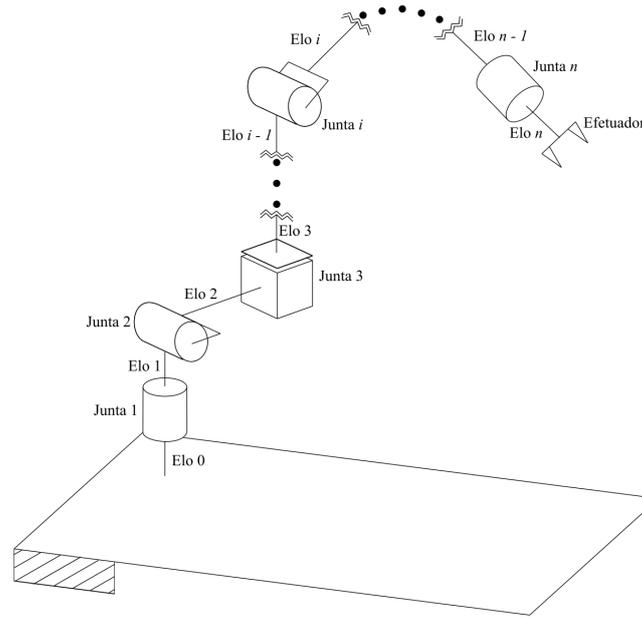


Figura 12 – Representação da cadeia cinemática serial de um robô manipulador.

mecânicas nas juntas. O espaço de trabalho geralmente é dividido em espaço de trabalho alcançável e espaço de trabalho de destreza. O espaço de trabalho alcançável é todo o conjunto de pontos alcançáveis pelo manipulador, enquanto o espaço de trabalho de destreza consiste naqueles pontos que o manipulador pode alcançar com uma orientação arbitrária do efetuador. Obviamente, o espaço de trabalho de destreza é um subconjunto do espaço de trabalho alcançável.

Ademais, o número de DoFs é igual à dimensão do espaço de configuração. Para um robô manipulador, o número de juntas determina o número de DoFs. Como um objeto rígido no espaço tridimensional tem seis DoFs, um manipulador normalmente deve possuir pelo menos seis DoFs independentes.

Assim, com base no objetivo do estudo da cinemática de robôs manipuladores e considerando que um manipulador pode ser analisado como uma cadeia serial de corpos rígidos, a representação da transformação de coordenadas (translação + rotação) entre dois corpos rígidos i e $i + 1$ pode ser realizada por meio de Matriz de Transformação Homogênea (MTH), conforme apresentado na Equação A.13. Vale lembrar que o sistema de coordenadas do corpo i é considerado fixo em relação ao sistema do corpo $i + 1$. Portanto, a transformação de coordenadas entre o efetuador e a base do manipulador é dada pela MTH $\mathbf{H}_E^B(\mathbf{q}_M)$, onde \mathbf{H}_E^B é uma função de \mathbf{q}_M , uma vez que ela é dependente das transformações intermediárias da cadeia. A Figura 13 apresenta a atribuição dos sistemas de coordenadas dos elos da cadeia serial, bem como suas transformações.

Utilizando a Equação A.14 para modelar a cinemática de um robô manipulador, é possível notar que a MTH está relacionada com $\Gamma(\cdot)$, uma vez que ambos são funções do

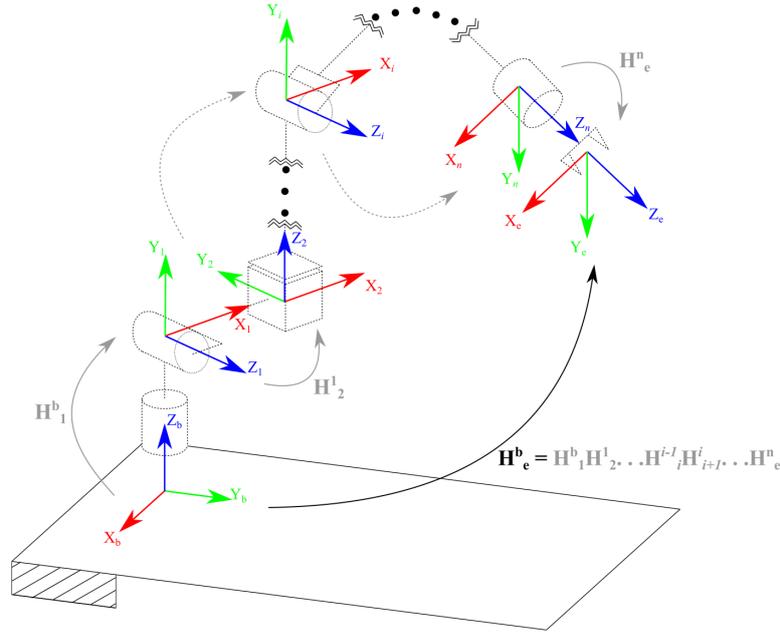


Figura 13 – Representação das transformações de coordenadas em um robô manipulador.

vetor de configuração de corpos rígidos. Porém, ainda é necessário destacar \mathbf{T}_{kin} . O \mathbf{T}_{kin} pode ser representado por meio de convenções que fornecem um procedimento sistemático para realizar esta análise, como a convenção de Denavit-Haterberg (DH) mostrada no Apêndice B.

Posto isso, a posição do efetuador com respeito à base do manipulador pode ser dada pelo vetor \mathbf{p}_E^B e sua orientação pela matriz de rotação \mathbf{R}_E^B , componentes da MTH \mathbf{H}_E^B . A matriz de rotação \mathbf{R}_E^B pode ser decomposta em matrizes de rotação elementares conforme mostrado na Equação A.4, assim, a *pose* do efetuador pode ser dada pela representação mínima:

$$\chi_E^B = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_E^B \\ \varphi_E^B \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

onde $\varphi_E^B = [\phi_E^B \ \theta_E^B \ \psi_E^B]^T$ é o vetor de orientação do efetuador apresentado pela representação mínima por ângulos *Roll*, *Pitch* e *Yaw* (RPY), calculado conforme a Equação A.6 ou A.7.

A cinemática diferencial, por sua vez, fornece a relação entre a velocidade das juntas e a velocidade linear e angular do efetuador do manipulador, conforme mostrado na Equação A.15. Este mapeamento é descrito pela Jacobiana geométrica, que depende da configuração do manipulador. O objetivo expressar as velocidades linear \mathbf{v}_E^B e angular ω_E^B do efetuador em função da velocidade das juntas $\dot{\mathbf{q}}_M$. Esta relação pode ser dada por

meio das Equações 3.16 e 3.17:

$$\mathbf{v}_E^B = \mathbf{J}_P(\mathbf{q}_M)\dot{\mathbf{q}}_M, \quad (3.16)$$

$$\boldsymbol{\omega}_E^B = \mathbf{J}_O(\mathbf{q}_M)\dot{\mathbf{q}}_M. \quad (3.17)$$

Na Equação 3.16, $\mathbf{J}_P \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ é a matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades das juntas $\dot{\mathbf{q}}_M$ para a velocidade linear do efetuador \mathbf{v}_E^B , enquanto que, na Equação 3.17, $\mathbf{J}_O \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ é a matriz Jacobiana que relaciona a contribuição das velocidades das juntas $\dot{\mathbf{q}}_M$ à velocidade angular do efetuador $\boldsymbol{\omega}_E^B$. Na forma compacta, as Equações 3.16 e 3.17 podem ser escritas como:

$$\mathbf{V}_E^B = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_E^B \\ \boldsymbol{\omega}_E^B \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{gM}(\mathbf{q}_M)\dot{\mathbf{q}}_M, \quad (3.18)$$

que representa a equação da cinemática diferencial do manipulador. A matriz $\mathbf{J}_{gM} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ é a Jacobiana geométrica do manipulador:

$$\mathbf{J}_{gM} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_P \\ \mathbf{J}_O \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

que no geral depende da configuração e n corresponde ao número de DoFs do manipulador. A matriz Jacobiana da Equação 3.19 pode ainda ser dividida nos n vetores coluna de dimensão 3×1 , \mathbf{J}_P e \mathbf{J}_O como:

$$\mathbf{J}_{gM} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P_1} & \mathbf{J}_{P_2} & \cdots & \mathbf{J}_{P_i} & \cdots & \mathbf{J}_{P_n} \\ \mathbf{J}_{O_1} & \mathbf{J}_{O_2} & \cdots & \mathbf{J}_{O_i} & \cdots & \mathbf{J}_{O_n} \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

onde

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P_i} \\ \mathbf{J}_{O_i} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i-1}^B \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix}, & \text{se a junta for prismática} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i-1}^B \times (\mathbf{p}_E^B - \mathbf{p}_{i-1}^B) \\ \mathbf{z}_{i-1}^B \end{bmatrix}, & \text{se a junta for de revolução} \end{cases}, \quad (3.21)$$

onde \mathbf{p}_{i-1}^B é a posição do sistema de coordenadas da junta $i - 1$ em relação ao sistema da base do manipulador, e \mathbf{z}_{i-1}^B é calculado por:

$$\mathbf{z}_{i-1}^B = \mathbf{R}_1^B(q_1) \cdots \mathbf{R}_{i-1}^{i-2}(q_{i-1})\mathbf{z}_B, \quad (3.22)$$

onde $\mathbf{z}_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$, e $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Alternativamente, se a *pose* do efetuador é expressa por uma representação mínima, como na Equação A.11, a cinemática diferencial é calculada utilizando a Jacobiana analítica \mathbf{J}_{aM} . Nesse caso, a equação cinemática diferencial pode ser obtida por meio da derivada em função do tempo da cinemática direta (Equação 3.15), ou seja,

$$\dot{\chi}_E^B = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_E^B \\ \dot{\varphi}_E^B \end{bmatrix} = \frac{\partial \chi_E^B}{\partial \mathbf{q}_M} \dot{\mathbf{q}}_M = \mathbf{J}_{aM}(\mathbf{q}_M) \dot{\mathbf{q}}_M. \quad (3.23)$$

A relação entre as velocidades angulares ω_E^B e a derivada dos ângulos de representação mínima $\dot{\varphi}_E^B$ é calculada utilizando a Jacobiana de representação $\mathbf{J}_{rM} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, em função dos ângulos RPY, tal que:

$$\dot{\varphi}_E^B = \mathbf{J}_{rM}(\varphi_E^B) \omega_E^B = \begin{bmatrix} \sin \phi_E^B \tan \theta_E^B & \cos \phi_E^B \tan \theta_E^B & 1 \\ \cos \phi_E^B & -\sin \phi_E^B & 0 \\ \sin \phi_E^B / \cos \theta_E^B & \cos \phi_E^B / \cos \theta_E^B & 0 \end{bmatrix} \omega_E^B. \quad (3.24)$$

Mais uma vez, é possível observar na Equação 3.24 a singularidade da Jacobiana de representação, em função dos ângulos RPY, quando $\cos \theta_E^B = 0$.

Considerando ainda que $\mathbf{v}_E^B = \dot{\mathbf{p}}_E^B$, a cinemática diferencial obtida pela derivada da Equação 3.15 é definida como:

$$\dot{\chi}_E^B = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_E^B \\ \dot{\varphi}_E^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{J}_{rM}(\varphi_E^B) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_E^B \\ \omega_E^B \end{bmatrix} = \mathbf{T}_r(\mathbf{p}_E^B) \mathbf{V}_E^B, \quad (3.25)$$

$$\dot{\chi}_E^B = \mathbf{T}_r(\mathbf{p}_E^B) \mathbf{J}_{gM}(\mathbf{q}_M) \dot{\mathbf{q}}_M,$$

onde a matriz $\mathbf{T}_r \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ representa o mapeamento entre as Jacobianas analítica \mathbf{J}_{aM} e geométrica \mathbf{J}_{gM} conforme a Equação 3.26:

$$\mathbf{J}_{aM}(\mathbf{q}_M) = \mathbf{T}_r(\mathbf{p}_E^B) \mathbf{J}_{gM}(\mathbf{q}_M). \quad (3.26)$$

A disponibilidade do modelo cinemático diferencial de um robô manipulador também é útil para determinar a relação entre as forças e torques aplicados às juntas e as forças e torques aplicados ao efetuador em configurações de equilíbrio estático. Considere que $\mathbf{F}_E = \begin{bmatrix} f_{E,x} & f_{E,y} & f_{E,z} & \tau_{E,x} & \tau_{E,y} & \tau_{E,z} \end{bmatrix}^T$ representa o vetor de forças e torques aplicados ao efetuador, expresso no sistema de coordenadas do efetuador. Assim, $f_{E,x}$, $f_{E,y}$, $f_{E,z}$ são as componentes da força e $\tau_{E,x}$, $\tau_{E,y}$, $\tau_{E,z}$ são as componentes do torque aplicados

no efetuador. Considerando $\boldsymbol{\tau}_M$ como o vetor de torques generalizados resultantes nas juntas, pelo princípio do trabalho virtual é possível expressar a relação da Equação 3.27:

$$\boldsymbol{\tau}_M = \mathbf{J}_{\text{gm}}(\mathbf{q}_M)^T \mathbf{F}_E. \quad (3.27)$$

Os torque resultantes na Equação 3.27 são causados pelas forças \mathbf{F}_E e também pelos efeitos da gravidade nos elos do manipulador. Contudo, como as forças generalizadas são muito maiores que os efeitos da gravidade, estes são desconsiderados na modelagem cinemática da plataforma robótica utilizada nesta dissertação.

3.2 Controle Cinemático de Robôs Manipuladores

A estratégia de controle cinemático pode ser aplicada quando os efeitos da dinâmica do manipulador são desprezíveis, seja por implicações físicas, seja pela complexidade da tarefa de controle. Algumas circunstâncias que possibilitam o controle cinemático são: se as juntas, acionadas por servomotores, apresentarem elevados fatores de redução nas engrenagens; se a tarefa puder ser executada a baixas velocidades; se existir uma malha de controle de velocidade de alto desempenho em cada junta. A maioria dos robôs manipuladores permite leitura de comandos de posição e velocidade das juntas, e, portanto, possui uma malha de controle de velocidade em nível de juntas como apresentado na Figura 14.

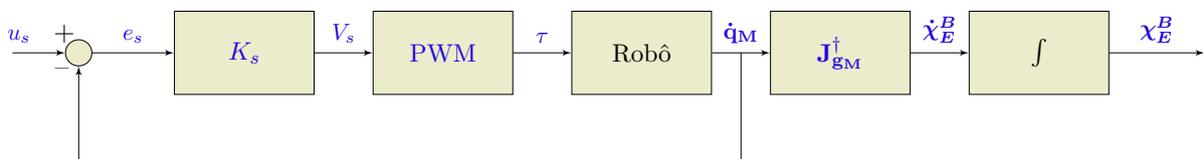


Figura 14 – Diagrama de controle de velocidade a nível de juntas.

Logo, para um controle cinemático de alto ganho de um robô manipulador, o sinal de controle pode ser dado por:

$$\mathbf{u}_M \approx \dot{\mathbf{q}}_M. \quad (3.28)$$

Portanto é possível implementar o controle cinemático de seguimento de trajetória segundo o diagrama da Figura 15, lembrando que $\Gamma(\cdot)$ denota a cinemática direta do manipulador.

Sendo $\boldsymbol{\chi}_E^B \in \mathbb{R}^6$ a representação da *pose* do efetuador do manipulador com respeito à base conforme Equação A.11, e $\boldsymbol{\chi}_d$ o valor desejado nessa representação, o erro no espaço de trabalho pode ser descrito conforme a Equação 3.29:

$$\tilde{\boldsymbol{\chi}}_M = \boldsymbol{\chi}_d - \boldsymbol{\chi}_E^B. \quad (3.29)$$

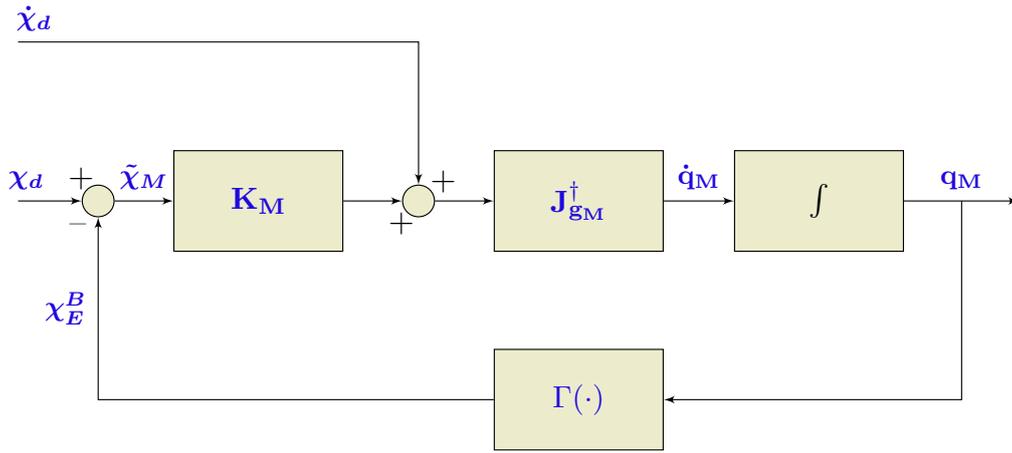


Figura 15 – Diagrama de controle cinemático proporcional com ação *feedforward*.

Derivando a Equação 3.29 em relação ao tempo

$$\dot{\tilde{\chi}}_M = \dot{\chi}_d - \dot{\chi}_E^B, \quad (3.30)$$

é possível escrever a derivada do erro a partir da Equação 3.18, como:

$$\dot{\tilde{\chi}}_M = \dot{\chi}_d - \mathbf{J}_{gM}(\mathbf{q}_M)\dot{\mathbf{q}}_M. \quad (3.31)$$

Sendo $\chi_d(t)$ a trajetória desejada, o objetivo é que χ_E^B atinja $\chi_d(t)$ em $t \rightarrow \infty$. A entrada de controle para o sistema é um valor de $\mathbf{u}_M = \dot{\mathbf{q}}_M$, logo, assumindo que $\mathbf{J}_{gM}(\mathbf{q}_M)$ é não singular, a lei de controle da Equação 3.32 pode ser escolhida.

$$\mathbf{u}_M = \mathbf{J}_{gM}^\dagger(\mathbf{q}_M)\bar{\mathbf{u}}_M, \quad (3.32)$$

onde $\mathbf{J}_{gM}^\dagger \in \mathbb{R}^{n \times m}$ é a pseudo-inversa de Moore-Penrose da matriz Jacobiana do manipulador dada por:

$$\mathbf{J}_{gM}^\dagger = \mathbf{J}_{gM}^T (\mathbf{J}_{gM} \mathbf{J}_{gM}^T)^{-1}, \quad (3.33)$$

em que n é a quantidade de DoFs necessários para realizar a tarefa e m é a quantidade disponível. Quando $m = n$, o robô é considerado atuado e a pseudo-inversa de Moore-Penrose da matriz Jacobiana é um caso particular em que $\mathbf{J}_{gM}^\dagger = \mathbf{J}_{gM}^{-1}$. Quando $m < n$, o robô é classificado como subatuado e a pseudo-inversa de Moore-Penrose da matriz Jacobiana é calculada à esquerda. Por fim, se $m > n$, o robô é dito redundante e a pseudo-inversa de Moore-Penrose da matriz Jacobiana é calculada à direita.

A Equação 3.32 leva ao sistema linear mostrado na Equação 3.34:

$$\dot{\tilde{\chi}}_M = \dot{\chi}_d - \bar{\mathbf{u}}_M. \quad (3.34)$$

Se $\bar{\mathbf{u}}_M$ for escolhido como

$$\bar{\mathbf{u}}_M = \dot{\chi}_d + \mathbf{K}_M(\chi_d - \chi_E^B), \quad (3.35)$$

em que $\dot{\chi}_d$ é considerada a ação *feedforward* do controle, a dinâmica para o erro pode ser escrita conforme apresentado na Equação 3.36:

$$\dot{\tilde{\chi}}_M + \mathbf{K}_M \tilde{\chi}_M = 0, \quad (3.36)$$

onde $\mathbf{K}_M = k_M \mathbf{I}_{n \times n}$. Se $k_M > 0$, o sistema é assintoticamente estável, com $\tilde{\chi}_M \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$, como mostrado na Equação 3.37:

$$\tilde{\chi}_M(t) = e^{-k_M t} \tilde{\chi}_M(0). \quad (3.37)$$

Por fim, considerando agora um controle cinemático em que objetivo é a regulação da *pose* atual do efetuador para uma configuração final desejada, ou seja, a *pose* não varia ao longo do tempo. Isso implica que $\chi_d = \text{const}$ e, conseqüentemente, $\dot{\chi}_d = \mathbf{0}$, portanto a Equação 3.30 pode ser reescrita como

$$\dot{\tilde{\chi}}_M = -\dot{\chi}_E^B. \quad (3.38)$$

A lei que lineariza o sistema se mantém conforme a Equação 3.32, porém o sistema linear é dado agora simplesmente por $\dot{\tilde{\chi}}_M = -\bar{\mathbf{u}}_M$, em que $\bar{\mathbf{u}}_M$ pode ser dado pela Equação 3.39:

$$\bar{\mathbf{u}}_M = \mathbf{K}_M(\chi_d - \chi_E^B). \quad (3.39)$$

A dinâmica do erro e a prova de estabilidade também se mantém conforme as Equações 3.36 e 3.37. O diagrama de controle cinemático com objetivo de regulação de *pose* é apresentado na Figura 16.

3.3 Sistemas Hápticos

Uma interface háptica é diferente de outros equipamentos de realimentação porque é bidirecional, sendo capaz de ler e gerar entradas de e para o usuário. Devido à

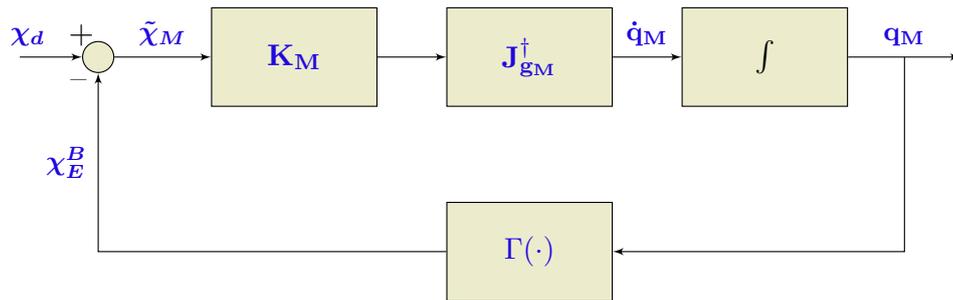


Figura 16 – Diagrama de controle cinemático proporcional de regulação.

interação humana e à bidirecionalidade, é difícil avaliar e comparar diferentes interfaces hápticas. Hayward e Astley (1996) propuseram um conjunto de requisitos e diretrizes para as medições de desempenho desses dispositivos. Entre eles, os mais relevantes são:

- **Especificações físicas do dispositivo:** Medidas de peso, ruído acústico e volume podem geralmente excluir alguns projetos de certas aplicações antes mesmo dos índices de desempenho serem considerados.
- **Bi-direcionalidade:** A realimentação háptica se associa a duas funções cognitivas: o sentido tátil, que dá consciência aos estímulos na superfície do objeto, e o sentido cinestésico, que fornece informações sobre a localização e o movimento do corpo. A bidirecionalidade é a característica mais proeminente do canal háptico;
- **Graus de liberdade:** Uma característica marcante de um dispositivo háptico é o número e a natureza dos DoFs na extremidade ativa e/ou nas extremidades;
- **Classificação ampla do dispositivo:**
 - **Dispositivos subatuados:** Um dispositivo com poucos DoFs não consegue emular literalmente qualquer tarefa, mas pode ser suficiente para operações específicas. Um exemplo dessa ideia é o dispositivo *Phantom*, que pode exercer forças no ponto de pega (dedos/mão) do operador em três dimensões, mas não se destina a exercer qualquer torque;
 - **Dispositivos atuados:** Um dispositivo com a quantidade necessária de DoFs para realizar a tarefa, recria-a em sua forma integral, simulando todos os movimentos da parte do corpo em questão;
 - **Dispositivos redundantes:** um dispositivo redundante é uma combinação de interfaces atuadas. Um exemplo é uma combinação de movimentos da mão, braço, ombro e tronco;
- **Interface dos dispositivos mestre e escravo:** Existem três possibilidades para uma interface de dispositivos mestre e escravo: ou a mão segura o dispositivo, ou

o dispositivo está preso ao corpo, ou então a interação é unilateral. É importante especificar qual DoF mecânico é ativo e qual é passivo, e para cada DoF, qual é a interface dentre as três supracitadas;

- **Faixa de movimento:** A faixa de movimento é usada para descrever o volume operacional de um dispositivo háptico. Devido à grande variação nos DoFs de diferentes dispositivos, uma descrição completa da amplitude de movimento pode se tornar muito complexa, devido à possível falta de invariância e acoplamentos;
- **Força de pico:** A força de pico mede a força aplicada às partes do corpo que a interface direciona a realimentação háptica;
- **Aceleração de pico:** Contatos e impactos são caracterizados por mudanças rápidas na velocidade, então há a necessidade de uma aceleração alta e uniforme. A medição da aceleração de pico é relativamente simples, dado o avanço nas unidades de medida inerciais;
- **Resolução:** A resolução do sistema representa o menor desvio do equilíbrio mecânico do sistema que pode ser detectado pelos sensores em estudo. Quando o dispositivo háptico está sob controle do computador, a resolução pode ser limitada pelo conversor analógico-digital.
- **Precisão:** A precisão de um dispositivo pode ser medida como a diferença entre a referência e o resultado alcançado. Na interface háptica, a precisão espacial pode ser medida com a diferença entre a coordenada de referência e o centro da curva de distribuição das coordenadas reais do ponto final do efetuator do dispositivo. Além disso, é a precisão que define o limiar aceitável do erro, ou seja, o erro que causa distorção ao aplicar alguma força em algum ponto.

Na teleoperação, é comum modelar o sistema háptico local idealmente como um bastão sem massa, infinitamente rígido, usado como ferramenta para trabalhar remotamente, conforme representado na Figura 17. Assim, uma vez que o bastão não tem massa, em todos os momentos, a relação $f_a = -f_h$ é satisfeita, então o operador sente o objeto sendo tocado à distância como se o bastão não existisse. A ideia da realimentação de força na realidade virtual é substituir o objeto real e o bastão imaginário por um sistema de sensores e atuadores que podem ser conectados a um computador, para leitura das medições dos sensores e envio de comandos aos atuadores. Ao medir o deslocamento, d_a , da ferramenta após o primeiro instante de contato com o objeto, conforme determinado pela detecção de colisão, e se um motor for usado para fornecer uma força, f_a , então, teoricamente, o operador deve ter uma experiência perceptiva idêntica à de tocar um objeto real.

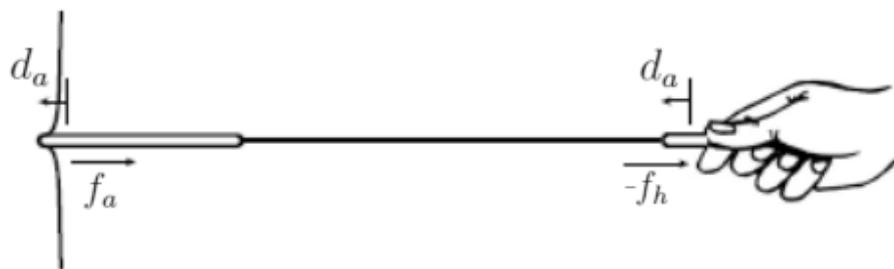


Figura 17 – Abstração do sistema háptico. Uma ferramenta com uma dada geometria em contato com um objeto é operada à distância por meio da construção imaginária de um bastão sem massa e infinitamente rígido. Isso seria equivalente a segurar a ferramenta diretamente (Adaptado de (Hayward e MacLean, 2007)).

Claramente, essa representação ideal é extremamente difícil de alcançar para a maioria das superfícies e ferramentas. Para uma superfície de qualquer rigidez, a resposta $f_a(d_a)$ é abrupta: os deslocamentos são muito pequenos e as forças muito altas. Além disso, estudos mostram que os humanos não confiam apenas na rigidez para julgar e experimentar objetos. Outras informações incluem a capacidade de resistir a forças amplas, transientes de alta aceleração, resposta estrutural, acentuação da taxa de variação da força e choque. Estas referências juntamente com informações de áudio ou visuais especificamente projetadas são responsáveis pela capacidade dos dispositivos de realimentação de força de transmitir a sensação de superfícies relativamente rígidas. No nível mais básico, as interfaces de realimentação de força devem contar com processos perceptivos para produzir sensações realistas.

Em uma interface háptica de teleoperação, para criar a sensação de tocar um objeto remoto, a superfície física idealizada da Figura 17 agora é substituída pelo sistema representado na parte esquerda da Figura 18.

Outro aspecto importante na modelagem de sistemas hápticos é a causalidade. Neste contexto, surge a necessidade de definir os termos impedância e admitância. Mecanicamente, um objeto é considerado de alta impedância caso ele seja difícil de se mover ou deformar (pesado ou duro). Em contrapartida, a admitância é a capacidade que um objeto tem de mover ou deformar, por isso, é mais comumente chamada de mobilidade. Simbolicamente, a impedância mecânica de um sistema é a relação entre a força (ou torque) produzida em sua interface com o ambiente, decorrente de uma velocidade (ou velocidade angular) imposta no sistema, na mesma interface. Enquanto que a admitância mecânica é a relação entre a velocidade (ou velocidade angular) produzida na interface com o ambiente, decorrente de uma força (ou torque) imposta na mesma interface. Estas são as duas abordagens mais comuns para modelagem de sistemas hápticos.

A abstração mais simples e intuitiva é modelar os elementos de um sistema de realimentação de força como blocos com dois terminais. A causalidade assumida é indicada

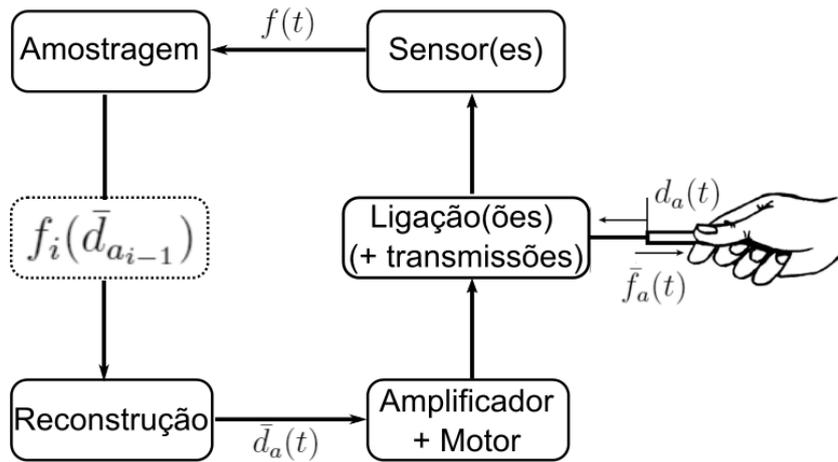
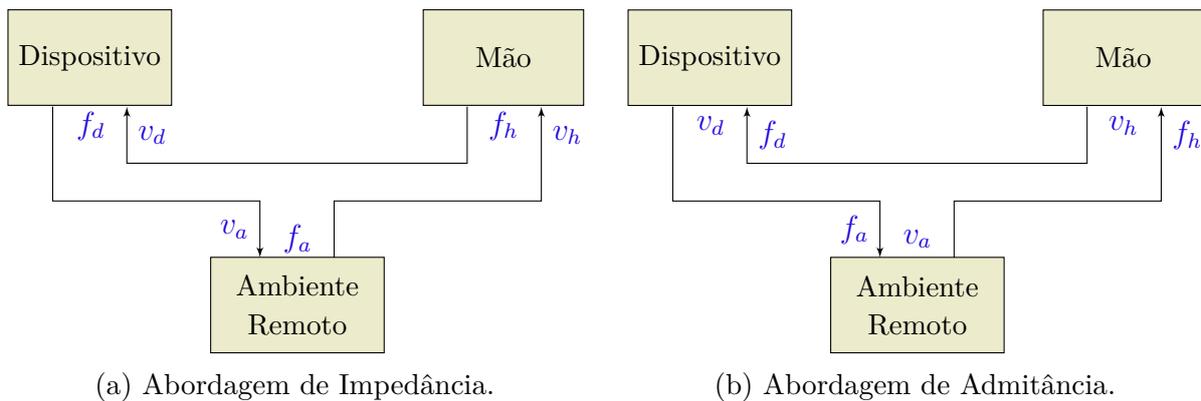


Figura 18 – Diagrama de blocos de alto nível de uma interface háptica. A caixa em linha pontilhada representa cálculos feitos em um computador. Se o dispositivo tiver vários graus de liberdade, a etapa $f_i(\bar{d}_{a_{i-1}})$ inclui pelo menos cinco sub-etapas: converter leituras brutas do sensor em unidades significativas, mudança de coordenadas para mapear as leituras do sensor em coordenadas nas quais o ambiente remoto é representado, mapear as forças do ambiente remoto em torques do motor e mapear os torques em comandos brutos do atuador. (Adaptado de (Hayward e MacLean, 2007)).



(a) Abordagem de Impedância.

(b) Abordagem de Admitância.

Figura 19 – Circuitos (Diagramas) mecânicos abstratos.

por uma seta que mostra qual sinal flui e qual aparece nos terminais. Em seguida, as leis de conservação de Kirchhoff podem ser aplicadas (Hayward e MacLean, 2007). A Figura 19 apresenta esta modelagem para as abordagens de impedância e de admitância, respectivamente.

Na abordagem de impedância, os elementos do circuito respondem por uma força através dos terminais. Uma equação de equilíbrio de força corresponde a um sistema realimentado, $f_h + f_d + f_a = 0$, e acoplamento mecânico à velocidade comum $v_h = v_d = v_a$. O ambiente remoto então definido especifica as forças que devem ser geradas pelos motores do dispositivo. Com esta abordagem, os usuários sentem as forças combinadas da dinâmica e da estática do dispositivo e do ambiente simulado em resposta ao deslocamento medido do dispositivo. Se o ambiente remoto tiver impedância zero, o usuário sentirá a massa e

a fricção do próprio dispositivo, mas seu movimento não terá resistência. Por outro lado, impedir que o usuário se mova corresponde a uma realimentação de alto ganho: o ambiente remoto responde a pequenos deslocamentos e pequenas velocidades com grandes forças. Do ponto de vista da háptica sob controle de impedância, um dispositivo ideal tem uma impedância mecânica inata baixa e uma grande faixa dinâmica, pois isso permite que o ambiente remoto sozinho determine a impedância.

Na abordagem de admitância, os elementos respondem por um deslocamento entre os terminais. A mão do operador aplica uma força no dispositivo que é medida e fornecida ao ambiente remoto, $f_h = f_d = f_a$. Os elementos são acoplados de modo que as velocidades somam zero, ou seja, $v_h + v_d + v_a = 0$. O dispositivo é controlado internamente para rastrear os deslocamentos do ambiente remoto e, portanto, deve ter sensores de deslocamento para rastreamento de posição. Os usuários sentem os deslocamentos do dispositivo e, portanto, do ambiente remoto. Se o ambiente remoto tem admitância zero, o usuário sente algo que não se move. Para se mover livremente, é necessário uma realimentação de alto ganho, ou seja, o dispositivo deve ser capaz de alta aceleração em resposta a pequenas forças medidas do usuário. Um dispositivo háptico ideal sob controle de admitância tem baixa admitância.

Existem muitos paralelos e contrastes interessantes que podem ser traçados entre essas duas abordagens. Cada método tem seus pontos fortes e fracos. Em cada caso, surgem dificuldades quando as causalidades presumidas são violadas na prática. Na Figura 19, é possível ver que a dinâmica e a estática do dispositivo físico representam o “erro” da simulação – ou seja, a diferença entre o comportamento modelado virtualmente e o real. No caso de simulações do tipo impedância, esse erro é a dinâmica do dispositivo em malha aberta que normalmente não é corrigido. Para ensaios do tipo admitância, o dispositivo deve ser executado em sistema realimentado (ou seja, ele depende do deslocamento detectado para rastrear o ambiente remoto), de modo que sua dinâmica não ideal inclui ainda a de um algoritmo de controle. Portanto, em ambos os casos, mas por razões completamente diferentes, o projeto eletromecânico destes sistemas é crítico.

A abordagem de impedância é utilizada no dispositivo háptico comercial que compõe o arcabouço de teleoperação do projeto. Dentre os motivos consideráveis de sua escolha, é possível destacar que o projeto e comissionamento de *hardware* é mais simples, e isso geralmente também é verdadeiro para o projeto e comissionamento de *software*, além desta formulação ser inerentemente mais apropriada quando o movimento desimpedido no espaço livre é um aspecto importante da execução da tarefa.

Capítulo 4

Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia para modelagem e controle da plataforma robótica utilizada no arcabouço de teleoperação. Além disso, as técnicas de realimentação de força implementadas como módulo auxiliar do arcabouço são mostradas neste capítulo. Por fim, uma descrição sobre a ferramenta de análise de carga de trabalho [NASA-TLX](#) é realizada.

Cabe destacar que as metodologias e estratégias para a teleoperação de uma escavadeira utilizando um dispositivo háptico foram propostas com base em algumas premissas, e também diretrizes do projeto de *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*, incluindo:

- Não são consideradas latências de conexão na comunicação entre ambiente local e remoto;
- Há apenas um dispositivo háptico disponível no ambiente local, utilizado para controlar o braço manipulador da escavadeira e prover realimentação de força ao operador;
- O dispositivo háptico tem apenas três juntas atuadas para realimentação de forças em [3D](#);
- A *posição* da caçamba, da base móvel e dos locais de escavação e de depósito são conhecidos a todo momento.

4.1 Modelagem da Escavadeira e do Dispositivo de Comando

Uma escavadeira é comumente composta das seguintes partes, conforme ilustrado na Figura [20](#): 1) base ou trem de pouso; 2) estrutura superior (incluindo a cabine); e 3)

braço manipulador fixado na região frontal. O braço é considerado uma entidade separada que contém a lança de profundidade (*boom*), a lança de levante (*stick*) e a caçamba (*bucket*) (Chacko et al., 2014). Uma abordagem direta para modelar a escavadeira consiste em assumir a base móvel como um SSMR e o braço como duas plataformas independentes. Este pode ser modelado como um manipulador planar de três graus de liberdade com juntas de revolução $\mathbf{q}_m = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$, enquanto a base móvel permite rotação e translação durante a operação da escavadeira. A seguir, é descrito o modelo cinemático diferencial das plataformas, e também do dispositivo háptico empregado.

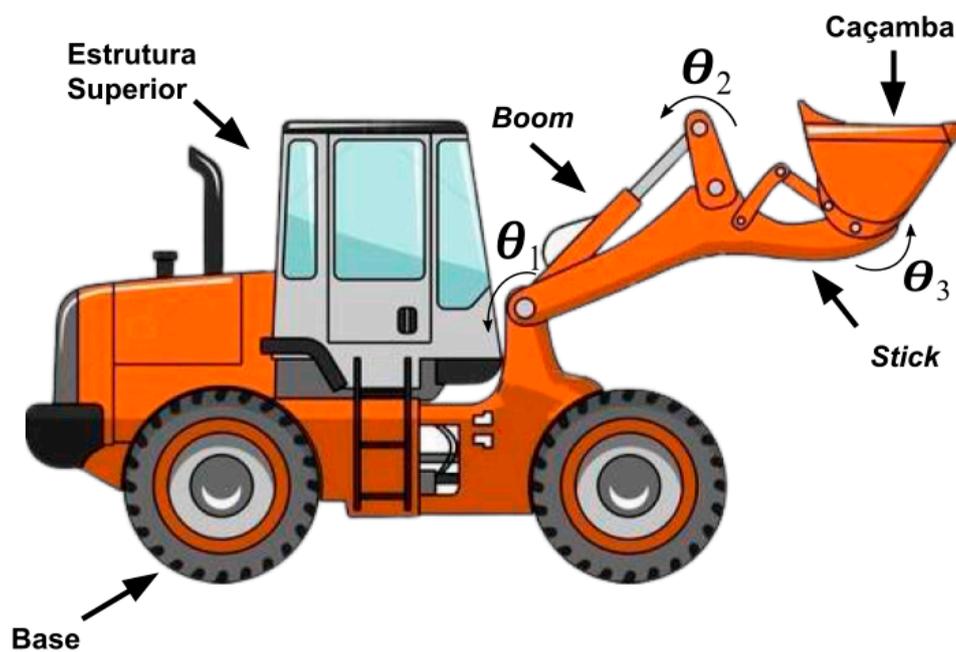


Figura 20 – Ilustração de uma escavadeira com suas partes discriminadas: base móvel e braço manipulador.

4.1.1 Modelagem da Base Móvel

Muitos equipamentos móveis empregados na mineração adotam um par de esteiras acopladas a motores de indução de rotor enrolado equipado com resistência, que fornecem alto torque de partida. Para a realização de curvas, geralmente é aplicado o freio mecânico em um motor, enquanto o outro acionamento é executado em velocidade constante. Em máquinas mais antigas com este tipo de deslocamento, o veículo possui raio mínimo de curvatura, já que existe apenas uma diferença de velocidade fixa entre os dois acionamentos. Em modelos comerciais mais recentes, já é possível que a máquina realize uma rotação em torno de seu próprio eixo.

Assim, a base de uma escavadeira geralmente é construída com base no modelo SSMR. Esse tipo de construção é utilizado também em outras aplicações práticas, como por exemplo, em veículos de arado de neve, canhão automotor, etc. Dentre as diversas

características do modelo que motivam o seu uso é possível destacar a estrutura compacta, a durabilidade e a robustez.

Portanto, é possível utilizar a modelagem do SSMR como modelo cinemático da base da escavadeira descrita pela Equações 3.13 até 3.14.

4.1.2 Modelagem do Braço Manipulador

O braço fixado à base da escavadeira apresenta uma cadeia cinemática semelhante à de um robô manipulador planar de 3 DoFs, onde o *boom* corresponde ao primeiro elo, o *stick* ao segundo e a caçamba equivale ao efetuador, conforme ilustrado na Figura 21.

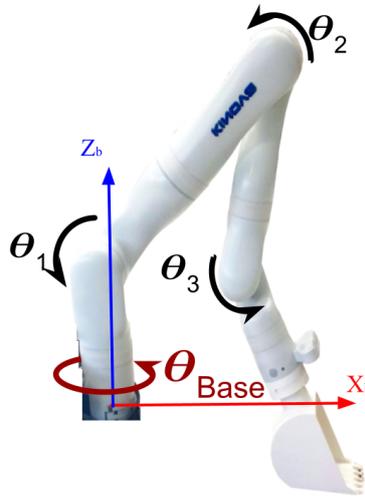


Figura 21 – Ilustração de um manipulador robótico com 3 juntas ativas representando um braço de escavadeira.

A primeira junta θ_{Base} não é atuada, sendo utilizada apenas para a medição de torques e estimação de forças de interação. As próximas juntas definem a configuração planar do manipulador, dada pelo vetor $\mathbf{q}_m = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$. Considerando o sistema de coordenadas da base do manipulador, os movimentos do braço são restritos ao plano $X_b Z_b$. Portanto, a *pose* do efetuador pode ser reescrita, devido às restrições de movimento, conforme a Equação 4.1:

$$\chi_e^b = \begin{bmatrix} p_{e,x}^b \\ p_{e,z}^b \\ \theta_e^b \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

onde $p_{e,x}^b$ e $p_{e,z}^b$ são os componentes X_b e Z_b da posição do efetuador com respeito ao sistema de coordenadas da base, e θ_e^b é o ângulo de rotação ao redor do eixo Y_b .

Com base no vetor de velocidades generalizadas $\dot{\mathbf{q}}_{\mathbf{m}} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$ e na Jacobiana do braço dada por:

$$\mathbf{J}_{\mathbf{g}\mathbf{m}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\mathbf{p}1} & \mathbf{J}_{\mathbf{p}2} & \mathbf{J}_{\mathbf{p}3} \\ \mathbf{J}_{\mathbf{o}1} & \mathbf{J}_{\mathbf{o}2} & \mathbf{J}_{\mathbf{o}3} \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

é possível calcular o modelo cinemático diferencial do manipulador planar utilizando:

$$\dot{\mathbf{x}}_e^b = \begin{bmatrix} \dot{p}_{e,x}^b \\ \dot{p}_{e,z}^b \\ \dot{\theta}_e^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\mathbf{p}1}(\mathbf{q}_{\mathbf{m}}) & \mathbf{J}_{\mathbf{p}2}(\mathbf{q}_{\mathbf{m}}) & \mathbf{J}_{\mathbf{p}3}(\mathbf{q}_{\mathbf{m}}) \\ \mathbf{J}_{\mathbf{o}1}(\mathbf{q}_{\mathbf{m}}) & \mathbf{J}_{\mathbf{o}2}(\mathbf{q}_{\mathbf{m}}) & \mathbf{J}_{\mathbf{o}3}(\mathbf{q}_{\mathbf{m}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

4.1.3 Modelagem do Dispositivo Háptico

O *joystick* háptico utilizado é um dispositivo com seis DoFs. Porém, apenas as três primeiras juntas são atuadas, o que permite aplicar forças em 3D na mão do usuário por meio do ponto de pega. Além da realimentação de força, o dispositivo é utilizado também no controle da manipulador que emula o braço de uma escavadeira.

Para manter a similaridade da cadeia cinemática do manipulador escravo, dois DoFs do dispositivo háptico são travados mecanicamente, possibilitando movimentação apenas nas juntas destacadas na Figura 22.

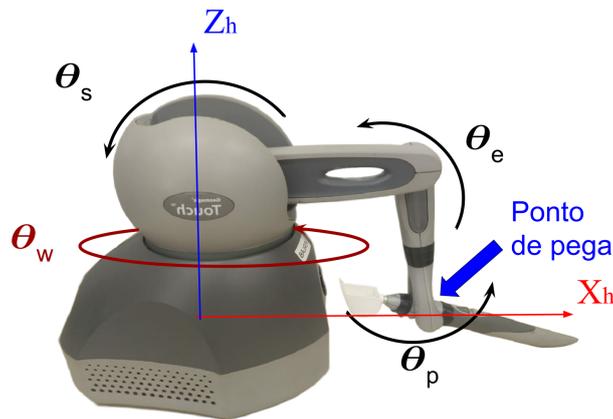


Figura 22 – Ilustração do dispositivo háptico com cadeia cinemática semelhante ao manipulador de 3 DoFs.

Assim como no modelo do manipulador planar, a primeira junta θ_w (*waist*) não é considerada na modelagem cinemática planar do dispositivo háptico; esta junta está associada ao comando de giro da base móvel. As próximas três juntas coplanares θ_s , θ_e , θ_p (*shoulder*, *elbow*, *pitch*) definem a configuração planar do *joystick*, dada pelo vetor $\mathbf{q}_{\mathbf{h}} = [\theta_s \ \theta_e \ \theta_p]^T$ utilizado no cálculo da sua cinemática direta.

Considerando o vetor de configurações do dispositivo háptico \mathbf{q}_h , os seus movimentos são restritos ao plano $X_h Z_h$. Assim, a *pose* da ponta da caneta, devido às restrições de movimento, pode ser escrita conforme a Equação 4.4:

$$\boldsymbol{\chi}_p^h = \begin{bmatrix} p_{p,x}^h \\ p_{p,z}^h \\ \theta_p^h \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

onde $p_{p,x}^h$ e $p_{p,z}^h$ são as componentes X_h e Z_h , respectivamente, da posição da ponta da caneta com respeito ao sistema de coordenadas da base do dispositivo, e θ_p^h é o ângulo de rotação ao redor do eixo Y_h .

Para o cálculo das forças de realimentação no plano $X_h Z_h$, como a junta θ_p não é atuada, a Jacobiana do dispositivo háptico é simplificada por:

$$\mathbf{J}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{p_1} & \mathbf{J}_{p_2} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

onde \mathbf{J}_{p_1} e \mathbf{J}_{p_2} relacionam as contribuições das velocidades da juntas θ_s e θ_e , respectivamente, para as velocidades lineares da ponta da caneta do dispositivo. Portanto, o modelo cinemático diferencial do dispositivo háptico, considerando velocidades lineares no plano $X_h Z_h$, é dado por:

$$\dot{\mathbf{p}}_f^h = \begin{bmatrix} \dot{p}_{f,x}^h \\ \dot{p}_{f,z}^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{p_1}(\mathbf{q}_h) & \mathbf{J}_{p_2}(\mathbf{q}_h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_s \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

onde $\dot{\mathbf{p}}_f^h = \begin{bmatrix} \dot{p}_{f,x}^h & \dot{p}_{f,z}^h \end{bmatrix}^T$ é o vetor de velocidades do sistema de coordenadas do ponto de pega do dispositivo háptico com relação ao sistema da base devido à realimentação de força 2D.

4.2 Controle da Escavadeira

Na teleoperação, o equipamento é teleoperado por meio de uma base de controle que envia comandos do operador para a ação do dispositivo. Portanto, é necessária a escolha adequada da estratégia de controle para que os comandos enviados por meio dos dispositivos locais tenham desempenho satisfatório nas ações dos dispositivos remotos. A seguir, é descrito o projeto de controle cinemático das plataformas.

4.2.1 Comandos da Base Móvel

Equipamentos de mineração com transporte sobre esteiras, geralmente, são controlados por meio de um *joystick* de dois eixos. Dessa forma, os comandos da base móvel

podem ser dados por meio de um *joystick* tradicional, definindo as velocidades lineares e angular de referência, tal como em uma operação real.

A relação entre as velocidades angulares das rodas direita ω_D e esquerda ω_E e as velocidades linear v_x^R e angular ω_z^R pode ser obtida utilizando o modelo cinemático diferencial do **SSMR**. O cálculo das velocidades das rodas em função dos comandos enviados pelo *joystick* é definido pela inversa da Equação 3.12, tal que:

$$\begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_E \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & \frac{a^2+b^2}{b} \\ 1 & -\frac{a^2+b^2}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^R \\ \omega_z^R \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

É possível perceber que quando a distância entre os eixos das rodas dianteiras e traseiras é zero, tal que $a = 0$, o modelo cinemático é equivalente ao do robô diferencial. Neste caso, as velocidades angulares das rodas direita ω_D e esquerda ω_E são obtidas pela inversa da Equação 3.4, tal que:

$$\begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_E \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & b \\ 1 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^R \\ \omega_z^R \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

4.2.2 Controle do Manipulador

O controle cinemático utilizado para comandar o manipulador necessita realizar operações que envolvem obter a inversa da matriz jacobiana, porém quando essa matriz não é quadrada, não é possível realizar a inversão. Se a matriz jacobiana possui posto pleno, a generalização da inversa de uma matriz não-quadrada é dada pela sua pseudo-inversa, o que não é satisfeito em configurações singulares. A matriz *Damped Least-Squares* (DLS) inversa proposta por Nakamura e Hanafusa (1986) é uma solução para lidar com essas singularidades, sendo definida como:

$$\text{DLS}(\mathbf{J}_{\mathbf{g}_m}) = \mathbf{J}_{\mathbf{g}_m}^T (\mathbf{J}_{\mathbf{g}_m} \mathbf{J}_{\mathbf{g}_m}^T + \lambda \mathbf{I}_{n \times n})^{-1}, \quad (4.9)$$

onde λ é um fator de amortecimento que leva a um melhor condicionamento da matriz do ponto de vista numérico, e $n = 3$ em $\mathbf{I}_{n \times n}$. O valor de λ é calculado como:

$$\lambda = \begin{cases} 0 & , \text{ se } w \geq w_0 \\ \lambda_0 \left(1 - \frac{w}{w_0}\right)^2 & , \text{ se } w < w_0 \end{cases}, \quad (4.10)$$

onde $w = \sqrt{\det(\mathbf{J}_{\mathbf{g}_m} \mathbf{J}_{\mathbf{g}_m}^T)}$ é o índice de manipulabilidade do sistema; λ_0 define o comportamento da solução na vizinhança de uma singularidade e w_0 define o limites desta vizinhança.

A lei de controle cinemático utilizada para calcular a *pose* desejada do manipulador é baseada na **MTH**. O objetivo do controle é tal que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{H}_e^b = \mathbf{H}_d, \quad (4.11)$$

onde \mathbf{H}_e^b é a **MTH** atual do manipulador e \mathbf{H}_d é a **MTH** desejada, ambas pertencentes ao $SE(2)$. Essas transformadas são compostas de matrizes de rotação \mathbf{R}_e^b e $\mathbf{R}_d \in SO(2)$, e vetores de translação bidimensional $\mathbf{p}_e^b = [p_{e,x}^b \ p_{e,z}^b]^T$ e $\mathbf{p}_d = [p_{d,x} \ p_{d,z}]^T$. Vale destacar que a rotação \mathbf{R}_d e posição \mathbf{p}_d desejadas são definidas pelo operador por meio do dispositivo háptico.

Inicialmente, é necessário definir os erros de posição e orientação, formalizados como:

$$\tilde{\chi}_{m_p} = \mathbf{p}_d - \mathbf{p}_e^b, \quad (4.12)$$

$$\tilde{\chi}_{m_o} = \theta_d - \theta_e^b, \quad (4.13)$$

onde $\theta_d = \theta_p^h$ e θ_e^b são os ângulos de rotação associados a \mathbf{R}_d e \mathbf{R}_e^b , respectivamente. Como o espaço de trabalho do dispositivo é geralmente diferente do espaço de trabalho do manipulador, a posição desejada \mathbf{p}_d não pode ser assumida como a posição atual do dispositivo mestre. Uma abordagem direta para definir esse mapeamento é aplicando um fator de escala entre a posição do *joystick* e a da plataforma remota. A posição desejada \mathbf{p}_d é reescrita como:

$$\mathbf{p}_d = \begin{bmatrix} s_x p_{p,x}^h & s_z p_{p,z}^h \end{bmatrix}^T, \quad (4.14)$$

onde $p_{p,x}^h$ e $p_{p,z}^h$ são as componentes X_h e Z_h da posição da ponta da caneta do dispositivo háptico, e s_x e s_z são fatores escalares para correlação entre os espaços de trabalho do *joystick* e do manipulador remoto.

A ação de controle é calculada por:

$$\mathbf{u}_m = \text{DLS}(\mathbf{J}_{g_m}) \mathbf{K}_M \begin{bmatrix} \tilde{\chi}_{m_p} \\ \tilde{\chi}_{m_o} \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

onde $\mathbf{K}_M \in \mathbb{R}^3$ é uma matriz definida positiva de ganho e \mathbf{J}_{g_m} é a jacobiana geométrica do manipulador planar de três **DoFs**. O vetor $\mathbf{u}_m \in \mathbb{R}^3$ define as entradas de controle do manipulador, que são as velocidades angulares de suas juntas. A $\text{DLS}(\mathbf{J}_{g_m})$ inversa é utilizada para mapear o espaço de trabalho no espaço de configurações. A Figura 23 ilustra o esquema da lei de controle.

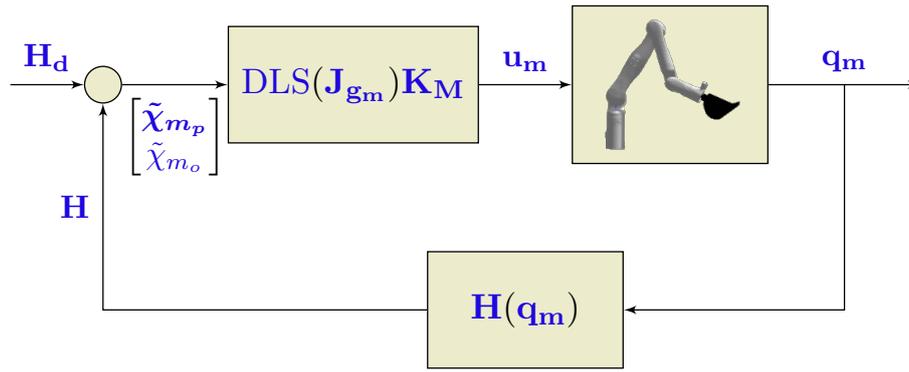


Figura 23 – Diagrama de controle cinemático.

4.3 Teleoperação Imersiva Utilizando Realimentação de Força

Esta seção descreve as metodologias aplicadas para implementação das técnicas de realimentação de força para compor um módulo do arcabouço computacional de teleoperação. A Seção 4.3.1 descreve uma estratégia de realimentação de força capaz de fornecer ao operador a sensação de interação com o ambiente remoto, assim, qualquer contato da plataforma robótica com objetos do ambiente é sentido pelo operador. A Seção 4.3.2 apresenta uma estratégia que atua como um sistema de direção assistida para o operador. Por meio de um campo potencial originado no local desejado, forças atrativas são geradas para guiar o operador ao local, mediante realimentação de força no dispositivo háptico. Por fim, a Seção 4.3.3 apresenta uma combinação das estratégias anteriores.

4.3.1 Realimentação de Força Devido às Forças Interativas

Nesta estratégia, uma interface háptica é utilizada para fornecer uma sensação de imersão convincente para o operador, localizado remotamente. As interações da caçamba da escavadeira com os objetos do ambiente são reproduzidas por meio da realimentação cinestésica de força. A Figura 24 apresenta esse esquema geral de realimentação.

Na falta de um sensor adequado, é possível estimar as forças e torques aplicados no efetuador com base nos torques resultantes nas juntas por meio de análise estática, de acordo com o princípio do trabalho virtual (Siciliano et al., 2010). Essas informações são calculadas pela inversa da Equação 3.27, utilizando a DLS para o caso de configurações singulares, tal que:

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\tau}_m &= \mathbf{J}_{g_m}^T \mathbf{f}_i \\
 \boldsymbol{\tau}_m^T &= \mathbf{f}_i^T \mathbf{J}_{g_m} \\
 \mathbf{f}_i^T \mathbf{J}_{g_m} \text{DLS}(\mathbf{J}_{g_m}) &= \boldsymbol{\tau}_m^T \text{DLS}(\mathbf{J}_{g_m}) \\
 \mathbf{f}_i^T &\approx \boldsymbol{\tau}_m^T \text{DLS}(\mathbf{J}_{g_m}), \tag{4.16}
 \end{aligned}$$

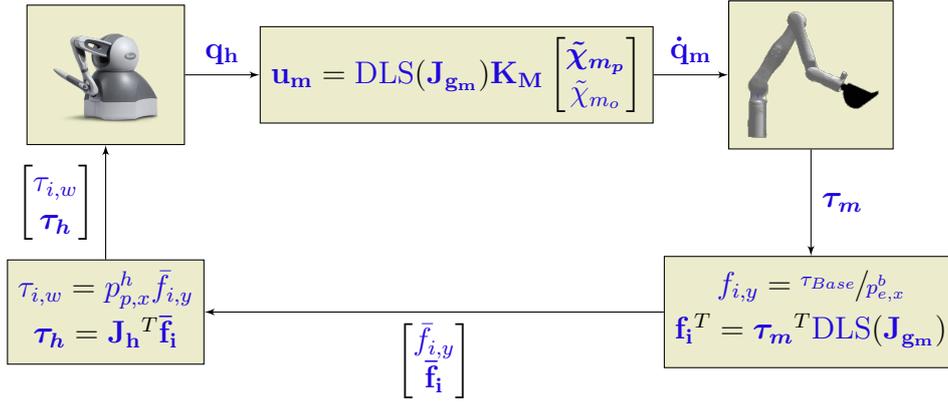


Figura 24 – Diagrama de realimentação de força de interação com o ambiente.

onde $\mathbf{f}_i = [f_{i,x} \ f_{i,z} \ \tau_{i,y}]^T$ é o vetor das forças e torque de interação aplicadas no plano $X_b Z_b$ do efetuador, e $\boldsymbol{\tau}_m = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ é o vetor de torques resultantes nas juntas do manipulador. Esta relação é válida apenas para o equilíbrio estático, mas apresenta uma boa aproximação quando a condição de equilíbrio não é satisfeita.

A Equação 4.16 estima as forças aplicadas ao efetuador do manipulador, que devem ser realimentadas para o operador por meio dos torques aplicados nas juntas da interface háptica, calculadas por:

$$\boldsymbol{\tau}_h = \mathbf{J}_h^T \bar{\mathbf{f}}_i, \quad (4.17)$$

onde $\bar{\mathbf{f}}_i = [\bar{f}_{i,x} \ \bar{f}_{i,z}]^T$ é o vetor de forças de interação normalizado de acordo com as limitações do *joystick*, $\boldsymbol{\tau}_h = [\tau_s \ \tau_e]^T$ é o vetor de torques resultantes aplicados às juntas θ_s e θ_e do dispositivo háptico (Figura 22), e \mathbf{J}_h é a matriz jacobiana do dispositivo háptico definida pela Equação 4.5. Considerando a configuração do dispositivo háptico, a Equação 4.17 possibilita a realimentação de força ao operador aplicando $\bar{\mathbf{f}}_i$ no ponto de pega do *joystick*.

Para emular a operação de uma escavadeira, os movimentos do braço manipulador foram restritos ao plano $X_b Z_b$. Apesar de só atuar nas juntas θ_1 , θ_2 e θ_3 do manipulador, os torques resultantes na junta θ_{Base} (Figura 21) são utilizados para calcular as forças laterais aplicadas na caçamba, tal que $f_{i,y} = \tau_{Base}/p_{e,x}^b$. Com base na força de interação lateral normalizada $\bar{f}_{i,y}$, é calculado o torque $\tau_{i,w}$ enviado para a junta θ_w do dispositivo háptico, tal que:

$$\tau_{i,w} = p_{p,x}^h \bar{f}_{i,y}. \quad (4.18)$$

4.3.2 Realimentação de Força para Direção Assistida

Para auxiliar a navegação da escavadeira teleoperada, é proposta a utilização de um campo potencial para gerar forças atrativas que conduzam a caçamba para posições desejadas. Estas forças atrativas são convertidas em torques aplicados nas juntas do dispositivo háptico, que por sua vez resultam em forças aplicadas no ponto de pega do *joystick* para guiar os movimentos do operador ao executar uma tarefa desejada, por exemplo, escavar em uma localização precisa. Esse modo de operação pode ser especialmente útil na mineração de precisão, onde o operador deve escavar uma sequência de locais predefinidos a fim de maximizar a produtividade (McAree et al., 2018).

Uma função potencial é uma função diferenciável com valor real $U : \mathbb{R}^n \rightarrow R$. O planejamento via potencial artificial considera a posição de um corpo \mathbf{p}_C^I , no caso a caçamba da escavadeira, que se move sob a influência de um campo potencial U , obtido como a sobreposição de um potencial atrativo associado à posição objetivo (\mathbf{p}_{goal}) e potenciais repulsivos associados a obstáculos. A estratégia adotada fornece um sistema assistivo de direção usando o potencial atrativo U_{att} , definido como:

$$U_{att}(\mathbf{p}_C^I) = \begin{cases} \frac{1}{2} \zeta \rho_f^2(\mathbf{p}_C^I), & \text{se } \rho_f(\mathbf{p}_C^I) \leq d_{th} \\ d_{th} \zeta \rho_f(\mathbf{p}_C^I) - \frac{1}{2} \zeta d_{th}^2, & \text{se } \rho_f(\mathbf{p}_C^I) > d_{th} \end{cases}, \quad (4.19)$$

onde $\rho_f(\mathbf{p}_C^I)$ é a norma de distância entre as posições do corpo e do objetivo, d_{th} é uma distância limiar do objetivo final que alterna entre os potenciais cônico e quadrático, e ζ corresponde a um ganho associado aos efeitos do potencial atrativo.

Em cada \mathbf{p}_C^I , a força artificial gerada pelo potencial é definida como o gradiente negativo $-\nabla U_{att}(\mathbf{p}_C^I)$ do potencial, que indica a direção do movimento local (Siciliano et al., 2010). O vetor de forças atrativas $\mathbf{f}_{att}(\mathbf{p}_C^I) = [f_{att,x}(\mathbf{p}_C^I) \ f_{att,y}(\mathbf{p}_C^I) \ f_{att,z}(\mathbf{p}_C^I)]^T$ pode ser calculado conforme a Equação 4.20:

$$\mathbf{f}_{att}(\mathbf{p}_C^I) = -\nabla U_{att}(\mathbf{p}_C^I) = \begin{cases} -\zeta(\mathbf{p}_C^I - \mathbf{p}_{goal}), & \text{se } \rho_f(\mathbf{p}_C^I) \leq d_{th} \\ \frac{-d_{th} \zeta(\mathbf{p}_C^I - \mathbf{p}_{goal})}{\rho_f(\mathbf{p}_C^I)}, & \text{se } \rho_f(\mathbf{p}_C^I) > d_{th} \end{cases}. \quad (4.20)$$

Devido à movimentação planar do manipulador, são consideradas apenas as forças atrativas com respeito aos eixos X_b e Z_b . Além disso, esse vetor também é normalizado de acordo com as limitações do dispositivo háptico, de forma que o vetor de forças atrativas normalizado é dado por $\bar{\mathbf{f}}_{att}(\mathbf{p}_C^I) = [\bar{f}_{att,x}(\mathbf{p}_C^I) \ \bar{f}_{att,z}(\mathbf{p}_C^I)]^T$. Um resumo do esquema pode ser representado pela Figura 25.

As forças atrativas $\bar{\mathbf{f}}_{att}$ são geradas no ponto de pega do *joystick* por meio dos torques $\boldsymbol{\tau}_h$ aplicados no dispositivo háptico, calculados com a Equação 4.21:

$$\boldsymbol{\tau}_h = \mathbf{J}_h^T \bar{\mathbf{f}}_{att}. \quad (4.21)$$

Apesar da atuação do manipulador no plano $X_b Z_b$, a estratégia de realimentação de força para direção assistida considera também a força atrativa $f_{att,y}$, nesse caso associada ao comando de orientação da base móvel. Para tal, é considerado o erro de alinhamento entre o eixo X_b do robô e a direção do local desejado, representado pelo ângulo θ_{ali} . Buscando uma atuação mais suave no dispositivo háptico, também foi adicionada uma componente de amortecimento proporcional à velocidade da junta $\dot{\theta}_w$, tal que:

$$f_{att,y} = k_P(\theta_{ali} - \theta_w) - k_D\dot{\theta}_w, \quad (4.22)$$

onde k_P e k_D são, respectivamente, ganhos proporcional e de amortecimento associados.

Desta forma, o torque $\tau_{att,w}$ aplicado na junta θ_w do *joystick* é calculado com base na força atrativa lateral normalizada $\bar{f}_{att,y}$, tal que:

$$\tau_{att,w} = p_{p,x}^h \bar{f}_{att,y}. \quad (4.23)$$

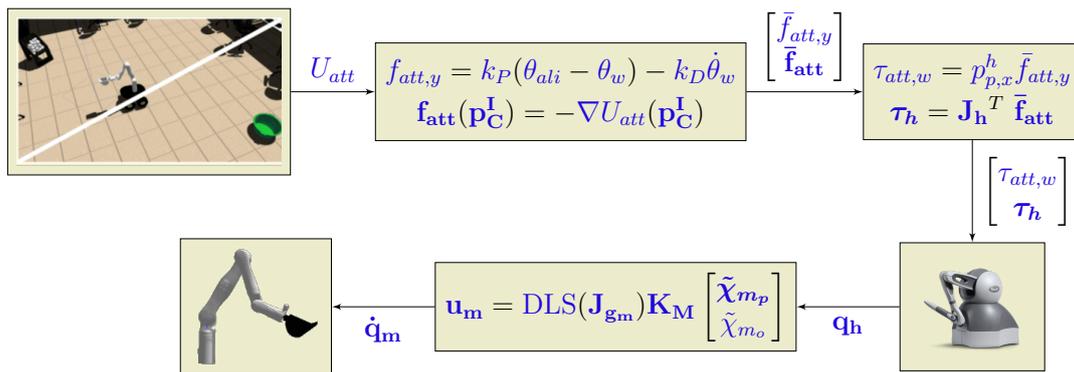


Figura 25 – Diagrama de realimentação de força atrativa do sistema de direção assistida.

Atualmente o campo potencial proposto para a direção assistida da escavadeira assume apenas forças atrativas. Trabalhos futuros deverão considerar também forças repulsivas, associadas a obstáculos presentes na área de trabalho. Para tal, pode ser necessário conhecer o mapa local e identificar obstáculos que representem risco de colisão.

4.3.3 Realimentação Combinando Forças Interativas e Forças de Direção Assistidas

Áreas de mineração geralmente correspondem a ambientes não estruturados e de rápida mudança. Além da realimentação visual, estratégias de realimentação de força podem também assistir o operador a reconhecer o ambiente de trabalho durante a realização remota das tarefas determinadas.

A realimentação de força vem sendo cada vez mais utilizada para implementar sistemas de navegação, inclusive auxiliando pessoas com deficiência visual, que geralmente

consideram a navegação um desafio. Nestes casos, a Organização Mundial da Saúde (OMS) define tais ferramentas como “tecnologias assistivas”. A OMS aponta ainda que os produtos de tecnologia assistiva mantêm ou melhoram o funcionamento e a independência de um indivíduo, nutrindo seu bem-estar.

Quando a realimentação visual é inadequada ou insuficiente para a realização remota das tarefas, diferentes combinações de estratégias de telepresença possibilitam aumentar o conforto do usuário nas interações homem-máquina. Assim, a realimentação produzida pode ser definida pelo usuário de acordo com as características momentâneas do ambiente (Kuriakose et al., 2020).

Em operações de mineração onde a visibilidade é comprometida devido a presença de partículas suspensas no ar, a combinação de técnicas de realimentação de força pode ser considerada equivalente a um sistema de navegação assistida para usuários com deficiência visual, que tem o potencial de descrever o ambiente de forma que os obstáculos possam ser evitados e de melhorar a acessibilidade à navegação, tornando-a uma atividade independente e segura.

A combinação de técnicas de realimentação de força permite ao operador priorizar determinadas entradas e/ou saídas do sistema conforme a execução remota da tarefa, além de melhorar a robustez do sistema. Assim, essa combinação permite maior acessibilidade e flexibilidade para o operador, que pode realizar tarefas de forma mais segura, confortável e produtiva.

Portanto, nesta estratégia, a realimentação de força definida para o operador por meio da interface háptica é dada pela combinação das forças de interação $\bar{\mathbf{f}}_i$ aplicadas ao manipulador com as forças atrativas $\bar{\mathbf{f}}_{att}$ de direção, conforme esquema mostrado na Figura 26. Assim, as estratégias combinadas resultam nas Equações 4.24 e 4.25:

$$\boldsymbol{\tau}_h = \mathbf{J}_h^T (\beta_i \bar{\mathbf{f}}_i + \beta_{att} \bar{\mathbf{f}}_{att}), \quad (4.24)$$

$$\tau_w = p_{p,x}^h (\beta_i \bar{f}_{i,y} + \beta_{att} \bar{f}_{att,y}), \quad (4.25)$$

onde β_i e β_{att} são ganhos utilizados para definir as contribuições individuais das forças de interação e de direção para guiar o operador. Deste modo, o ganho de ponderação da estratégia de forças de interação, β_i , é reduzido durante uma tarefa de escavação, buscando amenizar o desconforto gerado pela interação máquina-solo; além do mais, o ganho referente à estratégia de direção assistida, β_{att} , é nulo durante a carga e também a descarga do material nos locais de execução da tarefa.

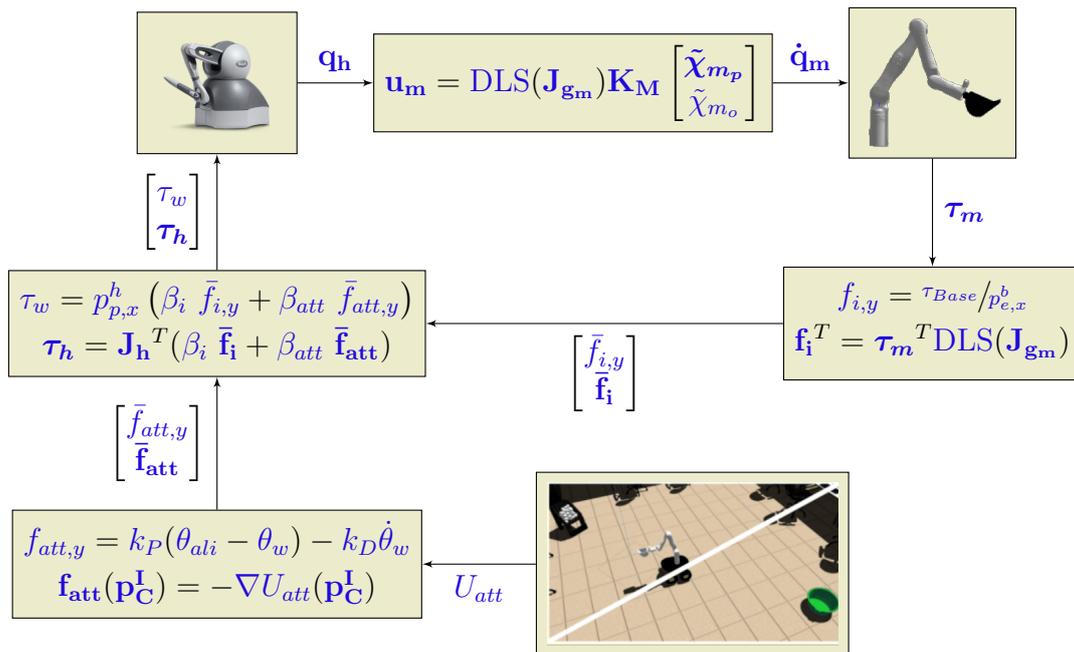


Figura 26 – Diagrama de realimentação de forças de interação com o ambiente combinadas com a força atrativa do sistema de direção assistida.

4.4 NASA Task Load Index (NASA-TLX)

O NASA-TLX¹ é um procedimento de escala multidimensional que fornece uma pontuação de carga de trabalho geral com base em uma média ponderada de classificações em seis subescalas apresentadas anteriormente, como descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Definições das 6 dimensões do NASA-TLX.

Dimensões	Definições
Mental	Quantidade de atividade mental e perceptiva que a tarefa requer (pensar, decidir, calcular, lembrar, procurar, etc.).
Física	Quantidade de atividade física que a tarefa requer (puxar, empurrar, girar, deslizar, etc.).
Temporal	Nível de pressão temporal sentido. Razão entre o tempo necessário e o tempo disponível.
Satisfação/performance	Quão satisfeito o indivíduo está com o nível de rendimento e desempenho no trabalho.
Esforço	Grau de esforço mental e físico que o indivíduo deve realizar para obter seu nível de desempenho.
Nível de Frustração	Até que ponto o sujeito se sente inseguro, estressado, irritado, descontente, etc., durante a realização da atividade.

Por meio da Tabela 1 é possível perceber que três dimensões dizem respeito às

¹ <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/>

demandas impostas ao voluntário (demandas mental, física e temporal) e três à interação dele com a tarefa (esforço, frustração e desempenho).

O procedimento é dividido em duas partes que consistem na definição de pesos e escalas. A primeira parte refere-se à investigação de quanto cada dimensão contribui para a carga de trabalho em uma tarefa específica. Esses pesos são responsáveis por duas fontes potenciais de variação nas análises dos avaliadores: diferenças na definição de carga de trabalho para cada avaliador dentro de uma tarefa e divergências nas fontes de carga de trabalho entre tarefas. Os pesos compõem informações de diagnóstico sobre a natureza da carga de trabalho imposta à tarefa. A segunda é uma escala para que o voluntário possa identificar a magnitude da carga sofrida nessa atividade (Hart e Staveland, 1988).

Todas as combinações possíveis, par a par, entre os seis fatores são feitas para identificar os pesos. São quinze comparações possíveis entre as seis demandas e cada uma pode receber de zero (irrelevante) a cinco (a mais importante dentre demandas) pontos, de acordo com a escolha do participante, indicando a relevância do fator (NASA, 1986).

O segundo requisito é obter classificações numéricas para cada escala que reflitam a magnitude desse fator em uma determinada tarefa. As escalas são apresentadas em um formulário de classificação e os participantes respondem marcando cada um dos seis fatores no local desejado. As classificações podem ser obtidas durante uma tarefa, após segmentos de tarefa ou após uma tarefa inteira. Cada escala é apresentada como uma régua dividida em vinte intervalos iguais sustentados por descritores bipolares (por exemplo, Alto/Baixo). Assim, existem vinte e uma marcas verticais em cada escala que dividem-a de 0 a 100 em incrementos de 5 (NASA, 1986).

A pontuação geral da carga de trabalho de um voluntário é calculada multiplicando cada classificação escolhida pelo peso levantado para esse fator. A soma das avaliações ponderadas para cada subescala é dividida por quinze (a soma dos pesos). Ou seja, é realizada a média ponderada (NASA, 1986).

Em suma, o grau em que cada um dos seis fatores contribui para a carga de trabalho de uma tarefa específica a ser avaliada, sob perspectiva dos avaliadores, é determinado por suas escolhas em relação às comparações entre os pares formados pelos os seis fatores. As classificações de magnitude em cada subescala são obtidas após a execução de uma tarefa ou segmento da tarefa. As classificações dos fatores considerados mais importantes na criação da carga de trabalho de uma tarefa recebem mais peso no cálculo da pontuação geral da carga de trabalho, aumentando assim a sensibilidade da escala (NASA, 1986).

Capítulo 5

Arcabouço Experimental

Este capítulo apresenta o arcabouço experimental implementado utilizando o sistema de teleoperação para a investigação das técnicas descritas na Seção 4.3, além de caracterizar os ambientes experimentais montados para realização dos experimentos. Inicialmente, uma descrição dos dispositivos robóticos comerciais utilizados para a implementação de um protótipo de escavadeira em escala laboratorial é feita. Em seguida, são apresentados os tópicos relativos às implementações realizadas para elaboração do módulo de realimentação de força proposto nesta dissertação. E por último são apresentados os ambientes utilizados nos experimentos.

5.1 Arcabouço Computacional de Teleoperação

A implementação das metodologias descritas no Capítulo 4 foi possível com a construção de um manipulador móvel usando dois dispositivos robóticos comerciais. Para obter uma plataforma robótica semelhante a uma escavadeira, o robô móvel Pioneer 3-AT¹ (Figura 27(a)) é utilizado como base móvel e acopla o manipulador Kinova Gen 3² (Figura 27(b)), que é utilizado como braço da escavadeira.

O robô móvel Pioneer 3-AT é utilizado para executar movimentos no solo durante a operação da escavadeira. O Pioneer 3-AT possui tração nas quatro rodas, ideal para operações *all-terrain*, que é cinematicamente semelhante a escavadeiras comerciais que se deslocam utilizando *track-chains*.

O Kinova Gen 3 é um manipulador extremamente versátil e leve, construído para atender às crescentes necessidades das equipes de pesquisa acadêmica e da indústria. Como este manipulador possui quatro graus de liberdade a mais que o manipulador de uma escavadeira, para manter a similaridade, algumas das juntas foram travadas para manter o movimento do braço restrito ao plano X_bZ_b .

¹ www.generationrobots.com/media/Pioneer3AT-P3AT-RevA-datasheet.pdf

² www.kinovarobotics.com/en/knowledge-hub/gen3-ultra-lightweight-robot



(a) Robô móvel com rodas Pioneer 3-AT.



(b) Braço manipulador Kinova Gen3.

Figura 27 – Modelos comerciais dos robôs utilizados no protótipo em escala laboratorial de uma escavadeira.

A Figura 28 ilustra o modelo da plataforma robótica usado neste trabalho, além de destacar os sistemas de coordenadas inercial ($X_I Y_I Z_I$) e da plataforma robótica ($X_b Y_b Z_b$), além dos dispositivos utilizados no ambiente local do sistema de teleoperação proposto.

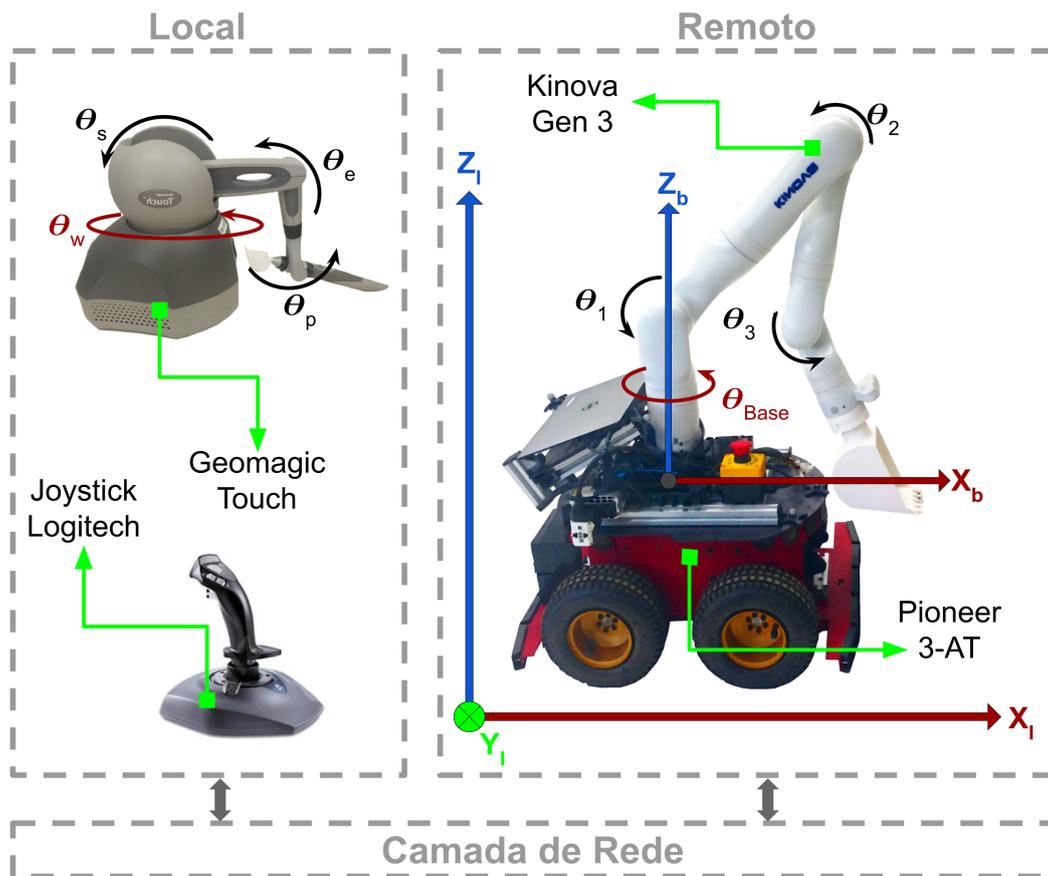


Figura 28 – Arquitetura do sistema de teleoperação proposto e esquema do manipulador móvel.

Uma diferença evidente entre o manipulador da escavadeira e um robô mani-

pulador é o acionamento: enquanto a primeira é um dispositivo hidráulico, o segundo, geralmente, é um dispositivo acionado eletricamente. No entanto, há um interesse crescente no uso de dispositivos acionados eletricamente no campo da mineração (Mcaree et al., 2013; Lang e Chang, 2009), tendo, inclusive, alguns equipamentos disponíveis no mercado^{3,4}. Essa tendência ajuda a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a reduzir o custo de operação de grandes equipamentos de mineração, mantendo a viabilidade técnica e os benefícios econômicos (Feng et al., 2016).

O protótipo em escala laboratorial conta ainda com um computador embarcado Intel i7-6500 com frequência de *clock* de 2.5GHz, placa de vídeo dedicada GeForce 920MX de 2GB e memória RAM de 8GB, para coleta e processamento de dados dos sensores embarcados, bem como para comunicação com o ambiente local de operação.

No ambiente local, o dispositivo háptico *Geomagic Touch*⁵ para controlar o manipulador e um *joystick* tradicional para comandar o manipulador móvel são utilizados, conforme ilustrado na Figura 28. Ambos os dispositivos estão conectados ao computador do operador, que utiliza o sistema operacional *Windows* com um ambiente da *engine Unity*. Este computador possui processador Intel i7-7700 com frequência de *clock* de 3.6GHz, placa de vídeo dedicada GeForce GTX 1050Ti de 4GB e memória RAM 16GB.

As estratégias propostas na Seção 4.3 são utilizadas como modos de operação do módulo de realimentação de força. Foram propostas três configurações: *C1*) operando o manipulador móvel sem nenhuma realimentação de força; *C2*) produzindo realimentação de força no dispositivo háptico quando a caçamba interage com objetos – estratégia da Seção 4.3.1; *C3*) combinando as forças de interação com forças atrativas que direcionam o operador ao local da escavação/depósito – estratégia da Seção 4.3.3.

A configuração *C1* é um modo de operação sem realimentação de força, ou seja, uma estratégia simplificada de teleoperação sem o uso de telepresença. Na configuração *C2*, o operador sente as forças de interação com o ambiente, por meio do dispositivo háptico, quando a plataforma robótica se choca com qualquer superfície.

O modo de operação *C3* propõe, além da interação da caçamba com o ambiente, realimentação de força para um sistema de direção assistida a partir de um campo potencial atrativo. Este campo potencial é alternado entre os locais desejados pressionando os botões *load* ou *unload* de acordo com a tarefa desejada. Estes botões são apresentados na Figura 29. Portanto, quando o operador termina de coletar o material, ele pressiona o botão *unload* e o campo potencial passa a ser gerado pelo local de depósito; o mesmo acontece depois que o processo de descarregamento termina e o operador pressiona o bo-

³ <https://mining.komatsu/surface-mining/electric-rope-shovels>

⁴ <https://www.volvoce.com/united-states/en-us/about-us/news/2019/volvo-ce-unveils-electric-compact-excavator-and-wheel-loader-at-bauma/>

⁵ www.3dsystems.com/haptics-devices/touch/specifications

tão *load*. As localizações da caçamba da escavadeira e dos locais de escavação e depósito são obtidas utilizando o sistema de localização Optitrack⁶.

Vale ressaltar que como é usado um *joystick* não háptico para enviar comandos para a base móvel, o comando de navegação enviado ao dispositivo háptico deve ser reproduzido pelo operador no *joystick* tradicional.

Em todas as três configurações é possível comandar apenas um dos dois robôs comerciais por vez, sendo a base móvel habilitada ao movimento ao ligar o arcabouço de teleoperação. Apesar disso, durante a operação, o dispositivo háptico é capaz de reproduzir a interação normalmente. Para definir qual robô será controlado, existem outros dois botões também no *joystick* não háptico: *drive* e *operate*, mostrados na Figura 29; o primeiro possibilita o movimento da base móvel e o segundo o do manipulador.



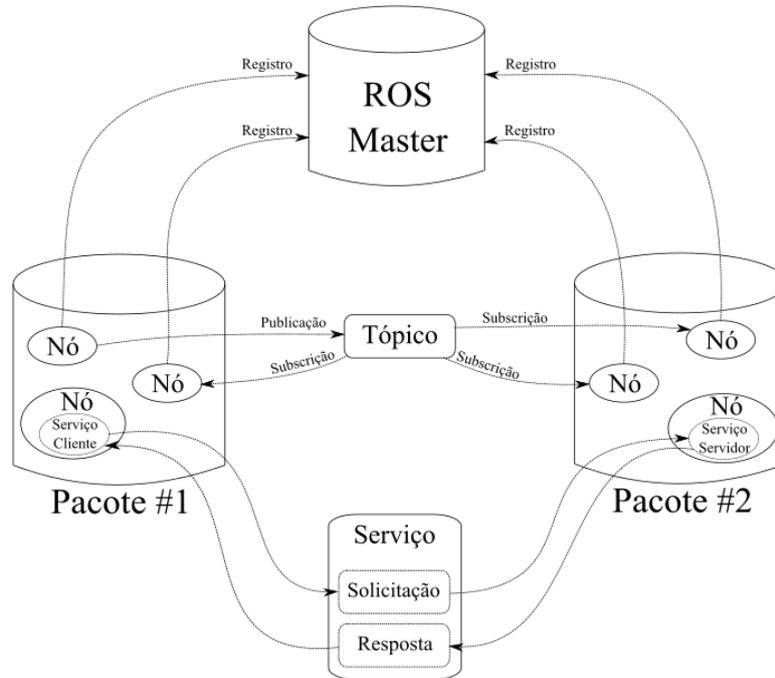
Figura 29 – Ilustração dos botões do *joystick* não háptico utilizados no arcabouço computacional de teleoperação.

5.2 Implementações em ROS

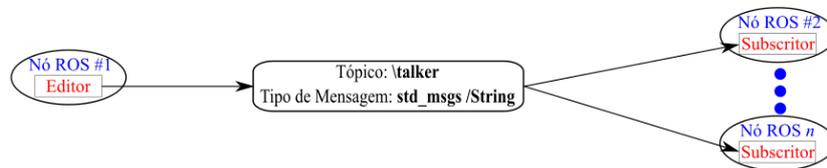
O desenvolvimento de um robô com algum grau de autonomia requer uma coleção de ferramentas de *software* como *drivers*, ferramentas de localização e mapeamento, visão computacional, planejamento de movimentos e controle de navegação. O ROS é um meta-sistema operacional de código aberto que reúne essas ferramentas e auxilia a gerenciar o desenvolvimento de aplicações de projetos robóticos complexos. O conceito básico do ROS consiste em uma rede ponto-a-ponto de aplicações executadas em paralelo de forma síncrona ou assíncrona, composta por Nós, Mensagens, Tópicos e Serviços, como mostra a Figura 30. Os pacotes podem ser considerados outro conceito importante, compondo a

⁶ <http://optitrack.com>

unidade principal para organizar um *software* em ROS, podendo conter Nós, bibliotecas dependentes do ROS, arquivos de configuração, conjuntos de dados, dentre outros.



(a) Comunicação entre nós no ROS.



(b) Arquitetura de comunicação entre Nós por meio de Tópicos no ROS.

Figura 30 – Representação do modelo de comunicação utilizado no ROS.

Cada Nó é um processo gerenciado pelo *Master*, por exemplo, controle dos atuadores ou leitura dos sensores de um robô, controle de navegação, planejamento de caminhos, dentre muitos outros; o *ROS Master* é um Nó principal que fornece serviços de nomenclatura e registro para o restante dos Nós no sistema ROS. Enquanto as Mensagens são simples estruturas de dados composta por campos editáveis. Os Tópicos são um dos sistemas de troca de Mensagens utilizados para comunicação entre Nós. Outro sistema são os Serviços que são compostos por um par de estruturas, sendo uma para realizar uma solicitação de uma informação e outra para obter uma resposta. O Servidor de Parâmetros, por sua vez, permite salvar dados por uma chave em uma localização central, podendo ser facilmente resgatados pelos Nós. Por fim, os *Bags* são arquivos utilizados para salvar e reproduzir Mensagens do ROS, muito útil na realização de testes de algoritmos e para tratamento de dados em experimentos.

No desenvolvimento do arcabouço computacional de teleoperação, todos os algoritmos utilizados foram implementados e desenvolvidos com pacotes do ROS. Alguns pacotes já disponibilizados *online* foram adaptados para uso na plataforma robótica, e outros foram desenvolvidos para permitir a investigação das técnicas de realimentação de força incorporadas ao sistema de teleoperação. Portanto, esta seção descreve os algoritmos implementados em ROS utilizados e os seus princípios de funcionamento. A implementação dos algoritmos pode ser dividida em dois principais submódulos do módulo de realimentação de força: o controle da plataforma robótica e as estratégias de realimentação de força utilizando um dispositivo háptico; estas implementações são descritas com detalhes nas seções a seguir.

5.2.1 Controle da Plataforma Robótica

A arquitetura de teleoperação proposta é composta pelo envio de comandos para a base móvel e o controle do manipulador, que é executado de acordo com a estrutura da Figura 23. Uma representação por meio de grafo do controle da base móvel é apresentada na Figura 31.

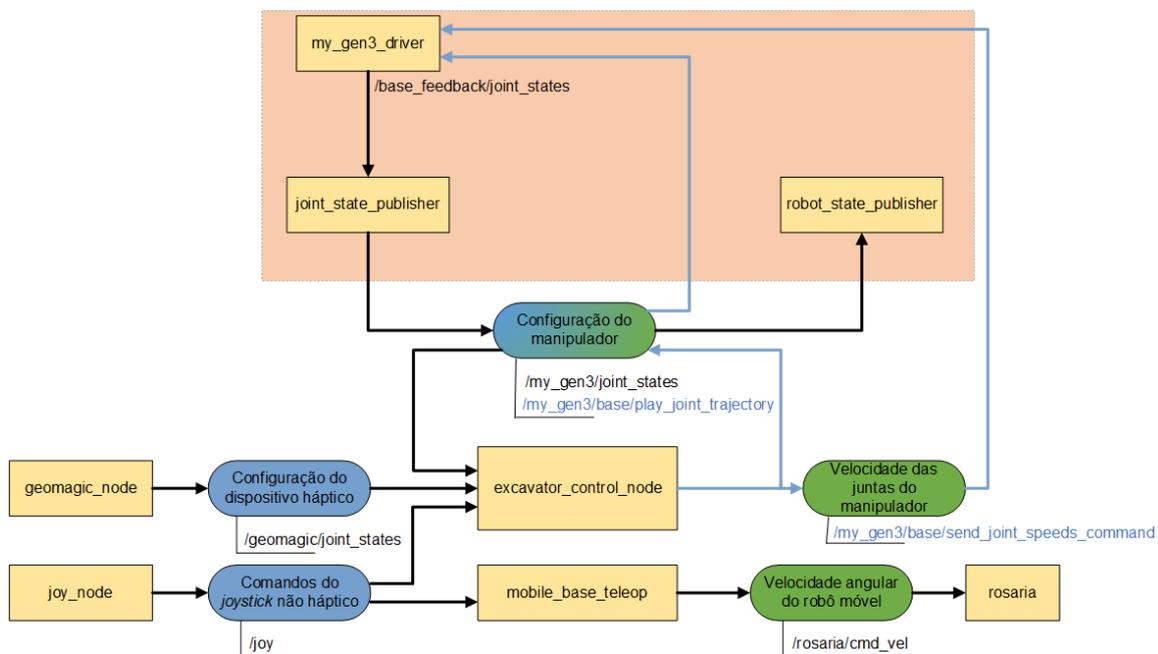


Figura 31 – Esquema geral de controle da base móvel usando o arcabouço ROS.

A estrutura física da plataforma robótica foi descrita utilizando um código *Unified Robot Description Format* (URDF), implementado em um arquivo XML que contém toda a especificação dos elos, juntas, bem como as propriedades dos atuadores e sensores.

Os comandos são enviados à base móvel por meio de um *joystick* não háptico ilustrado na Figura 28. Este *joystick* usa o pacote *joystick_drivers*⁷ como interface com

⁷ https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-third-party/tree/master/joystick_drivers

o ROS que está associado ao Nó `joy_node`. A conversão dos comandos do *joystick* não háptico para velocidades linear e angular do robô móvel é realizada por meio do pacote *robot_teleop*⁸ associado ao Nó `mobile_base_teleop`. Já a interface entre o robô móvel Pioneer 3-AT e o ROS é feita pelo pacote *RosAria*⁹ usando o Nó `rosaria`.

Os pacotes *joystick_drivers* e *RosAria* foram desenvolvidos por terceiros e disponibilizados à comunidade. Estes fazem parte de um conjunto maior de pacotes de terceiros utilizados para o desenvolvimento do arcabouço; a lista completa está disponível no repositório **2017-itv-teleoperacao-third-party**¹⁰ do *Github* do *VeRLab*. Já o pacote *robot_teleop* faz parte de outra lista de ferramentas desenvolvidas durante a execução do projeto, disponível no repositório **2017-itv-teleoperacao-tools**¹¹ do *Github* também do *VeRLab*.

Os comandos do *joystick* são publicados pelo Nó `joy_node` e subscritos pelo Nó `mobile_base_teleop` no Tópico `/joy`. O Nó `mobile_base_teleop` realiza a conversão dos comandos do *joystick* em velocidades linear e angular do robô móvel. Estas velocidades são publicadas no Tópico `/rosaria/cmd_vel` e subscritas pelo Nó `rosaria`, capaz de realizar a movimentação do robô Pioneer-3AT por meio do modelo descrito na Equação 4.8. Apesar do robô móvel ser um modelo *SSMR*, o seu fabricante, a *Adept MobileRobots*, utiliza modelagem cinemática de um robô diferencial no pacote *RosAria*. Considerando as dimensões do Pioneer 3-AT com uma curta distância entre os eixos das rodas dianteiras e traseiras, a diferença entre os modelos diferencial (Equação 3.6) e *Skid-Steering* (Equação 3.14) pode ser desconsiderada; assim, a simplificação adotada pelo fabricante não causa efeitos relevantes nas aplicações desta dissertação.

O dispositivo háptico *Geomagic Touch* utiliza o pacote *phantom_omni*¹² para integração com o ROS por meio do Nó `geomagic_node`. A adaptação do modelo cinemático do manipulador *Kinova Gen3* ao de um braço manipulador de escavadeira e o seu controle foram desenvolvidos no Nó `excavator_control_node` e encapsulados em um pacote chamado *kinova-gen-3*¹³. A interface do manipulador com o ROS é realizada pelo pacote *ros_kortex*¹⁴; de fato, todos os Nós contidos dentro do retângulo laranja na Figura 31 pertencem ao pacote *ros_kortex*. Os pacotes *phantom_omni* e *ros_kortex* foram desenvolvidos por terceiros e estão disponíveis no repositório **2017-itv-teleoperacao-third-party**. O pacote *kinova-gen-3* é uma ferramenta desenvolvida durante o projeto disponível no repositório **2017-itv-teleoperacao-tools**.

Os comandos do dispositivo háptico são publicados pelo Nó `geomagic_node`

⁸ https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-tools/tree/master/robot_teleop

⁹ <https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-third-party/tree/master/rosaria>

¹⁰ <https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-third-party>

¹¹ <https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-tools>

¹² https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-third-party/tree/master/phantom_omni

¹³ <https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-tools/tree/master/kinova-gen-3>

¹⁴ https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-third-party/tree/master/ros_kortex

e subscritos pelo Nó `excavator_control_node` no Tópico `/geomagic/joint_states`. O Nó `my_gen3_driver`, por sua vez, publica mensagens sobre o estado completo do manipulador, como posição, velocidade e esforço das juntas, informações de segurança, como restrições de movimento, entre outras. Tais informações são publicadas no Tópico `/base_feedback/joint_states` e subscritas pelo Nó `joint_state_publisher`. Este Nó extrai apenas as mensagens do tipo `sensor_msgs/JointState` como a configuração atual do robô, que é publicada no Tópico `/my_gen3/joint_states`.

O Nó `excavator_control_node`, criado para modelagem e controle do braço manipulador que emula uma escavadeira, utiliza a metodologia descrita nas Seções 4.1.2 e 4.2.2. Para o cálculo da cinemática direta, a configuração do robô é publicada pelo Nó `joint_state_publisher` no Tópico `/my_gen3/joint_states` e subscrita pelo Nó `robot_state_publisher`. Este Nó utiliza o mapeamento URDF do manipulador para criar uma árvore de transformações que representa a relação entre as partes que compõe o robô. O pacote `pykdl`¹⁵ é utilizado para calcular a cinemática direta do manipulador, utilizando uma análise similar à da convenção de DH, e está disponível no repositório **2017-itv-teleoperacao-third-party**.

Para cálculo do controle cinemático diferencial, a mensagem do Tópico `/geomagic/joint_states` contém a configuração do dispositivo háptico que é o valor de referência do controle, e a mensagem do Tópico `/my_gen3/joint_states` contém a configuração atual do robô considerado o valor atual, como mostrado na Figura 23. A metodologia utilizada na implementação do controle segue os princípios descritos na Seção 4.2.2.

As velocidades das juntas (entradas de controle) calculadas no controle cinemático diferencial são enviadas ao robô utilizando o Serviço `/my_gen3/base/send_joint_speeds_command` ao Nó cliente `my_gen3_driver`. Já o Nó `excavator_control_node` é o servidor deste serviço, enviando tais informações sempre que há uma requisição. O Serviço `/my_gen3/base/play_joint_trajectory`, por sua vez, define as posições angulares nas juntas do manipulador. Nesta parte da implementação são utilizados serviços ao invés de tópicos, pois enviar incessantemente comandos ao Kinova Gen3 gera advertência no sistema.

Com intuito de desacoplar os comandos enviados à plataforma robótica, dois botões no *joystick* não háptico foram configurados para permutar entre enviar comandos para a base móvel e controlar o manipulador. Quando o operador aperta o botão *drive* habilita o envio de comandos para a base móvel, por outro lado, ao apertar o botão *operate* o controle do manipulador é habilitado. As mensagens enviadas no Tópico `/joy`, ao apertar estes botões, também são publicadas pelo Nó `joy_node`, habilitando e desabilitando mutuamente os Nós `mobile_base_teleop` e `excavator_control_node`.

¹⁵ <https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-third-party/tree/master/pykdl>

5.2.2 Estratégias de Realimentação de Força

A realimentação de força é fornecida ao operador por meio de um dispositivo especial denominado háptico, capaz de fornecer sensações cinestésicas à interação humana com ambiente remoto. O dispositivo utilizado, apresentado na Figura 28, apesar de possuir seis juntas, utiliza as quatro indicadas na figura.

As estratégias propostas nesta dissertação foram implementadas no Nó `force_publisher` e encapsuladas em um pacote chamado `force_feedback`¹⁶ que também está disponível no repositório `2017-itv-teleoperacao-tools`. A elaboração deste algoritmo adotou a metodologia e as equações descritas na Seção 4.3. Uma representação por meio de grafo desta implementação em ROS é apresentada na Figura 32.

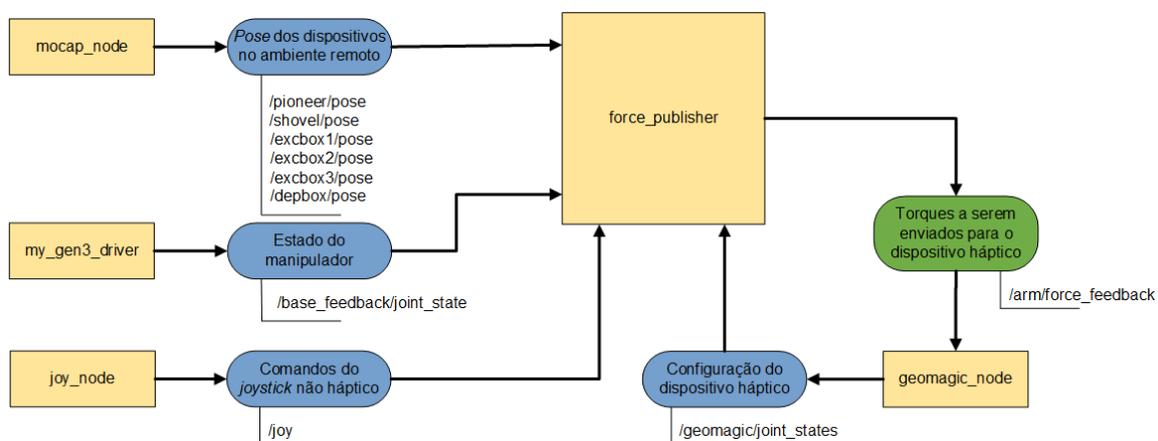


Figura 32 – Esquema geral da implementação das estratégias de realimentação de força.

Os pacotes `joystick_drivers`, `phantom_omni` e `ros_kortex` fornecem integração do `joystick` tradicional, do dispositivo háptico e do manipulador, respectivamente, ao ROS. Estes pacotes foram apresentados na implementação da Seção 5.2.1.

Para a implementação da estratégia de realimentação devido às forças interativas descrita na Seção 4.3.1, o Nó `my_gen2_driver` publica mensagens contendo informações sobre o estado do manipulador no Tópico `/base_feedback/joint_state`. O Nó `force_publisher` subscreve essas mensagens e utiliza as informações de posição e torque nas juntas para cálculo da força aplicada no efetuador, conforme apresentado na Equação 4.16. Por sua vez, o Nó `geomagic_node` publica no Tópico `/geomagic/joint_states` a mensagem com base nas posições das juntas do dispositivo háptico, usadas no cálculo da sua Jacobiana. A força aplicada ao efetuador e a Jacobiana do dispositivo háptico são usadas no cálculo do vetor de torques aplicados nas juntas do dispositivo τ_h , como mostrado na Equação 4.17.

A última componente utilizada na realimentação de forças 3D, que corresponde ao torque enviado para a junta *wrist* do dispositivo háptico, é calculada como mostrado

¹⁶ https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-tools/tree/master/force_feedback

na Equação 4.18. Para isso, o Nó `force_publisher` utiliza a componente τ_{Base} , da mensagem subscrita do Tópico `/base_feedback/joint_state`; a distância entre o robô móvel e a caçamba calculada utilizando as mensagens com informações de posição de ambos, subscritas pelo Nó `force_publisher` dos Tópicos `/pioneer/pose` e `/shovel/pose`, respectivamente, e o componente x do vetor de posição da ponta da caneta do dispositivo háptico, $p_{p,x}^h$, da Equação 4.18 é calculado utilizando a configuração do dispositivo, subscrita do Tópico `/geomagic/joint_states`. Estas mensagens contendo as posições dos objetos no ambiente remoto são publicadas pelo Nó `mocap_node` que compõe o pacote `mocap_optitrack`¹⁷. Este pacote oferece integração entre o sistema de localização Optitrack e o ROS, e está disponível no repositório **2017-itv-teleoperacao-third-party**.

Já a estratégia de produzir forças atrativas por um campo potencial artificial apresentada na Seção 4.3.2 considera as distâncias entre os locais de operação e a escavadeira. A posição das caixas de escavação, caixa de depósito, da caçamba da escavadeira correspondem, respectivamente, às mensagens publicada pelo Nó `mocap_node` nos Tópicos `/excbox1/pose`, `/excbox2/pose`, `/excbox3/pose`, `/dep/pose`, `/shovel/pose`. Para medir a distância entre as posições do robô e do local objetivo, foi utilizado o Nó `mocap_node`.

Após calcular as forças atrativas exercidas pelo local desejado, o Nó `force_publisher` calcula os torques a serem enviados para o dispositivo háptico por meio da Equação 4.21. O cálculo da Jacobiana do dispositivo háptico é feito também por meio do Nó `geomagic_node`, que publica a mensagem no Tópico `/geomagic/joint_states` contendo as posições das juntas do dispositivo háptico.

Para finalizar o cálculo das forças de realimentação, nesse caso pensando na direção assistida descrita na Seção 4.3.2, foi implementado um método para calcular o erro de alinhamento do eixo X_b da plataforma com a direção dos locais de escavação/depósito, dado pelo ângulo θ_{ali} . Nesta estratégia, o Nó `force_publisher` subscrive as mensagens da posição da plataforma e seu ângulo ψ de orientação em relação ao eixo Z_I do Tópico `/pioneer/pose`. O Nó `force_publisher` subscrive também as mensagens das posições dos locais de escavação e depósito nos Tópicos `/excboxId/pose` e `/dep/pose`. A fim de realizar o controle de direção, a estratégia ainda utiliza as mensagens contendo a posição e a velocidade das juntas do dispositivo háptico subscritas do Tópico `/geomagic/joint_states`. O ângulo θ_{ali} , subtraído da posição da junta θ_w do dispositivo háptico, é multiplicado por um ganho escalar proporcional; esta ação de controle é suavizada por um componente de amortecimento proporcional à velocidade $\dot{\theta}_w$, conforme as Equações 4.22 e 4.23.

A alternância do local desejado é realizada a partir de outros dois botões do *joystick* não háptico. Ao apertar um destes botões do *joystick* são geradas mensagens que são publicadas pelo Nó `joy_node` e subscritas no Nó `force_publisher` pelo Tópico `/joy`.

¹⁷ https://github.com/verlab/2017-itv-teleoperacao-third-party/tree/master/mocap_optitrack

Para integrar as duas estratégias no algoritmo são utilizados ganhos que ponderam as contribuições individuais das forças de interação e aquelas que guiam o operador. Por fim, o Nó `force_publisher` publica os torques a serem aplicados nas juntas do dispositivo háptico no Tópico `/arm/force_feedback` e o Nó `geomagic_node`, interface entre as aplicações em ROS e o dispositivo háptico, subscreve a mensagem. Assim, este Nó permite que o operador sinta as forças de realimentação resultantes das estratégias propostas.

5.3 Ambientes Experimentais

A investigação das técnicas de realimentação háptica foi realizada em laboratório por meio de dois grupos de experimentos utilizando ambientes experimentais diferentes. Estes ambientes foram montados de forma a figurar uma tarefa de carregamento/descarregamento de minério em uma mina a céu aberto. Os primeiros experimentos tiveram dois propósitos: qualificar as técnicas utilizadas, e validar a realimentação háptica em tarefas de carregamento de minério por meio da aplicação do formulário NASA-TLX. O segundo grupo de experimentos demonstrou a aplicabilidade do sistema de teleoperação desenvolvido no projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*.

Inicialmente, foram utilizados apenas um local de escavação e um local de depósito onde o material escavado era depositado. A Figura 33 apresenta um usuário que opera a escavadeira no ambiente experimental.

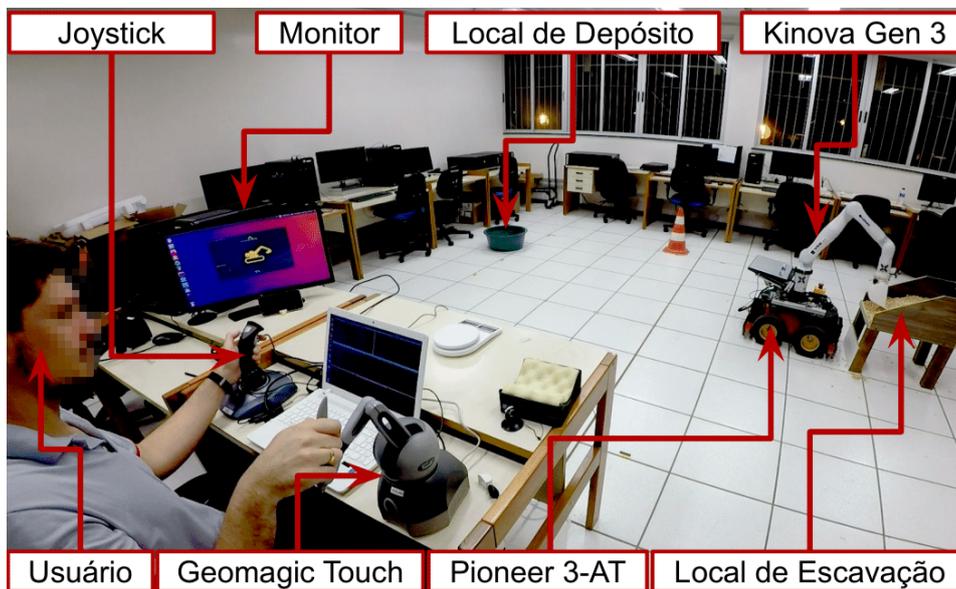


Figura 33 – Ambiente montado para o experimento utilizando um local de escavação.

Em seguida, foi criado um novo ambiente com vários locais de escavação. Primeiramente, este ambiente foi testado em simulação. A Figura 34 apresenta o ambiente virtual estruturado. O propósito deste desenvolvimento foi realizar ensaios preliminares para a

elaboração de um ambiente real com diversos locais de escavação. Um vídeo resumizando estes ensaios está disponível *on-line*¹⁸.

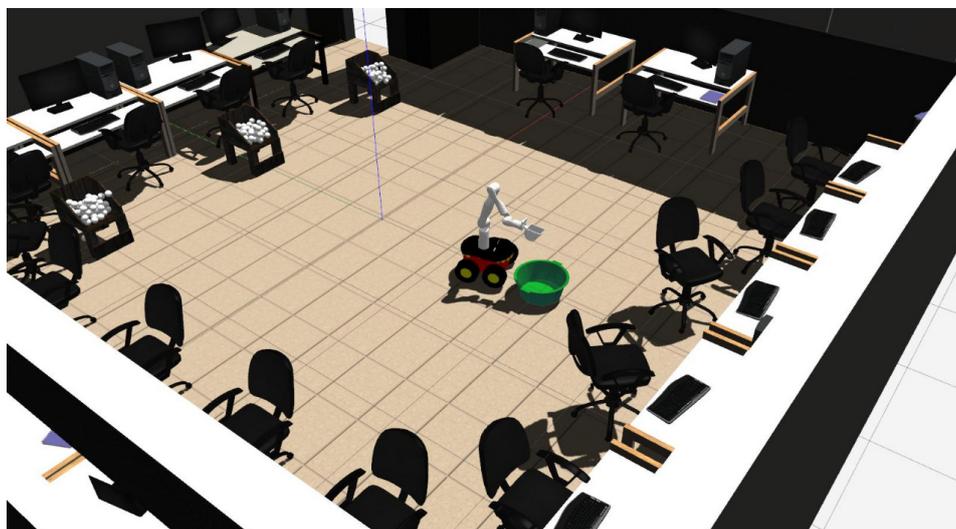


Figura 34 – Modelos virtuais do ambiente de experimentação e da plataforma robótica.

Após a validação em ambiente simulado, foi realizado outro experimento incluindo três locais de escavação contendo materiais de características físicas diferentes. Com um número maior de locais de escavação é possível perceber os benefícios do sistema de direção assistida, simulando uma operação de mineração de precisão. Neste experimento, o arcabouço de teleoperação completo, mostrado na Figura 2, foi utilizado e, portanto, a visualização ocorreu em primeira pessoa por meio do HMD. A Figura 35 mostra o ambiente experimental deste ensaio realizado para o *workshop* de encerramento do projeto.



Figura 35 – Ambiente montado para o experimento utilizando múltiplos locais de escavação.

¹⁸ [https://www.youtube.com/watch?v=ctLocJYH17o&\\$\\$t=3s](https://www.youtube.com/watch?v=ctLocJYH17o&$$t=3s)

Capítulo 6

Experimentos e Resultados

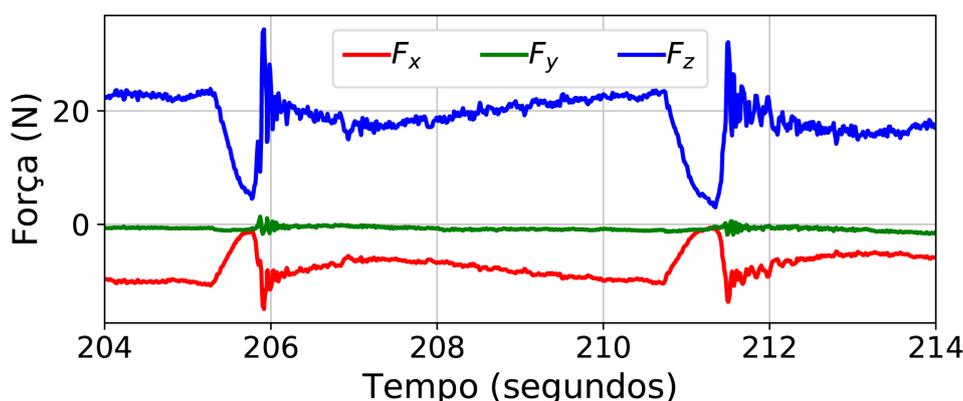
Este capítulo está dividido em duas seções que descrevem os experimentos e resultados obtidos para esta dissertação. A primeira seção apresenta os experimentos de carregamento realizados com voluntários. Os resultados qualitativos, que usam como métrica o [NASA-TLX](#), e quantitativos, por meio da comparação das técnicas propostas com uma configuração de teleoperação sem realimentação de força, também são apresentadas e discutidos nesta seção. Na segunda seção é descrita a demonstração realizada no *workshop* de encerramento do projeto, utilizando os módulos integrados do arcabouço de teleoperação numa operação com múltiplos locais de escavação.

6.1 Experimentos e Análise Qualitativa e Quantitativa do Uso da Realimentação de Força

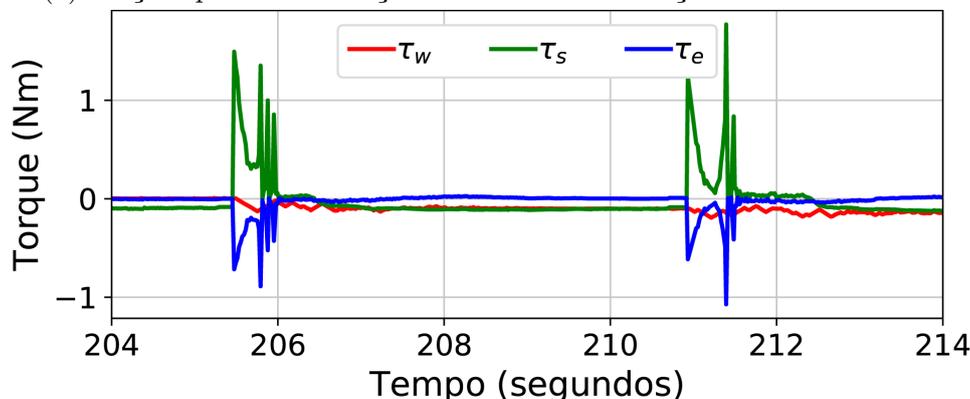
Nesta seção são apresentados experimentos para validação das estratégias propostas e análise dos possíveis efeitos destas estratégias na interação homem-máquina. Na Seção [6.1.1](#) são apresentados experimentos para validação da estratégias de realimentação de forças interativas, bem como testes que demonstram sua aplicabilidade. De forma análoga, a Seção [6.1.2](#) apresenta um experimento para validação da estratégia de realimentação de forças de direção assistida para guiar o operador durante a execução da tarefa. A Seção [6.1.3](#) apresenta experimentos realizados com voluntários que avalia a interação homem-máquina em tarefas de teleoperação com realimentação háptica. Neste caso, são comparados os resultados obtidos com e sem o uso de realimentação de força. Nessa seção, a ferramenta de análise de carga de trabalho [NASA-TLX](#) é utilizada para estimar as consequências na interação homem-máquina com o uso da realimentação de força.

6.1.1 Validação da Estratégia de Realimentação de Forças de Interação

Para validar a implementação das estratégia de realimentação de forças interativas com o ambiente, foi realizado um experimento onde a caçamba colide, propositalmente, duas vezes com as extremidades da caixa, executando um movimento diagonal descendente. O intuito é analisar como a realimentação de força funciona quando a caçamba interage com o ambiente. Portanto, a força aplicada ao efetuator é estimada para que sejam calculados os torques a serem enviados ao dispositivo háptico. Os dados mensurados são apresentados na Figura 36 e um vídeo disponível *on-line*¹ ilustra o experimento.



(a) Forças aplicadas na caçamba durante a interação com o ambiente.



(b) Torques aplicados ao dispositivo háptico, permitindo que o usuário sinta a realimentação de força.

Figura 36 – Realimentação de força nos experimentos de interação com o ambiente.

A Figura 36(a) apresenta as forças aplicadas na caçamba; já a Figura 36(b), os torques resultantes no dispositivo háptico, permitindo que o usuário sinta a realimentação de força. Conforme observado nas amostras, os dois picos correspondem a essas duas interações. Como esperado, o sistema proposto computa dois picos de torque ao dispositivo háptico, a partir das duas colisões realizadas nas extremidades das caixas, proporcionando a sensação de colisão.

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=H-uHyv4JaPk>

Em seguida, foram realizados experimentos de forma a motivar o emprego da realimentação de forças interativas em tarefas de escavação.

O primeiro consistiu em testar as configurações $C1$ e $C2$ descritas na Seção 6.1 durante colisões com objetos presentes no ambiente remoto. A Figura 37 mostra a caçamba sendo arrancada do manipulador na configuração $C1$ devido às excessivas forças de interação com a caixa de escavação.



Figura 37 – Demonstração de uma possível consequência da ausência de realimentação de força na teleoperação de uma escavadeira: (a) início do ensaio utilizando a configuração $C1$; (b) momento em que a caçamba toca a caixa de escavação; e (c) caçamba da escavadeira robótica sendo arrancada devido aos esforços excessivos contra a caixa de escavação.

Um vídeo disponível *on-line*² ilustra o experimento, onde é possível observar que a ausência da realimentação de força na teleoperação pode causar danos ao dispositivo mecânico e assim impactar a produtividade da tarefa. Além disso, a realimentação de forças interativas pode ajudar na padronização do processo de produção, trazendo maior segurança a todos os envolvidos no processo, incluindo o equipamento.

O segundo experimento, também relacionado à segurança, consistiu em enterrar um objeto volumoso e rígido no local de escavação. No vídeo disponível *on-line*³, é possível observar que a realimentação de força permite ao operador sentir a presença do objeto rígido. Este então altera os comandos enviados para o manipulador, de forma a carregar apenas o material posicionado acima do objeto rígido. Um resumo do experimento pode ser verificado na Figura 38.

6.1.2 Validação da Estratégia de Realimentação de Forças de Direção Assistida

Para validação da estratégia de realimentação de força gerada por um potencial atrativo no local de execução da tarefa, a plataforma robótica foi colocada no centro do ambiente experimental e executou dois giros em torno do seu eixo Z_b , em seguida, a

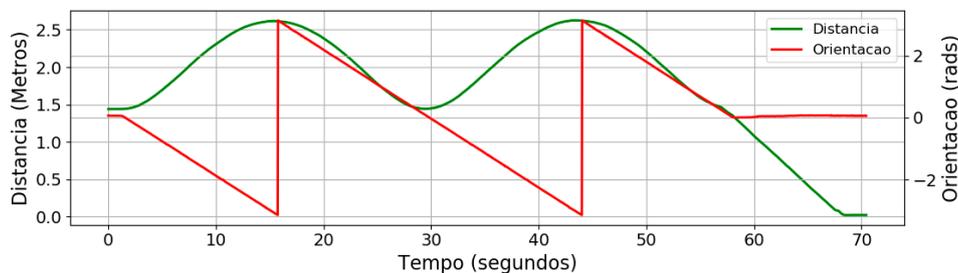
² <https://www.youtube.com/watch?v=4yHtKTdaeKY>

³ <https://www.youtube.com/watch?v=POrYGRgBY2I>

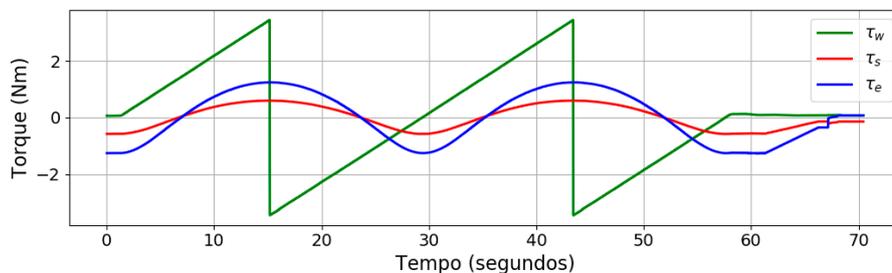


Figura 38 – Ensaio em laboratório sobre a identificação de corpos volumosos e rígidos durante a execução de uma tarefa de escavação: (a) momento em que o objeto é enterrado; (b) tentativa de escavar material na caixa onde o objeto foi enterrado; e (c) resposta da realimentação de força no dispositivo háptico.

plataforma foi guiada até o local desejado de execução da tarefa. O vídeo do experimento está disponível *on-line*⁴. Os resultados deste experimento são resumidos na Figura 39.



(a) Norma da distância e erro de orientação entre caçamba e local desejado para realização da tarefa.



(b) Torques aplicados ao dispositivo háptico, assistindo o operador na condução da base móvel.

Figura 39 – Realimentação de força nos experimentos com campo potencial atrativo.

Os gráficos da Figura 39 apresentam, respectivamente, os torques aplicados ao dispositivo háptico assistindo o operador na condução da base móvel, e a norma da distância e o erro de orientação entre caçamba e local desejado para realização da tarefa. É possível perceber que o torque enviado à junta *waist* do dispositivo háptico se assemelha ao erro de alinhamento da plataforma robótica em relação ao local desejado, assim como as curvas no gráfico que representam os torques nas juntas *shoulder* e *elbow* se assemelham às da distância da caçamba ao local desejado.

Durante o giro da plataforma, o torque enviado à junta *waist* (θ_w) do dispositivo

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=jBzi54DJaY8>

háptico varia conforme o erro de alinhamento da plataforma robótica em relação ao local desejado; já os torques resultantes aplicados nas juntas *shoulder*, θ_s , e *elbow*, θ_e , são proporcionais à distância da caçamba ao local de operação desejado.

O momento inicial em que a plataforma é guiada até o local desejado pode ser observado a partir de 58 segundos após o início do experimento. Nos gráficos da Figura 39 é possível perceber que a partir deste momento o erro de orientação é praticamente nulo e a norma da distância entre a caçamba e o local diminui gradativamente.

6.1.3 Experimentos com Voluntários

Experimentos com voluntários também foram realizados permitindo analisar os efeitos da realimentação de força na interação homem-máquina em tarefas que simulam carregamento/descarregamento de minério. Este experimento consistiu em operar a escavadeira e executar a tarefa de transferir serragem entre duas caixas, semelhante a uma operação de carregamento/descarregamento de minério. Nenhuma realimentação visual foi utilizada, isto é, ambos os ambientes local e remoto se localizavam dentro do laboratório e a visualização era feita sob perspectiva “externa” em relação ao ambiente remoto.

Um total de seis voluntários participaram dos experimentos; esses usuários tiveram oito minutos para concluir a tarefa usando cada modo de operação. As configurações *C1*, *C2* e *C3* descritas na Seção 5.1 foram executadas em ordem aleatória para avaliar se os participantes conseguiriam identificar os diferentes modos. Todos os participantes responderam ao formulário NASA-TLX para medir a carga de trabalho produzida em cada configuração, exposto na Seção 4.4. No final da tarefa, a massa transportada do material é medida. Um resumo em vídeo dos experimentos está disponível *on-line*⁵.

A Tabela 2 apresenta um resumo das informações sobre o experimento e mostra que um terço dos voluntários já teve alguma experiência com uma plataforma semelhante. É possível notar também que a maioria deles identificou a sequência de execução correta dos modos de operação.

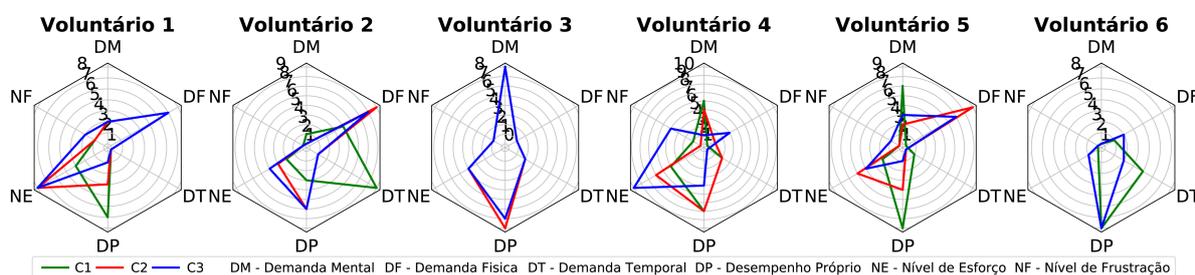
A partir dos resultados do NASA-TLX apresentados na Figura 40, é possível observar que os métodos propostos tendem a auxiliar nas demandas mental e temporal, mas, em contrapartida, exigem mais esforço físico do operador, uma vez que o dispositivo háptico transmite sensação de força para o usuário. Em geral, o nível de esforço, que é a soma dos esforços mental e físico para executar a tarefa, aumenta à medida que o desempenho diminui.

Os experimentos demonstraram que a ordem em que as configurações são executadas influencia na quantidade transportada. De fato, a variação na quantidade total de

⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=ZG8H1h8ifU4>

Tabela 2 – Resumo dos experimentos.

Voluntários	Tem experiência neste tipo de plataforma?	Ordem dos Experimentos	O participante acertou a ordem de execução dos cenários?
1	Não	C1, C3, C2	Não
2	Sim	C1, C2, C3	Sim
3	Não	C3, C1, C2	Sim
4	Não	C2, C1, C3	Sim
5	Não	C3, C2, C1	Sim
6	Sim	C2, C3, C1	Sim

Figura 40 – Resultados das dimensões do [NASA-TLX](#) para cada sujeito.

material carregado aumentou à medida que o participante ganhava experiência, mas foi pequena entre as configurações.

Da mesma forma, a realimentação háptica proporciona um maior nível de frustração ao operador à medida que o desempenho diminui. Este aumento no nível de frustração pode ser ocasionado devido à diferença de quantidade de material coletado entre as configurações propostas mostrada na Tabela 3. Porém, é necessário observar que a ordem de execução das configurações interfere na quantidade de material coletado, evidenciando uma ligeira curva de aprendizagem à medida que o voluntário opera em cada configuração.

Contudo, apesar da produtividade ser ligeiramente inferior, o esforço das juntas do manipulador diminui consideravelmente à medida que essa realimentação é dada ao operador, conforme apresentado na Figura 41 que mostra a evolução das interações de força para o voluntário 4 (os gráficos dos outros participantes têm uma resposta semelhante).

A partir da Figura 41, é possível observar alguns picos de força em *C1*, o que não ocorre em *C2* e *C3* devido à realimentação de força. Esses picos podem causar estresse mecânico na caçamba, o que reduz o ciclo de vida do dispositivo. Dessa forma, a realimentação de força tem um impacto positivo na conservação do mecanismo, reduzindo esses picos em até 70%. Assim, os benefícios trazidos ao sistema podem ser considerados mais sobressalentes que a ligeira perda de produtividade. Além do mais, devido à curva de aprendizagem deduzida, é viável inferir que esta perda tende a desaparecer à medida

Tabela 3 – Desempenho do usuário em cada configuração.

Voluntários	Ordem dos Experimentos	Carga Total Transportada (g)
1	C1	2229
	C3	2346
	C2	3335
2	C1	2032
	C2	2156
	C3	1823
3	C3	1534
	C1	2703
	C2	3045
4	C2	1112
	C1	1362
	C3	1036
5	C3	737
	C2	1205
	C1	2228
6	C2	2021
	C3	1693
	C1	2818

que o operador adquire experiência.

O consumo de energia é outro fator importante que requer atenção. Foi medida a potência consumida durante todos os experimentos e observado esse comportamento em cada modo de operação. Com isso, os valores mínimo, médio e máximo de potência, foram medidos resumindo todos os participantes, mas separando-os pela configuração, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo do consumo de potência (Watts).

Configuração	Min	Med	Max
C1	36.85	39.09 ± 2.79	74.38
C2	36.47	38.08 ± 1.44	49.76
C3	31.40	36.11 ± 2.31	42.35

De acordo com a Tabela 4, a configuração C3 tem consumo aproximadamente 8% menor que o C1, o que pode representar uma redução de custo significativa em aplicações reais. Em comparação com as outras configurações, C1 também possui um valor máximo mais alto para o consumo de energia, o que é indesejável devido às instabilidades elétricas resultantes no sistema.

Também foi medida a intensidade da carga de trabalho dos participantes para essa aplicação. Os resultados são apresentados na Figura 42 onde é possível observar que a carga de trabalho aumentou para a maioria deles, exceto para segundo voluntário, que já possuía experiência com plataformas semelhantes. O resultado do sexto voluntário, que

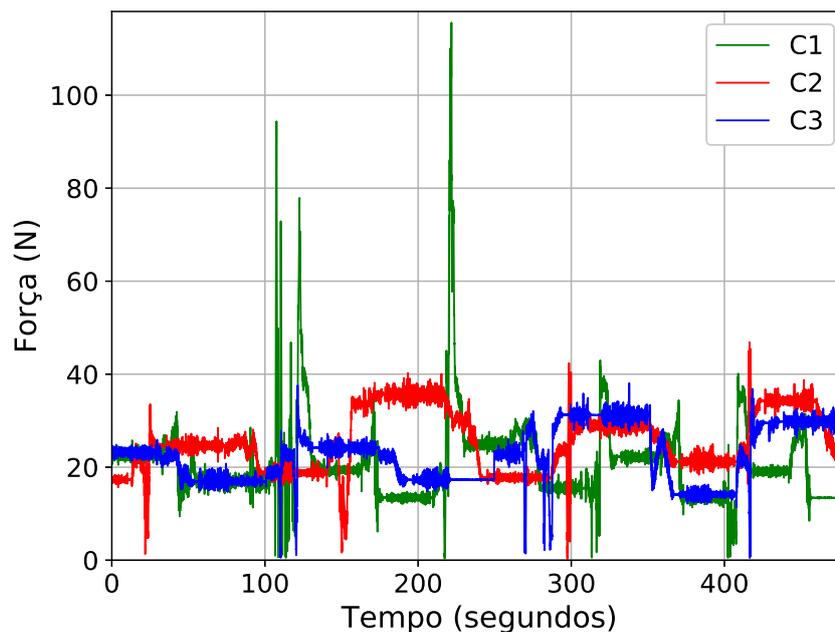


Figura 41 – Módulo das forças aplicadas, pelo voluntário 4, à caçamba durante a tarefa. A força de pico significa interação crítica entre a caçamba e os objetos.

também tem experiência, mostra que há um pequeno aumento na intensidade. Para quem é inexperiente, essa lacuna da carga de trabalho entre as configurações é maior.

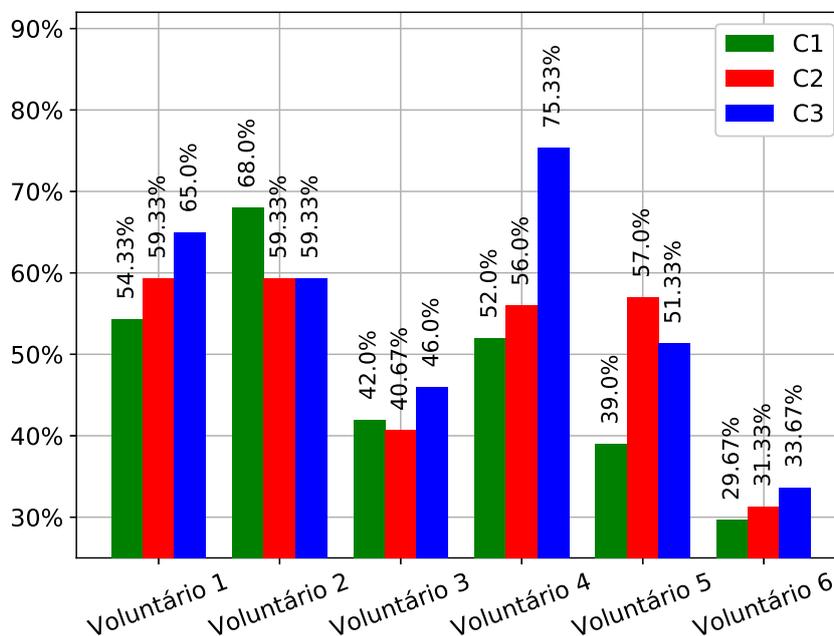


Figura 42 – Gráficos de intensidade da carga de trabalho.

Os resultados apresentados estão alinhados com as expectativas. Na indústria, quanto mais automatizado o sistema se torna, maior a necessidade de mão de obra qualificada. Isto explica o fato dos voluntários 2 e 6 terem menos dificuldades com a imersividade dada à medida que evolui os modos de operação. E, se o processo se tornar

automatizado e operadores não qualificados executarem a tarefa, provavelmente deverão ser treinados para se adaptar à nova realidade; esse requisito também pode ser deduzido dos resultados.

6.2 Verificação do Arcabouço de Teleoperação com Múltiplos Locais de Escavação

A verificação do arcabouço de teleoperação foi realizada por meio de um ensaio em um cenário com múltiplos locais de escavação, utilizados também para avaliar os benefícios da realimentação de forças de direção assistida para auxiliar o operador. Este ensaio foi apresentado no *workshop* de encerramento do projeto, realizado em dezembro de 2020.

No vídeo do experimento, disponível *on-line*⁶, é possível perceber que o operador conta com realimentação visual, além da de força. Esta realimentação visual permite ao operador visualizar o ambiente remoto em primeira pessoa; esta visão é mostrada aos espectadores do vídeo por meio de uma TV localizada à frente do operador. Um ciclo completo de carga e descarga passando pelas três caixas de escavação é resumido na Figura 43.

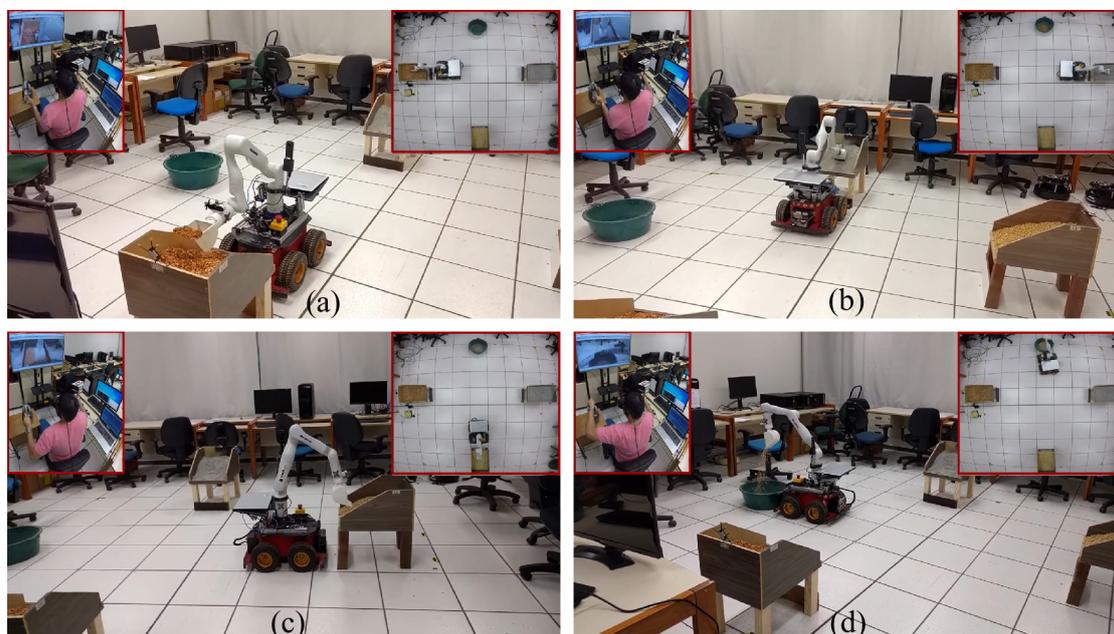


Figura 43 – Ensaio em laboratório que simula uma sequência de tarefas na lavra de precisão: (a) escavação no primeiro local desejado; (b) escavação no segundo local desejado; (c) escavação no terceiro local desejado; e (d) depósito do material escavado no quarto local desejado.

⁶ <https://www.youtube.com/watch?v=z8mGAJ-B0Mw>

O operador, por meio do dispositivo háptico, tem estímulos sensoriais diferentes dos visuais acerca do local de destino desejado. Ou seja, a própria realimentação de força para direção assistida pode ser utilizada para auxiliar a navegação. Desta forma, o operador pode utilizar a realimentação visual para se atentar a outros aspectos do ambiente remoto, por exemplo a presença de obstáculos e outros possíveis riscos ao equipamento teleoperado.

Esta estratégia pode ser especialmente útil para aumentar a produtividade, diminuindo o tempo que o operador leva para conduzir o equipamento aos locais desejados. Associada à estratégia de realimentação de forças interativas com o ambiente remoto, elas podem otimizar o processo através da redução do tempo necessário para realizar a lavra e da ampliação da vida útil do equipamento, reduzindo o estresse mecânico e, conseqüentemente, a necessidade de manutenção.

Capítulo 7

Conclusões

Esta dissertação apresentou uma investigação de técnicas de realimentação de força para implementação no arcabouço computacional de teleoperação do projeto *Teleoperação Avançada de Equipamentos de Mineração*. Este projeto é resultado de uma parceria entre o [ITV](#) e o [VeRLab](#) do Departamento de Ciência da Computação da [UFMG](#) e tem como principal objetivo desenvolver um arcabouço computacional de teleoperação que possibilite um operador realizar tarefas remotas em equipamentos em ambientes de mineração utilizando a telepresença. Para isso, o projeto contemplou também a implementação de um protótipo em escala reduzida para realização de testes em laboratório, possibilitando verificar experimentalmente as técnicas de teleoperação propostas.

Como parte de um sistema de teleoperação, a telepresença é uma tecnologia essencial para uma experiência imersiva para o operador, pois fornece a ele não apenas a capacidade de manipular o ambiente remoto, mas também de perceber e interagir de forma transparente com este ambiente. Porém, possibilitar uma solução utilizando telepresença, para produzir medição sensorialmente rica do ambiente e possibilitar o operador a influenciar a forma ou o conteúdo do ambiente mediado, pode se tornar uma atividade complexa. Contudo, o uso da tecnologia háptica permite o controle bidirecional do sistema, fornecendo ao operador informações sobre o ambiente de operação e permitindo que ele manipule-o. Neste contexto, tarefas da indústria de mineração, como a escavação, são suscetíveis à esforços excessivos que podem causar desde prejuízos ao equipamento até danos indesejados ao ambiente e/ou ao operador. Portanto, esta dissertação teve como objetivo inicial a investigação e validação de técnicas de realimentação de força para comporem um arcabouço computacional de teleoperação de equipamentos de mineração, com foco específico na utilização de escavadeiras para tarefas de movimentação de material.

Um grande benefício do uso de um sistema de realimentação de força de interação entre ambiente e equipamento é o fato do manipulador sofrer menos estresse; durante os experimentos, foi verificado que o sistema proposto reduz o pico das forças aplicadas ao manipulador em aproximadamente 70%. Ao mover o manipulador contra objetos rígidos, o

operador percebe a força de reação no dispositivo háptico e reage tentando evitar contatos que possam danificar o manipulador. Sem a realimentação de força, o operador poderia continuar a forçar o manipulador contra o ambiente, causando forças de interação muito grandes, aumentando o estresse dos atuadores e diminuindo a vida útil do equipamento. Em casos mais extremos, é possível até que o equipamento seja danificado de tal forma que a lavra, e conseqüentemente todo processo, precisem ser paralisados até que seja realizada a manutenção da máquina danificada. Assim, os experimentos mostraram que a realimentação de força serve como uma forma de moderação dos esforços nos atuadores, impedindo o operador de sobrecarregar a máquina. Outra contribuição significativa do sistema proposto é a economia de 8% no consumo de energia gasto pela escavadeira robótica, devido ao menor nível de esforço que os atuadores praticam.

Em relação ao sistema de direção assistida utilizando campos potenciais artificiais, ele pode ser especialmente útil na mineração de precisão, onde o operador deve seguir uma seqüência específica com locais predefinidos para escavar. Assim, o operador é capaz de otimizar o tempo gasto no traslado do equipamento entre os locais das tarefas por meio de informações do movimento. Esta estratégia pode auxiliar na tomada de decisões sobre o movimento em ocasiões onde há cortina de poeira na mina devido à execução de tarefas do processo. Esta estratégia pode também ser utilizada como informação primária de posicionamento do local da tarefa a ser executada, ou seja, as informações de força enviadas ao dispositivo háptico serem a principal indicação externa para o operador navegar pelo ambiente remoto com o equipamento. Assim, o operador pode utilizar outros estímulos sensoriais, como por exemplo os da visão, para obter informações complementares do ambiente remoto, como a localização de obstáculos não identificados previamente.

As estratégias associadas podem, portanto, otimizar o processo por meio da redução do tempo necessário para realizar a lavra e da ampliação da vida útil do equipamento, reduzindo o estresse mecânico e, conseqüentemente, a necessidade de manutenção. Já em relação à análise de carga de trabalho, os resultados do [NASA-TLX](#), aplicado a um conjunto de 6 voluntários, mostraram que a realimentação de força diminuiu as demandas mental e temporal dos operadores, mas aumentou a física. Em geral, o nível de esforço, que é a soma do esforço físico e mental para executar a tarefa, aumentou à medida que o desempenho diminuiu. Conseqüentemente, o nível de frustração foi maior. Contudo, foi possível perceber uma ligeira curva de aprendizagem, o que pode ter interferido eventualmente no preenchimento do formulário. Nesse caso, um número maior de *sets* de experimento com os mesmos operadores, antes da aplicação do formulário, poderia melhorar o desempenho deles e, conseqüentemente diminuir a frustração, além dos níveis de esforço. Esta perspectiva está alinhada com a realidade de processos industriais: quanto mais automatizado o sistema se torna, maior a necessidade de mão de obra especializada. E, se o processo se tornar automatizado e operadores não qualificados executarem a tarefa,

provavelmente deverão ser treinados para se adaptar à nova realidade.

O arcabouço computacional foi testado também por um voluntário ilustre com experiência em teleoperação de sistemas aeroespaciais. Durante uma visita ao campus da [UFMG](#) em dezembro de 2019, o Ministro da Ciência, Tecnologia e Inovações do Brasil, astronauta Marcos César Pontes, utilizou o arcabouço de teleoperação para comandar o protótipo de escavadeira. O ministro comparou o sistema com equipamentos teleoperados em estações espaciais. Um vídeo da experiência do ministro com o arcabouço de teleoperação está disponível *on-line*¹.

7.1 Trabalhos Futuros

Esta dissertação apresentou resultados preliminares em relação à aplicação das estratégias de realimentação de força propostas para o arcabouço computacional de teleoperação. Com isso, as estratégias propostas foram incorporadas ao arcabouço computacional compondo um dos módulos disponíveis. As propostas descritas a seguir são indicações para projetos futuros que abordem o mesmo tema.

Como apenas um dispositivo háptico estava disponível para utilização no projeto, a realimentação de força resultante da estratégia de direção assistida é enviada ao *joystick* que comanda o manipulador, ao invés da base móvel. Portanto, um dos trabalhos futuros consiste na construção de um *joystick* háptico para comandar também a base móvel. É interessante também a implementação de uma interface háptica com cadeia cinemática similar ao de um braço de escavadeira, podendo assim estudar os efeitos da semelhança cinemática entre dispositivos mestre e escravo na demanda mental do operador usando formulários como o [NASA-TLX](#). Assim, serão usados dois dispositivos hápticos para gerar uma sensação convincente de que o operador está sendo assistido por esse sistema: um para receber forças relativas ao manipulador, e outro para a base móvel.

Outra estratégia a ser estudada é o efeito no campo potencial de obstáculos presentes no ambiente remoto, gerando forças repulsivas de direção no *joystick* háptico. Estes potenciais repulsivos em conjunto com os atrativos podem acrescentar mais benefícios para a operação, como autonomia da movimentação da base do equipamento por meio do planejamento de caminhos. Porém, é necessário que estratégias de identificação de obstáculos e mapeamento do ambiente remoto também sejam exploradas.

Desta forma, será possível aperfeiçoar a forma de controle do sistema de teleoperação também. Atualmente funcionando por meio de controle direto/bidirecional, o sistema de controle utilizado poderá ser supervisor ou até mesmo compartilhado. Para isso, será necessário a construção de módulos de navegação para a base móvel e de pla-

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=jJ10Ts44otQ>

nejamento de caminhos para o manipulador robótico. Estes módulos possibilitarão que o sistema funcione de forma autônoma, sob supervisão de um operador que poderá tomar o controle do sistema quando julgar necessário.

Um dos problemas da teleoperação é a alta latência nas redes de comunicação. Assim, uma solução viável consiste em gerar forças resistivas aos movimentos do dispositivo háptico a medida que a latência aumenta. Desta forma, as trajetórias de comando são mais lentas, ajudando na redução do erro de controle. Além disso, o operador é capaz de perceber a latência de comunicação, sendo auxiliado pelo próprio sistema de teleoperação durante a realização da tarefa.

Nesta dissertação, os testes foram realizados utilizando um dispositivo háptico comercial e as estratégias propostas foram de técnicas de realimentação de força permitindo sensações cinestésicas. Os benefícios das sensações táteis não foram exploradas na investigação. Tais sensações podem ser exploradas por meio da aquisição ou construção de uma cabine de teleoperação, como a cabine de Teleoperação LiReCon Liebherr², contendo uma cadeira para piloto personalizada equipada com atuadores vibrotáteis, e da inserção de sensores no equipamento utilizado para realização da tarefa possibilitando realimentação tátil ao ambiente local. Esta cadeira poderá ainda ser equipada com os dispositivos hápticos a serem construídos, formando um módulo completo de realimentação de força de um arcabouço de teleoperação para tarefas de mineração. Além da cadeira, a cabine contará com mídias para reprodução de imagens, vídeos e dados obtidos do ambiente remoto.

Por fim, o arcabouço foi validado até o momento apenas em uma plataforma robótica que emula uma escavadeira. Em trabalhos futuros seria desejável adaptar e testar o arcabouço computacional em equipamentos comerciais, por exemplo uma miniescavadeira Bobcat E10³, aumentando gradualmente a escala do equipamento remoto a fim de testar as limitações dos dispositivos utilizados em ambientes de mineração, ajudando de forma efetiva nas operações de carregamento de minério.

² <https://www.inthemine.com.br/site/liebherr-apresenta-suas-ultimas-novidades-na-minexpo-2021/>

³ <https://www.bobcat.com/la/pt/excavators/models>

Referências

- M.Abayazid, C.Pacchierotti, P.Moreira, R.Alterovitz, D.Prattichizzo, e S.Misra. Experimental evaluation of co-manipulated ultrasound-guided flexible needle steering. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 12(2):219–230, 2016.
- F.Abi-Farraj, C.Pacchierotti, O.Arenz, G.Neumann, e P. R.Giordano. A haptic shared-control architecture for guided multi-target robotic grasping. *IEEE transactions on haptics*, 13(2):270–285, 2019.
- K.Ahn. Development of force reflecting joystick for hydraulic excavator. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 47(3):858–863, 2004.
- D. L.Akin, M. L.Minsky, E. D.Thiel, e C. R.Kurtzman. Space applications of automation, robotics and machine intelligence systems (aramis), phase 2. volume 1: Telepresence technology base development. Technical report, National Aeronautics and Space Administration, 1983.
- L.Almeida, P.Menezes, e J.Dias. Improving robot teleoperation experience via immersive interfaces. In *2017 4th Experiment@ International Conference (exp. at'17)*, pages 87–92. IEEE, 2017.
- I.Amaral, C.Fany, D.Simon, L.Matos, Á.Araújo, L.Leão, A.Rezende, H.Azpúrua, G.Pessin, e G.Freitas. Sistema de alertas e operação assistida de um robô para a inspeção de ambientes confinados-espeleorobô. *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, 2(1), 2020.
- C.Baker, Z.Omohundro, S.Thayer, W.Whittaker, M.Montemerlo, e S.Thrun. A case study in robotic mapping of abandoned mines. In *Field and Service Robotics*, pages 487–495. Springer, 2003.
- V.Battiste e M.Bortolussi. Transport pilot workload: A comparison of two subjective techniques. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 32(2):150–154, 1988.

- A. B.Becker, J. S.Warm, W. N.Dember, e P. A.Hancock. Effects of feedback on perceived workload in vigilance performance. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 35(20):1491–1494, 1991.
- D. R.Begault e L. J.Trejo. 3-d sound for virtual reality and multimedia. Technical report, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA United States, 2000.
- A. L.Benin, C. P.Borgstrom, G. Y.Jenq, S. A.Roumanis, e L. I.Horwitz. Republished: defining impact of a rapid response team: qualitative study with nurses, physicians and hospital administrators. *Postgraduate medical journal*, 88(1044):575–582, 2012.
- J.Billino e K.Drewing. Age effects on visuo-haptic length discrimination: evidence for optimal integration of senses in senior adults. *Multisensory research*, 31(3-4):273–300, 2018.
- J.Bimbo, C.Pacchierotti, M.Aggravi, N.Tsagarakis, e D.Prattichizzo. Teleoperation in cluttered environments using wearable haptic feedback. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 3401–3408. IEEE, 2017.
- D.Black, S.Lilge, C.Fellmann, A. V.Reinschluessel, L.Kreuer, A.Nabavi, H. K.Hahn, R.Kikinis, e J.Burgner-Kahrs. Auditory display for telerobotic transnasal surgery using a continuum robot. *Journal of Medical Robotics Research*, 4(02):1950004, 2019.
- D.Budolak, R.Chauhan, e P.Ben-Tzvi. Semi-autonomous teleoperation, guidance, and obstacle avoidance with path adherence. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 59230, page V05AT07A061. American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- L.Carvalho, P.Rezeck, M. V.Lima, L.Pinto, G.Freitas, E. R.Nascimento, D. G.Macharet, L.Chaimowicz, G.Pessin, e M. F. M.Campos. On the evaluation of force feedback augmented teleoperation of excavator-like mobile manipulators. In *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 1401–1407, 2020. doi: 10.1109/CASE48305.2020.9217029.
- V.Chacko et al. State of the art in excavators. In *Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, pages 481–488. IEEE, 2014.
- J.Chevrie, A.Krupa, e M.Babel. Real-time teleoperation of flexible beveled-tip needle insertion using haptic force feedback and 3d ultrasound guidance. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2700–2706. IEEE, 2019.
- F.Chinello, C.Pacchierotti, M.Malvezzi, e D.Prattichizzo. A three revolute-revolute-spherical wearable fingertip cutaneous device for stiffness rendering. *IEEE transactions on haptics*, 11(1):39–50, 2017.

- A.Coelho, S.Yuri, W.Xuwei, M.Hrishik, S.Harsimran, A.Dietrich, A.Franchi, K.Konstantin, e C.Ott. Whole-body teleoperation and shared control of redundant robots with applications to aerial manipulation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 102(1), 2021.
- J. A.Damasceno, L. M. L. d.Sousa, R. C.Labanca, W. F.Marques, F. C.Araujo, e B. E.Lopes. Simulação e otimização de recuperação automática em pátio de estocagem de minério utilizando mapeamento 3d. In *17º Seminário de Automação e TI Industrial*, pages 191–204. ABM Proceedings, 2013.
- G.De Gerssem. Kinaesthetic feedback and enhanced sensitivity in robotic endoscopic telesurgery. *Catholic University of Leuven*, page 7, 2005.
- S.Dogru e L.Marques. An improved kinematic model for skid-steered wheeled platforms. *Autonomous Robots*, 45(2):229–243, 2021.
- J.Doubler e D.Childress. An analysis of extended physiological proprioception as a prosthesis-control technique. *Journal of rehabilitation research and development*, 21(1):5–18, 1984.
- J. V.Draper, D. B.Kaber, e J. M.Usher. Telepresence. *Human factors*, 40(3):354–375, 1998.
- J. J.Dudley. Enhancing awareness to support teleoperation of a bulldozer. Master’s thesis, The University of Queensland, Brisbane, Queensland, Austrália, 2014.
- P.Farajiparvar, H.Ying, e A.Pandya. A brief survey of telerobotic time delay mitigation. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 2020.
- Y.Feng et al. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks. In *2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- W. R.Ferrell. Remote manipulation with transmission delay. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, HFE-6(1):24–32, 1965.
- W. R.Ferrell e T. B.Sheridan. Supervisory control of remote manipulation. *IEEE spectrum*, 4(10):81–88, 1967.
- A.Fidêncio, J.Ferreira, G.Freitas, P.Monteiro, F.Campos, H.Azpúrua, e W.Miola. Metodologia para avaliação de interfaces de teleoperação. *XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 2017.
- A. X.Fidêncio. Evaluation of the effects of user profile and interface characteristics on performance during robotic teleoperation. Master’s thesis, Dissertação (Mestrado em

- Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 9 2018.
- D. J.Germani. A mineração no brasil. Technical report, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Ciência, Tecnologia e Inovação, Rio de Janeiro, 2002.
- R. C.Goertz. Mechanical master-slave manipulator. *Nucleonics (US) Ceased publication*, 12, 1954.
- R.Granot e M.Feldman. Agent-based human-robot interaction of a combat bulldozer. In *Unmanned Ground Vehicle Technology VI*, volume 5422, pages 198–205. International Society for Optics and Photonics, 2004.
- R.Gupta, S.Tanwar, S.Tyagi, e N.Kumar. Tactile-internet-based telesurgery system for healthcare 4.0: An architecture, research challenges, and future directions. *IEEE Network*, 33(6):22–29, 2019.
- P. A.Hancock e J. S.Warm. A dynamic model of stress and sustained attention. *Journal of Human Performance in Extreme Environments*, 7(1):4, 2003.
- S. G.Hart. Nasa-task load index (nasa-tlx); 20 years later. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 50(9):904–908, 2006.
- S. G.Hart e L. E.Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology*, volume 52, pages 139–183. Elsevier, 1988.
- V.Hayward e O. R.Astley. Performance measures for haptic interfaces. In *ROBOTICS RESEARCH-INTERNATIONAL SYMPOSIUM-*, volume 7, pages 195–206. MIT PRESS, 1996.
- V.Hayward e K. E.MacLean. Do it yourself haptics: part i. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14(4):88–104, 2007.
- V.Hayward, O. R.Astley, M.Cruz-Hernandez, D.Grant, e G.Robles-De-La-Torre. Haptic interfaces and devices. *Sensor review*, 2004.
- R. M.Held e N. I.Durlach. Telepresence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1):109–112, 1992.
- S.Hirche e M.Buss. Human-oriented control for haptic teleoperation. *Proceedings of the IEEE*, 100(3):623–647, 2012.
- P. F.Hokayem e M. W.Spong. Bilateral teleoperation: An historical survey. *Automatica*, 42(12):2035–2057, 2006.

- A.Huggins e D.Claudio. A performance comparison between the subjective workload analysis technique and the nasa-tlx in a healthcare setting. *IISE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 8(1):59–71, 2018.
- J.Jacobson, S.Bolon, N.Elder, B.Schroer, G.Matthews, J.Sza-arski, M.Raphaelson, e R.Horner. Temporal and subjective work demands in office-bases patient care an exploration of the dimansions of physician work intensivity. *Medical Care*, 49(1):52–58, 2011.
- K.Kozłowski e D.Pazderski. Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot. *International journal of applied mathematics and computer science*, 14:477–496, 2004.
- B.Kuriakose, R.Shrestha, e F. E.Sandnes. Multimodal navigation systems for users with visual impairments—a review and analysis. *Multimodal Technologies and Interaction*, 4(4):73, 2020.
- A. J.Kwitowski, W. H.Lewis, e W. D.Mayercheck. Computer-based, teleoperation of a new highwall mining system. In *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on*, pages 1478–1483. IEEE, 1989.
- T. M.Lam, H. W.Boschloo, M.Mulder, e M. M.Van Paassen. Artificial force field for haptic feedback in uav teleoperation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 39(6):1316–1330, 2009.
- D. M.Lang e S.-S.Chang. Method of estimating life expectancy of electric mining shovels based on cumulative dipper loads, Jan. 15 2009. US Patent App. 12/172,024.
- D.Lee et al. Semi-autonomous haptic teleoperation control architecture of multiple unmanned aerial vehicles. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 18:1334–1345, 08 2013. doi: 10.1109/TMECH.2013.2263963.
- S.Lichiardopol. A survey on teleoperation. *Technische Universitat Eindhoven, DCT report*, 2007.
- M.Lima et al. Realimentação de força para teleoperação de escavadeiras. In *Anais do 14^o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 10 2019. doi: 10.17648/sbai-2019-111291.
- S.Livatino, L. T.De Paolis, M.D’Agostino, A.Zocco, A.Agrimi, A.De Santis, L. V.Bruno, e M.Lapresa. Stereoscopic visualization and 3-d technologies in medical endoscopic teleoperation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(1):525–535, 2014.
- K. E.MacLean e V.Hayward. Do it yourself haptics: Part ii [tutorial]. *IEEE robotics & automation magazine*, 15(1):104–119, 2008.

- Y.Maddahi, S.Liao, W.-k.Fung, e N.Sepehri. Position referenced force augmentation in teleoperated hydraulic manipulators operating under delayed and lossy networks: A pilot study. *Robotics and autonomous systems*, 83:231–242, 2016.
- A.Majewicz e A. M.Okamura. Cartesian and joint space teleoperation for nonholonomic steerable needles. In *2013 World Haptics Conference (WHC)*, pages 395–400. IEEE, 2013.
- M. M.Marinho, B. V.Adorno, K.Harada, K.Deie, A.Deguet, P.Kazanzides, R. H.Taylor, e M.Mitsubishi. A unified framework for the teleoperation of surgical robots in constrained workspaces. In *2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2721–2727. IEEE, may 2019.
- H.Maske et al. Learning task-based instructional policy for excavator-like robots. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2018*, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1962–1969, United States, 9 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/ICRA.2018.8462923.
- T. H.Massie, J. K.Salisbury, et al. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, 55(1):295–300, 1994.
- P. R.McAree, A. W.Reid, K. J.Austin, e P. M.Siegrist. Method for position-calibration of a digging assembly for electric mining shovels, Aug. 20 2013. US Patent 8,515,708.
- R.McAree et al. Mining automation: enhancing precision. *AusIMM Bulletin*, 1(1):48–51, 2018. ISSN 1034-6775.
- J. P.McIntire, P. R.Havig, e E. E.Geiselman. Stereoscopic 3d displays and human performance: A comprehensive review. *Displays*, 35(1):18–26, 2014.
- L.Meli, C.Pacchierotti, e D.Prattichizzo. Experimental evaluation of magnified haptic feedback for robot-assisted needle insertion and palpation. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 13(4):e1809, 2017.
- G.Mingde et al. Performance experiment of a hydraulic force feedback teleoperation robot based on position and rate control. In *2010 Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, volume 2, pages 87–90. IEEE, 2010.
- M.Minsky. Telepresence. *Omni*, pages 45–51, 1980.

- L.Moreira e R.Ruschel. Augmented reality owner manual evaluation by nasa tlx method. In *2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, pages 150–156. IEEE, 2018.
- Y.Nakamura e H.Hanafusa. Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 108(3):163–171, 1986.
- NASA. Nasa task load index (tlx): Paper and pencil package (version 1.0). *Moffett Field, CA: Human Research Performance Group. NASA Ames Research Center*, 1986.
- J.Norris e S.Davidoff. Nasa telexploration project demo. In *Virtual Reality (VR), 2014 iEEE*, pages 183–184. IEEE, 2014.
- J.Ollas e S.Soltaniah. Bilateral teleoperation: A study of architectures under different network delays. Master’s thesis, School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, 2020.
- S.Owada e Y.Tsumaki. Direction consistent approach for telepresence system with miniature humanoid robot. In *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pages 1602–1607. IEEE, 2017.
- C.Pacchierotti, F.Chinello, e D.Prattichizzo. Cutaneous device for teleoperated needle insertion. In *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, pages 32–37. IEEE, 2012.
- C.Pacchierotti, M.Abayazid, S.Misra, e D.Prattichizzo. Teleoperation of steerable flexible needles by combining kinesthetic and vibratory feedback. *IEEE transactions on haptics*, 7(4):551–556, 2014.
- A. J.Park e R. N.Kazman. Augmented reality for mining teleoperation. In *Telemanipulator and Telepresence Technologies*, volume 2351, pages 119–130. International Society for Optics and Photonics, 1995.
- J.Park e O.Khatib. A haptic teleoperation approach based on contact force control. *The International Journal of Robotics Research*, 25(5-6):575–591, may 2006. doi: 10.1177/0278364906065385.
- C.Patrone, A.Cella, C.Martini, S.Pericu, R.Femia, A.Barla, C.Porfirione, M.Puntoni, N.Veronese, F.Odone, et al. Development of a smart post-hospitalization facility for older people by using domotics, robotics, and automated tele-monitoring. *Geriatric Care*, 5(1), 2019.

- A.Peer, H.Pongrac, e M.Buss. Influence of varied human movement control on task performance and feeling of telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 19(5):463–481, 2010.
- J.Pentzer, S.Brennan, e K.Reichard. Model-based prediction of skid-steer robot kinematics using online estimation of track instantaneous centers of rotation. *Journal of Field Robotics*, 31(3):455–476, 2014.
- S. S.Potter e J. R.Bressler. Subjective workload assessment technique (swat): a user’s guide. Technical report, SYSTEMS RESEARCH LABS INC DAYTON OH, 1989.
- M. M.Rahman, M. V.Balakuntala, G.Gonzalez, M.Agarwal, U.Kaur, V. L.Venkatesh, N.Sanchez-Tamayo, Y.Xue, R. M.Voyles, V.Aggarwal, et al. Sartres: a semi-autonomous robot teleoperation environment for surgery. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 9(4):376–383, 2021.
- J. C.Ralston e D. W.Hainsworth. The numbat: A remotely controlled mine emergency response vehicle. In *Field and Service Robotics*, pages 53–59. Springer, 1998.
- J. C.Ralston, D. W.Hainsworth, D. C.Reid, D.Anderson, e R. J.McPhee. Recent advances in remote coal mining machine sensing, guidance, and teleoperation. *Robotica*, 19(5): 513–526, 2001.
- P. B.Reid, M. T.Dunn, D. C.Reid, e J. C.Ralston. Real-world automation: New capabilities for underground longwall mining. In *Proc. Australasian Conf. Robotics and Automation 2010*, 2010.
- P.Rezeck, B.Frade, J.Soares, L.Pinto, F.Cadar, H.Azpurua, D. G.Macharet, L.Chaimowicz, G.Freitas, e M. F.Campos. Framework for haptic teleoperation of a remote robotic arm device. In *2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pages 170–175. IEEE, 2018a.
- P.Rezeck et al. An immersion enhancing robotic head-like device for teleoperation. In *2018 Latin American Robotic Symposium*. IEEE, nov 2018b. doi: 10.1109/lars/sbr/wre.2018.00038. URL <https://doi.org/10.1109/lars/sbr/wre.2018.00038>.
- S.Rubio, E.Díaz, J.Martín, e J. M.Puente. Evaluation of subjective mental workload: A comparison of swat, nasa-tlx, and workload profile methods. *Applied psychology*, 53(1): 61–86, 2004.
- J.Sánchez e M.Lumbreras. Virtual environment interaction through 3d audio by blind children. *CyberPsychology & Behavior*, 2(2):101–111, 1999.

- M.Selvaggio, F.Abi-Farraj, C.Pacchierotti, P. R.Giordano, e B.Siciliano. Haptic-based shared-control methods for a dual-arm system. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4):4249–4256, 2018.
- M.Shahbazi, S. F.Atashzar, e R. V.Patel. A systematic review of multilateral teleoperation systems. *IEEE transactions on haptics*, 11(3):338–356, 2018.
- H.Shen, Y.-J.Pan, e B.He. Teleoperation of multiple cooperative slave manipulators using graph-based non-singular terminal sliding-mode control. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 1430–1435. IEEE, 2017.
- T. B.Sheridan. Telerobotics. *Automatica*, 25(4):487–507, 1989.
- T. B.Sheridan. Teleoperation, telerobotics and telepresence: A progress report. *Control Engineering Practice*, 3(2):205–214, 1995.
- T. B.Sheridan. Further musings on the psychophysics of presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 5(2):241–246, 1996.
- T. B.Sheridan e W. R.Ferrell. Remote manipulative control with transmission delay. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 4(1):25–29, 1963.
- B.Siciliano e O.Khatib. *Springer handbook of robotics*. Springer, 2016.
- B.Siciliano, L.Sciavicco, L.Villani, e G.Oriolo. *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media, 2010.
- T.Smith e K.Smith. Human factors of workstation telepresence. In *Third annual workshop on SOAR*, volume 89, pages 235–250, 1990.
- K.Spitz e J.Trudinger. *Mining and the environment: from ore to metal*. CRC Press, 2019.
- M. W.Spong, S.Hutchinson, M.Vidyasagar, et al. *Robot modeling and control*. John Wiley & Sons, 2006.
- J.Steuer. Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of communication*, 42(4):73–93, 1992.
- F.Stroppa, M.Selvaggio, N.Agharese, L. H.Blumenschein, E. W.Hawkes, A. M.Okamura, et al. Shared-control teleoperation paradigms on a soft growing robot manipulator. *arXiv preprint arXiv:2108.00677*, 2021.
- S.Thrun, D.Haehnel, D.Ferguson, M.Montemerlo, R.Triebel, W.Burgard, C. R.Baker, Z.Omohundro, S.Thayer, e W. R. L.Whittaker. A system for volumetric robotic mapping of abandoned mines. In *Proceedings of (ICRA) International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 4270 – 4275, September 2003.

- D.Travis, T.Watson, e M.Atyeo. Human psychology in virtual environments. *Interacting with virtual environments*, pages 43–59, 1994.
- E.Triantafyllidis e Z.Li. Considerations and challenges of measuring operator performance in telepresence and teleoperation entailing mixed reality technologies. *arXiv preprint arXiv:2103.12702*, 2021.
- P. S.Tsang e V. L.Velazquez. Diagnosticity and multidimensional subjective workload ratings. *Ergonomics*, 39(3):358–381, 1996.
- O.Vermesan, R.Bahr, M.Ottella, M.Serrano, T.Karlsen, T.Wahlstrøm, H.-E.Sand, M.Ashwathnarayan, e M. T.Gamba. Internet of robotic things intelligent connectivity and platforms. *Frontiers in Robotics and AI*, 7:104, 2020.
- C.Wickens. Processing resources and attention. multiple-task performance. dl damos, 1991.
- N.Zemiti, T.Ortmaier, e G.Morel. A new robot for force control in minimally invasive surgery. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)*, volume 4, pages 3643–3648. IEEE, 2004.
- G.Zhai, W.Zhang, W.Hu, e Z.Ji. Coal mine rescue robots based on binocular vision: A review of the state of the art. *IEEE Access*, 8:130561–130575, 2020.

Apêndice A

Corpos Rígidos, Descrição Espacial e Cinemática

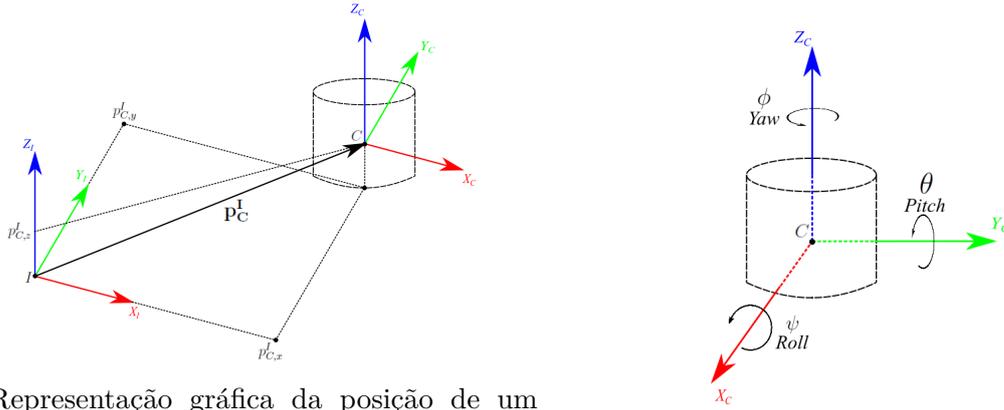
Um corpo rígido pode ser definido como um objeto em que a forma não varia ao ser submetido à ação de forças externas. Ou seja, a distância entre as diferentes partículas que o compõem mantém-se invariável ao longo do tempo. A estrutura mecânica de robôs móveis com rodas normalmente consistem em um corpo rígido (base ou chassi) e um sistema de rodas que fornece movimento em relação ao solo. Já um robô manipulador consiste em uma sequência de corpos rígidos (elos) interligados por meio de articulações (juntas). Assim, a movimentação dos corpos pode ser estudada considerando um único ponto, facilitando a interpretação dos modelos matemáticos. A posição e a orientação de um corpo rígido no espaço são denominadas coletivamente de *pose* que no espaço euclidiano tridimensional tem seis graus de liberdade, do inglês, *degrees of freedom* (DoFs): três para posição e três para orientação. Portanto, DoF pode ser entendido como o quantidade mínima de parâmetros para definir os movimentos independentes de um corpo rígido.

O posicionamento de um corpo rígido é expresso utilizando dois sistemas de coordenadas, um dos quais pode ser referido como móvel, enquanto o outro pode ser referido como fixo. Portanto, para representar a translação do sistema de coordenadas de um corpo rígido C com respeito ao sistema de coordenadas inercial I é utilizado um vetor $\mathbf{p}_C^I \in \mathbb{R}^3$, como mostrado na Equação A.1:

$$\mathbf{p}_C^I = \begin{bmatrix} p_{C,x}^I \\ p_{C,y}^I \\ p_{C,z}^I \end{bmatrix}, \quad (\text{A.1})$$

onde $p_{C,x}^I$, $p_{C,y}^I$ e $p_{C,z}^I$ são as componentes X_I , Y_I e Z_I do sistema de coordenadas inercial, conforme ilustrado na Figura 44(a).

Rotação elementar é um deslocamento em que pelo menos um ponto do corpo



(a) Representação gráfica da posição de um corpo rígido, acoplado ao sistema de coordenadas C , com respeito ao sistema de coordenadas inercial I .

(b) Representação das rotações, utilizando os ângulos *roll*, *pitch* e *yaw*, de um corpo rígido em relação ao sistema de coordenadas I .

Figura 44 – Representação da *pose* de um corpo rígido.

rígido permanece em sua posição inicial e apenas um eixo do sistema de coordenadas C do corpo permanece paralelo a sua orientação inicial. A forma mais comum de representar uma rotação, seja ela elementar ou não, é por meio da matriz de rotação que pertence ao Grupo Especial Ortogonal de dimensão n ($SO(n)$), a depender da natureza do movimento. Rotações de corpo rígido que tem seus movimentos restritos em um plano pertencem ao Grupo Especial Ortogonal bidimensional ($SO(2)$). De maneira análoga, rotações de corpos que se movem livremente no espaço euclidiano tridimensional pertencem ao Grupo Especial Ortogonal tridimensional ($SO(3)$). Uma forma de representar o grupo matricial $SO(n)$ é dado pela Equação A.2:

$$SO(n) = \{\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{n \times n} : \mathbf{R}\mathbf{R}^T = \mathbf{I}_{n \times n} \text{ e } \det(\mathbf{R}) = 1\}, \quad (\text{A.2})$$

onde $\mathbf{I}_{n \times n}$ é uma matriz identidade de ordem n .

Além das matrizes de rotação, é usual na robótica, serem utilizadas representações mínimas por ângulos de Euler ou por ângulos RPY. Ambos decompõem a matriz de rotação em 3 rotações elementares, no caso de não haver nenhuma restrição de movimento, porém, a primeira utiliza os eixos do sistema de coordenadas do corpo como referência, já a segunda utiliza os eixos do sistema de coordenadas inercial, conforme ilustrado na Figura 44(b).

A orientação do sistema de coordenadas C com respeito ao sistema de coordenadas inercial I utilizando a representação mínima por ângulos RPY é dada por:

$$\varphi_C^I = \begin{bmatrix} \phi_C^I \\ \theta_C^I \\ \psi_C^I \end{bmatrix}, \quad (\text{A.3})$$

onde ϕ_C^I representa uma rotação em torno do eixo X_I (ângulo de *roll*), θ_C^I uma rotação em torno do eixo Y_I (ângulo *pitch*) e ψ_C^I uma rotação em torno do eixo Z_I (ângulo *yaw*), todas em relação ao sistema inercial I .

Posto isso, uma matriz \mathbf{R} , na representação mínima de RPY, equivale à multiplicação das matrizes de rotações elementares, conforme mostrado na Equação A.4:

$$\mathbf{R}_C^I = \mathbf{R}_{Z_I}(\phi)\mathbf{R}_{Y_I}(\theta)\mathbf{R}_{X_I}(\psi),$$

$$\mathbf{R}_C^I = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix}, \quad (\text{A.4})$$

onde $\mathbf{R}_{X_I}(\psi)$, $\mathbf{R}_{Y_I}(\theta)$ e $\mathbf{R}_{Z_I}(\phi)$ são as matrizes de rotações elementares ao redor dos eixos X_I , Y_I e Z_I dadas pelos ângulos ϕ , θ e ψ respectivamente.

É útil resolver o problema inverso, ou seja, determinar o conjunto de ângulos da representação mínima correspondente a uma dada matriz de rotação:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (\text{A.5})$$

Comparando as Equações A.5 e A.4, considerando uma representação pelos ângulos de RPY, o conjunto solução, considerando o ângulo θ no intervalo $(-\pi/2, \pi/2)$ é:

$$\begin{aligned} \psi &= \text{atan2}(r_{21}, r_{11}), \\ \theta &= \text{atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}), \\ \phi &= \text{atan2}(r_{32}, r_{33}). \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

A outra solução equivalente, o ângulo θ no intervalo $(\pi/2, 3\pi/2)$ é:

$$\begin{aligned} \psi &= \text{atan2}(-r_{21}, -r_{11}), \\ \theta &= \text{atan2}(-r_{31}, -\sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}), \\ \phi &= \text{atan2}(-r_{32}, -r_{33}). \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

As soluções das Equações A.6 e A.7 são singulares quando $\cos \theta = 0$; neste caso, é possível determinar apenas a soma ou diferença de ϕ e ψ .

Outra representação utilizada para descrever rotações 3D é descrita por meio de quatérnios definidos como $\mathcal{Q} = \{\eta, \epsilon\}$, onde:

$$\eta = \cos \frac{\delta}{2}, \quad (\text{A.8})$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \sin \frac{\delta}{2} \mathbf{r}, \quad (\text{A.9})$$

em que $\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_x & r_y & r_z \end{bmatrix}^T$ é o vetor unitário de um eixo de rotação em relação ao referencial do sistema de coordenadas do corpo e δ é o ângulo de rotação em torno do eixo \mathbf{r} ; η é chamada de parte escalar do quatérnio, enquanto $\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \epsilon_y & \epsilon_z \end{bmatrix}^T$ é chamada de parte vetorial do quatérnio. O sistema está condicionado a uma restrição de norma unitária, tal que:

$$\eta^2 + \epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2 = 1, \quad (\text{A.10})$$

portanto, o nome quatérnio unitário.

A *pose* χ_C^I de um corpo rígido em C com respeito ao sistema de coordenadas I é composta pela posição \mathbf{p}_C^I e pela orientação, utilizando a representação mínima de orientação φ_C^I , conforme Equação A.11:

$$\chi_C^I = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_C^I \\ \varphi_C^I \end{bmatrix}. \quad (\text{A.11})$$

Até o momento, foram apresentadas representações de translações puras ou rotações puras. Outra forma de se representar o movimento a partir da transformação entre sistemas de coordenadas é utilizando a MTH $\mathbf{H} \in SE(n)$, onde $SE(n)$ é o chamado Grupo Especial Euclidiano de dimensão n . Uma forma de representar o grupo matricial $SE(n)$ é dado pela Equação A.12:

$$SE(n) = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0}_{1 \times n} & 1 \end{bmatrix} : \mathbf{R} \in SO(n) \text{ e } \mathbf{p} \in \mathbb{R}^n \right\}, \quad (\text{A.12})$$

onde $\mathbf{0}_{1 \times n} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ é um vetor linha nulo com n posições.

De maneira análoga às matrizes de rotação, a MTH de um corpo rígido que tem seus movimentos restritos em um plano pertencem ao Grupo Especial Euclidiano bidimensional ($SE(2)$), já corpos que se movem livremente no espaço euclidiano tridimensional tem sua MTH pertencente ao Grupo Especial Euclidiano tridimensional ($SE(3)$). A MTH que representa a transformação de coordenadas da *pose* do sistema C , sem nenhuma restrição de movimento, em relação ao I pode ser representada conforme mostrado na Equação A.13:

$$\mathbf{H}_C^I = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_C^I & \mathbf{p}_C^I \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.13})$$

onde $\mathbf{0}_{1 \times 3} \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$ é um vetor linha nulo. Vale lembrar que as dimensões das matrizes de rotação, do vetor de translação e do vetor nulo variam de acordo com a dimensão do espaço da tarefa.

As transformações do sistema de coordenadas inercial em sistema de coordenadas do corpo é variável no tempo e, portanto, pode ser definida pela cinemática do objeto. Em robótica, a cinemática relaciona o vetor de configuração de um robô (\mathbf{q}_C) à sua *pose* composta pelos vetores de posição (\mathbf{p}_C^I) e de orientação (φ_C^I) do sistema de coordenadas do corpo rígido com relação ao inercial. Um exemplo de uma relação cinemática é a direta, onde dado \mathbf{q}_C , é possível calcular a posição e orientação do sistema de coordenadas do corpo C em relação ao sistema inercial I por meio da Equação A.14:

$$\mathbf{x}_C^I = \Gamma(\mathbf{q}_C, \mathbf{T}_{\text{kin}}), \quad (\text{A.14})$$

onde $\Gamma(\cdot)$ é uma função não linear e \mathbf{T}_{kin} é um vetor de parâmetros cinemáticos fixos que descrevem a relação entre os sistemas de coordenadas envolvidos nas transformações.

Outra forma de representar essas transformações é através da cinemática diferencial, onde a relação entre o vetor de velocidades generalizadas ($\dot{\mathbf{q}}_C$) e o vetor de velocidades lineares e angulares de um robô ($\dot{\mathbf{x}}_C$) é determinada pela matriz Jacobiana do corpo (\mathbf{J}_C) da relação cinemática direta, conforme apresentado na Equação A.15:

$$\dot{\mathbf{x}}_C = \frac{\partial \Gamma(\mathbf{q}_C, \mathbf{T}_{\text{kin}})}{\partial \mathbf{q}_C} \dot{\mathbf{q}}_C = \mathbf{J}_C(\mathbf{q}_C) \dot{\mathbf{q}}_C. \quad (\text{A.15})$$

A relação entre derivadas superiores pode ser encontrada pela diferenciação da expressão acima, por exemplo, $\ddot{\mathbf{x}}_C = \mathbf{J}_C(\mathbf{q}_C) \ddot{\mathbf{q}}_C + \dot{\mathbf{J}}_C(\mathbf{q}_C) \dot{\mathbf{q}}_C$.

A Jacobiana é útil em muitos aspectos da robótica, por exemplo, em transformação de forças e torques, que atuam no efetuador de um manipulador, em torque correspondente das juntas; no controle cinemático, tanto em robótica móvel quanto no estudo de manipuladores robóticos, para gerar movimentos suaves nos atuadores; e até mesmo para calcular o modelo dinâmico de robôs.

Apêndice B

Convenção de Denavit-Haterberg (DH)

A análise cinemática de um manipulador de n elos pode ser extremamente complexa, portanto convenções podem simplificar consideravelmente esta análise. Além disso, elas permitem uma linguagem universal para modelagem de robôs.

A convenção mais comumente usada para selecionar sistemas de coordenadas de referência em aplicações robóticas é de Denavit-Haterberg (DH). Nesta convenção, cada transformação homogênea \mathbf{H}_i^{i-1} é representada como um produto de quatro transformações básicas conforme mostrado na Figura 45.

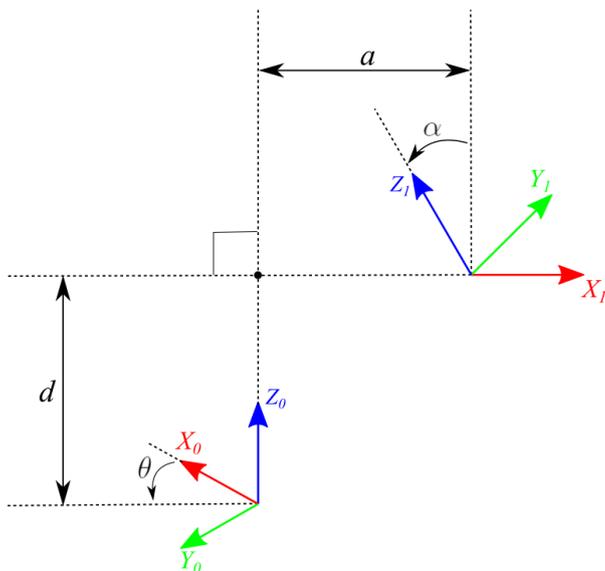


Figura 45 – Sistemas de coordenadas satisfazendo as premissas DH1 e DH2.

As transformações mostradas na Figura 45 são representadas por meio da Equação

ção B.1.

$$\mathbf{H}_i^{i-1} = \text{Rot}_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,a_i} \text{Rot}_{x,\alpha_i},$$

$$\mathbf{H}_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{B.1})$$

onde as quatro grandezas α_i , a_i , d_i , θ_i são parâmetros associados ao elo i e à junta i . Os quatro parâmetros a_i , α_i , d_i e θ_i na Equação B.1 geralmente recebem os nomes comprimento do elo, torção do elo, deslocamento do elo e ângulo da junta, respectivamente. Esses nomes derivam de aspectos específicos da relação geométrica entre dois sistemas de coordenadas. Uma vez que \mathbf{H}_i^{i-1} é uma função de uma única variável, três das quatro quantidades acima são constantes para um determinado elo, enquanto o quarto é o parâmetro, θ_i para uma junta de revolução e d_i para uma junta prismática, é variável.

A representação DH é possível ser caracterizada por apenas quatro parâmetros, ao invés de seis, devido às duas premissas sobre dois sistemas de coordenadas $i-1$ e i , apresentadas na Tabela 5. Estas duas restrições estão ilustradas na Figura 45.

Tabela 5 – Premissas dos sistemas de coordenadas de DH.

(DH1) O eixo x_i é perpendicular ao eixo z_{i-1} .

(DH2) O eixo x_i intersecta o eixo z_{i-1} .
