

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

GUSTAVO EISMANN SOUZA

**SISTEMA DE CONTROLE INTUITIVO BASEADO NA
CAPTURA DE MOVIMENTOS DO BRAÇO HUMANO PARA
OPERAÇÃO DE MANIPULADORES ROBÓTICOS**

**São Leopoldo, RS
2022**

Gustavo Eismann Souza

**SISTEMA DE CONTROLE INTUITIVO BASEADO NA
CAPTURA DE MOVIMENTOS DO BRAÇO HUMANO PARA
OPERAÇÃO DE MANIPULADORES ROBÓTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Controle e Automação, pelo
Curso de Engenharia de Controle e
Automação da Universidade do Vale do
Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Marques de Figueiredo

São Leopoldo, RS

2022

RESUMO

Com o avanço da robótica, muitos campos de pesquisa, como a indústria nuclear ou a indústria aeroespacial, buscam soluções para manipulação de experimentos, ou produtos, de maneira remota, utilizando manipuladores robóticos controlados por operários humanos para executar tarefas em ambientes de risco, sem expor o operário a tais riscos. Atualmente, existem diversos tipos de dispositivos de controle para operar manualmente um manipulador robótico, como joysticks, teclado, mouse, botoeira, touchscreen, entre outros. No entanto, estes dispositivos de controles, embora sejam simples, não são tão intuitivos, fazendo com que uma simples tarefa de manipulação exija horas de treinamento prévio. Para muitas aplicações, não há necessidade de um operador controlar manualmente o robô. Sistemas autônomos, ou semiautônomos, podem ser facilmente supervisionados e operados através de funções pré-programadas. Porém, algumas aplicações de manipulação específicas, como o desarmamento de explosivos ou descarte de materiais radioativos, requerem um cuidado maior, possivelmente necessitando do controle manual. O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle para manipuladores robóticos, utilizando um método de fusão de dados para monitorar os movimentos do braço de um operador humano, e replicar os movimentos em um manipulador robótico que estaria em uma região de operação hostil ao ser humano, proporcionando maior destreza na execução de tarefas que necessitam de um certo grau de precisão.

Palavras-chave: controle, MEMS, inercial, magnético, Madgwick, Kalman, robótica, manipulador, fusão de sensores, instrumentação, ambientes de risco.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O sistema robótico <i>Julius</i> , nomeado em homenagem ao matemático e engenheiro alemão Julius Ludwig Weisbach.....	13
Figura 2 – O sistema robótico ROBHAZ-DT2.....	14
Figura 3 – Robô BROKK, equipado com uma garra, sendo utilizado para uma tarefa de <i>pick-and-place</i> no sitio nuclear de Sellafield, UK. O operador humano pode ser visto controlando o robô por trás de uma janela de vidro de chumbo de 1,6m de espessura, assim o protegendo da radiação.....	15
Figura 4 – a) O sistema robótico Telerob EMSM-2B para o acelerador SNS, no Laboratório Nacional de Oak Ridge, e b) o servo-manipulador Mascot IV remotamente operado dentro do equipamento JET, do Centro Culham de Energia de Fusão.	16
Figura 5 – Ilustração de um robô manipulador PUMA, identificando suas juntas e elos.....	17
Figura 6 – Ilustração da estrutura e dos sistemas de coordenadas angulares das juntas (esquerda) e coordenadas Cartesiano (direita) do manipulador DOBOT Magician.....	18
Figura 7 – Graus de liberdade do braço humano e do manipulador robótico.....	20
Figura 8 – Interação do operador com dois braços robóticos através do controle com sensores de movimento Razer Hydra.	21
Figura 9 – Componentes da estação de operação remota da escavadeira.	22
Figura 10 – Sistemas de coordenadas dos dispositivos de medição.	23
Figura 11 – Diagrama de um acelerômetro com a tecnologia MEMS.	24
Figura 12 – Ilustração do princípio de operação de um acelerômetro com a tecnologia MEMS.	25
Figura 13 – Orientações do sensor com relação a aceleração da gravidade.....	26
Figura 14 – Gráfico dos sinais do acelerômetro padrão (superior) e gráfico dos sinais do acelerômetro calibrados (inferior).	27
Figura 15 – Estimativa de velocidade e posição de veículos ferroviários inteligentes.	28
Figura 16 – Fluxograma das etapas do projeto.	58
Figura 17 – Diagrama do funcionamento do sistema proposto.	60
Figura 18 – Diagrama de blocos do controle.....	61

Figura 19 – Diagrama de blocos do sistema operacional do manipulador robótico. .	62
Figura 20 – MPU-9250, integrado no módulo de desenvolvimento GY-9250.	63
Figura 21 – Módulo Microcontrolador ESP32.....	64
Figura 22 – Botões do controle e suas funções.	64
Figura 23 – Compensação da distorção magnética do tipo <i>hard-iron</i>	65
Figura 24 – Obtenção do sistema de referência do dispositivo.	67
Figura 25 – Representação em diagrama de blocos do filtro orientacional completo para a implementação de uma matriz de sensores MARG.	67
Figura 26 – Influência da aceleração da gravidade na massa de prova (sistema bidimensional).	69
Figura 27 – Influência da aceleração da gravidade na massa de prova (sistema tridimensional).	70
Figura 28 – Gráfico de comparação dos valores de velocidade predita pela equação de movimento uniformemente variado e velocidade estimada pelo Filtro de Kalman.	72
Figura 29 – Comparações de aceleração medida e aceleração real (a) no eixo x, (b) no eixo y e (c) no eixo z.	75
Figura 30 – Relação das velocidades estimadas pelo Filtro de Kalman com as velocidades preditas pelo método de integração comum realizadas (a) no eixo x, (b) no eixo y e (c) no eixo z.	77
Figura 31 – PCI do sistema prototipada e posicionada dentro do controle.	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo de metodologias para aplicação de manipuladores robóticos em ambientes ou cenários de risco.....	40
Quadro 2 - Resumo de metodologias para o processamento e fusão de dados de sensores.....	55
Quadro 3 - Resultados do método de compensação da aceleração da gravidade. ..	74

LISTA DE SIGLAS

DoF	Graus de Liberdade (<i>Degrees of Freedom</i>)
HRI	Interface Humano-Robô (<i>Human-Robot Interface</i>)
IMU	Unidade de Medição Inercial (<i>Inertial Measurement Unit</i>)
INS	Sistema de Navegação Inercial (<i>Inertial Navigation System</i>)
MEMS	Sistemas Microeletromecânicos (<i>Microelectromechanical Systems</i>)
MoCap	Captura de Movimentos (<i>Motion Capture</i>)
LIDAR	Detecção de Luz e Alcance (<i>Light Detection and Ranging</i>)
SSB	Smart Sensor Boxes
EOD	Descarte de Munição Explosiva (<i>Explosive Ordinance Disposal</i>)
ORNL	Laboratório Nacional de Oak Ridge (<i>Oak Ridge National Laboratory</i>)
JET	Joint European Torus
CCFE	Centro Culham de Energia de Fusão (<i>Culham Centre for Fusion Energy</i>)
PTP	Ponto-a-Ponto (<i>Point-to-Point</i>)
GUI	Interface Gráfica de Usuário (<i>Graphical User Interface</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Tema	9
1.2 Delimitação do Tema	9
1.3 Problema	9
1.4 Objetivos	10
1.4.1 Objetivo geral	10
1.4.2 Objetivos específicos.....	10
1.5 Justificativa.....	11
1.6 Organização da Monografia	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 Conceitos Básicos	12
2.1.1 Robôs aplicados em ambientes e cenários de risco	12
2.1.2 Manipuladores robóticos	17
2.1.3 Relação entre o braço humano e um braço robótico.....	19
2.1.4 Interação e interface humano-máquina.....	21
2.1.5 Sensores para captura de movimentos e fusão de dados.....	24
2.2 Manipuladores Robóticos em Ambientes de Risco	28
2.3 Processamento e Fusão de Dados de Sensores	41
3 METODOLOGIA	57
3.1 Visão Geral do Projeto	57
3.2 Sistema Proposto	59
3.3 Desenvolvimento e Funcionamento do Sistema	63
3.3.1. Sensores, Comandos e Microcontrolador	63
3.3.2. Método de Compensação para Distorções Magnéticas	65
3.3.3. Fusão de Sensores	66
3.3.4. Método de Compensação da Aceleração da Gravidade	68
3.3.5. Estimação da Velocidade do Movimento e Atenuação de Ruído	71
3.3.6. Interface com o Manipulador Robótico	73
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
4.1 Compensação da Aceleração da Gravidade	74
4.2 Estimação de Velocidade e Erro de Integração.....	76
4.3 Integração do Sistema Proposto com o Manipulador Robótico	78

5 CONCLUSÃO80
6 TRABALHOS FUTUROS.....81
REFERÊNCIAS.....82

1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista aplicações como a manipulação de materiais radioativos ou químicos, o desarmamento de bombas e outras necessidades que envolvem risco a vida de um operário humano, este trabalho aborda o projeto e desenvolvimento de um sistema de captura de movimentos para o controle de manipuladores robóticos remotamente operados. Assim, profissionais com conhecimento para realizar tarefas específicas e que requerem precisão, mas sem noção de controle de manipuladores, podem operar braços robóticos apenas com o movimento do próprio braço humano.

1.1 Tema

O projeto envolve o desenvolvimento mecânico e eletrônico de um sistema de captura de movimentos por fusão de dados de sensores eletromecânicos, aplicado a manipuladores robóticos. Em teoria, o sistema pode ser adaptado para qualquer manipulador, pois todo o processamento dos dados será realizado na unidade de processamento do sistema proposto.

1.2 Delimitação do Tema

O escopo deste trabalho engloba o projeto e desenvolvimento de um controle portando sensores para a aquisição de informações de movimento da mão de um operador, processar estas informações e utilizá-las como entrada de controle para manipuladores robóticos. O sistema proposto simula uma captura de movimentos, mas sem a necessidade de sistemas ópticos ou instalações pré-estruturadas.

1.3 Problema

Com o avanço da robótica, muitos campos de pesquisa, como a indústria nuclear ou a indústria aeroespacial, buscam soluções para manipulação de experimentos, ou produtos, de maneira remota, utilizando manipuladores robóticos controlados por operários humanos para executar tarefas em ambientes de risco, sem expor o operário a tais riscos.

Atualmente, existem diversos tipos de dispositivos de controle para operar manualmente um manipulador robótico, como joysticks, teclado, mouse, botoeiras,

touchscreen, entre outros. No entanto, estes dispositivos de controle tradicionais, embora pareçam simples, não são tão intuitivos de operar, sendo que uma simples tarefa de manipulação pode demandar horas, ou até dias de treinamento, além de gerar custos para capacitar cada operador.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle para manipuladores robóticos, utilizando um método de fusão de dados para monitorar os movimentos dos braços de um operador humano, e replicar os movimentos nos braços robóticos.

1.4.2 Objetivos específicos

O projeto como um todo, pode ser dividido em quatro etapas sequenciais. Cada etapa possui um objetivo específico que permite o desenvolvimento de uma etapa subsequente. O primeiro objetivo é realizar a aquisição das informações de movimento dos braços do usuário, utilizando um controle para representar a ferramenta do manipulador.

Como segundo objetivo, é necessário processar os dados coletados, implementando técnicas de controle digital para remover ruídos e calibrar os sensores. Além disso, também envolvendo o uso de técnicas de controle digital, é realizada a fusão dos dados dos sensores, permitindo compensar os erros associados ao método de medição dos sensores.

Com os dados tratados e a captura de movimentos validada, o próximo objetivo é transmitir essas informações para o sistema do manipulador robótico. Para isso, é necessário avaliar o tempo de resposta de diferentes abordagens (via cabo ou *wireless*) e protocolos de rede, garantido que os movimentos sejam executados com precisão pelo manipulador.

Como objetivo final, é necessário programar o manipulador para responder adequadamente às informações recebidas, atuando os servomotores de cada eixo de acordo com os dados que caracterizam o movimento do operador.

1.5 Justificativa

Para muitas aplicações, não há necessidade de um operador controlar manualmente o robô. Sistemas autônomos, ou semiautônomos, podem ser facilmente supervisionados e operados através de funções pré-programadas. No entanto, algumas aplicações de manipulação específicas, como o desarmamento de explosivos ou descarte de materiais radioativos, requerem um cuidado maior, possivelmente necessitando do controle manual.

O controle de manipuladores robóticos é um campo de aplicação bem fundamentado. Os métodos de controle tradicionais envolvem dispositivos manuais como teclado, mouse ou joystick, no entanto, saber operar manipuladores com tais dispositivos requer um treinamento que, muitas vezes, pode ser extenso e pode variar de acordo com o modelo de manipulador.

1.6 Organização da Monografia

Este trabalho está organizado na seguinte estrutura:

- O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do trabalho, descrevendo os conceitos básicos e outros trabalhos relacionados aos assuntos de manipuladores robóticos em ambientes de risco e métodos de processamento e fusão de dados.
- No capítulo 3 é apresentada a visão geral do projeto desenvolvido neste trabalho, descrevendo o sistema proposto e os métodos de calibração, compensação e implementação dos sensores inerciais e magnéticos, além da integração do sistema de controle com um manipulador robótico.
- O capítulo 4 expõe os resultados obtidos, a análise sobre estes resultados e as dificuldades que surgiram em cada etapa de desenvolvimento.
- No capítulo 5 é apresentada a conclusão e os trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os conhecimentos necessários para o melhor entendimento do trabalho. Inicialmente são introduzidos os conceitos básicos, equipamentos, métodos, grandezas e normas consideradas, e então são explorados trabalhos relacionados ao assunto tratado, fundamentando o Estado da Arte.

2.1 Conceitos Básicos

Nesta seção, serão apresentados os conceitos básicos, siglas e termos para o entendimento das disciplinas expostas no trabalho.

O controle de manipuladores robóticos é um campo de estudo bastante amplo, separado em três grandes categorias: o controle manual, o controle semiautônomo e o controle autônomo. Para realização de tarefas que requerem precisão e ao mesmo tempo possuem fatores não-determinísticos relacionados a tarefas específicas, como por exemplo a manipulação e descarte de materiais radioativos, o controle automático deixa de ser a melhor opção. Além disso, os métodos de controle manuais são pouco intuitivos, e requerem treinamento especializado, tornando os métodos de controle semiautônomos mais adequados para esse tipo de situação, dando ao operador a liberdade de controle manual, mas auxiliando com funções pré-programadas.

Iniciaremos definindo os ambientes e cenários de risco, os quais o uso de manipuladores robóticos remotamente operados podem substituir operários humanos. Na sequência, será apresentado o método de captura de movimentos para replicar movimentos humanos em manipuladores robóticos e técnicas de processamento e fusão das informações de movimento para garantir precisão e estabilidade.

2.1.1 Robôs aplicados em ambientes e cenários de risco

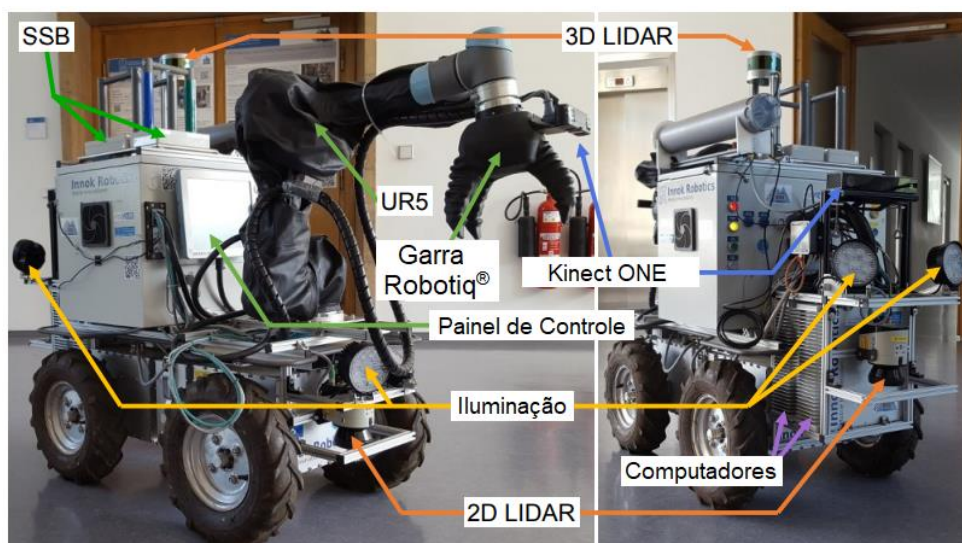
Fazer classificação geral de ambientes de risco seria uma tarefa extensa e proporcionaria um trabalho, ou até mesmo um livro, só para este tópico. Portanto, para o presente trabalho, os ambientes e cenários de risco abordados são específicos para situações em que operários humanos podem ser substituídos por robôs de manipulação, sejam eles móveis ou fixos, remotamente operados.

Como observado no trabalho de Trevelyan *et al.* (2008), os perigos envolvidos em ambientes de risco podem estar presentes na forma de temperaturas extremas, altos níveis de radiação, substâncias tóxicas, riscos de explosão, riscos de eletrocussão, níveis de pressão muito altos, como ambientes subaquáticos, ou também a ausência de ar respirável.

Detecção e desarmamento de minas terrestres, manobras de combate a incêndio, operações de resgate pós-terremotos, limpeza de áreas contaminadas por radiação, manipulação de reagentes químicos, exploração marinha e exploração espacial são exemplos de cenários onde a intervenção humana requer equipamentos para a proteção e sustentabilidade do operário, além dos equipamentos necessários para cumprir a tarefa designada. A implementação de robôs remotamente operados pode ser uma alternativa, removendo operários humanos da exposição aos riscos que o ambiente de operação apresenta.

Lösch *et al.* (2018), introduz seu trabalho citando o número de ocorrências de desastres em minas subterrâneas de carvão e metais. De 1839 até 2010 foram registrados 726 desastres em minas subterrâneas, apenas nos Estados Unidos, resultando em 15.269 mortes. A fim de reduzir o número de operários expostos aos riscos em minerações, os autores propõem o design de um robô autônomo (Figura 1) para mapeamento, navegação e manipulação para auxiliar nas minas, além de auxiliar em missões de resgate em caso de desastres.

Figura 1 – O sistema robótico *Julius*, nomeado em homenagem ao matemático e engenheiro alemão Julius Ludwig Weisbach.



Adaptado de: Lösch (2018, p. 3).

O robô *Julius*, apresentado na Figura 1, é equipado com um manipulador robótico UR5 e uma garra de 3 dedos Robotiq®, possui diversos sensores ópticos como LIDAR 3D (*Light Detection and Ranging*, do inglês “Detecção de Luz e Alcance”), LIDAR 2D e Kinect ONE para fazer o reconhecimento do ambiente ao seu redor. É provido de dois computadores e sistemas de luminosidade, além de carregar diversos sensores inteligentes (SSB - *Smart Sensor Boxes*) no topo de sua estrutura.

Segundo Baudoin & Habib (2011), minas terrestres foram utilizadas pela primeira vez na Guerra Civil Americana, nos Estados Unidos, entre 1861 e 1865. Posteriormente, minas antitanque foram desenvolvidas e plantadas nos campos de guerra durante a Primeira Guerra Mundial, no entanto, tais minas eram fáceis de detectar e desarmar. Assim, na Segunda Guerra Mundial, surgiram as minas antipessoais, as quais eram difíceis de localizar, portanto, a limpeza de campos minados tornou-se uma tarefa de alto-risco. Desde 1975, minas terrestres ainda ativas resultaram na morte de mais de um milhão de pessoas, principalmente civis adultos e crianças. Além disso, aproximadamente 300 mil crianças ficaram feridas e gravemente incapacitadas.

A fim de realizar missões militares e civis em diferentes ambientes que apresentam risco de explosões por equipamentos militares, Kang *et al.* (2003), apresenta em seu trabalho o desenvolvimento do robô ROBHAZ-DT2, exposto na Figura 2, um sistema robótico móvel de manipulação para realizar tarefas típicas de EOD (*Explosive Ordnance Disposal*, do inglês “Descarte de Artilharia Explosiva”).

Figura 2 – O sistema robótico ROBHAZ-DT2.



Fonte: Kang (2003, p. 9).

O sistema dispõe de um manipulador com 6 graus de liberdade, controlado remotamente por um dispositivo háptico, que possibilita a operação da estrutura móvel e do manipulador simultaneamente.

Ambientes contaminados por radiação apresentam alto risco de saúde a seres humanos e, com a evolução da tecnologia, a necessidade de operar em ambientes deste tipo vem aumentando. O trabalho de Marturi *et al.* (2017), apresenta dados da indústria nuclear, especificamente do descomissionamento de antigas usinas de geração de energia nuclear e descarte de materiais radioativos, ou lixo radioativo. A maioria das manipulações remotas em ambientes contaminados por radiação no mundo são realizadas manualmente, onde um operador humano altamente treinado controla um manipulador mestre-escravo mecânico robusto, supervisionando-o por trás de uma janela de proteção, ou uma sala remota, e controlando cada junta individualmente através de botões, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Robô BROKK operando no sítio nuclear de Sellafield, Reino Unido.

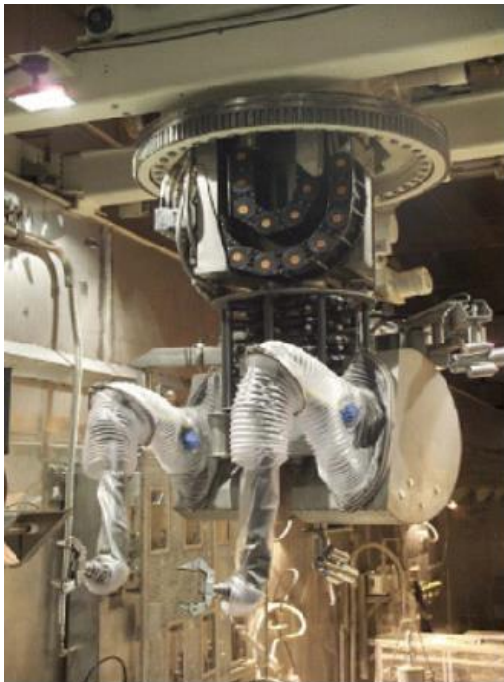


Fonte: Marturi (2017, p. 3).

Na Figura 3, é apresentado o sistema robótico BROKK, equipado com uma garra, sendo utilizado para uma tarefa de *pick-and-place* no sítio nuclear de Sellafield, no Reino Unido. O operador humano pode ser visto controlando o robô por trás de uma janela de vidro de chumbo de 1,6 m de espessura, assim o protegendo da radiação.

O trabalho de Lee et al. (2007), aborda diferentes manipuladores robóticos implementados em laboratórios de pesquisa em que os experimentos, ou práticas, emitem altos níveis de radiação. O sistema robótico Telerob EMSM-2B, na Figura 4.a, foi desenvolvido para operar na instalação de espalhamento de nêutrons por aceleração SNS (*Spallation Neutron Source*, do inglês, “Fonte de Fragmentação de Neutrons”), no Laboratório Nacional de Oak Ridge (ORNL – *Oak Ridge National Laboratory*). Como a sala de experimentação do SNS é um ambiente altamente contaminado por radiação, todos os procedimentos e equipamentos devem ser operados de maneira remota através do sistema robótico. Já na Figura 4.b, o servo-manipulador Mascot IV, foi desenvolvido para fazer manutenções de maneira remota dentro da instalação de pesquisa de fusão nuclear JET (*Joint European Torus*), no Centro Culham de Energia de Fusão (CCFE – *Culham Centre for Fusion Energy*). O servo-manipulador é capaz de realizar tarefas de soldagem, corte, aparafusamento e inspeção dos equipamentos.

Figura 4 – a) O sistema robótico Telerob EMSM-2B para o acelerador SNS, no Laboratório Nacional de Oak Ridge, e b) o servo-manipulador Mascot IV remotamente operado dentro do equipamento JET, do Centro Culham de Energia de Fusão.



a)



b)

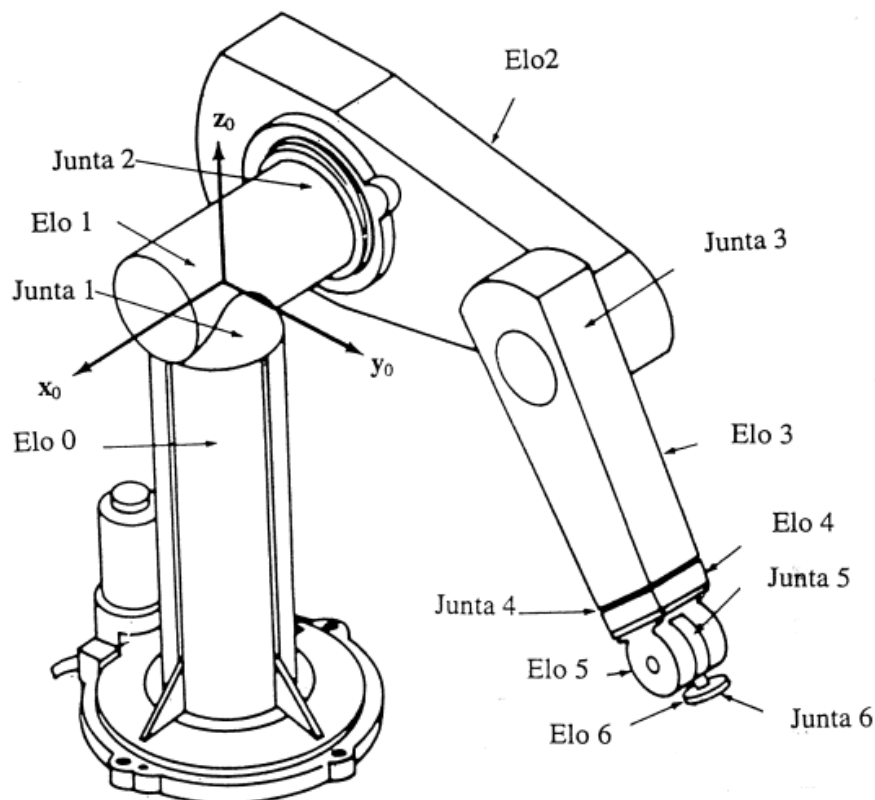
Adaptado de: Lee (2007, p. 2).

Definidos os cenários e ambientes de risco em que a aplicação de manipuladores robóticos garante a segurança de operários humanos, evitando expor tais operários a riscos de vida, partimos para o entendimento dos manipuladores robóticos em si, abordando os conceitos básicos dos componentes de suas estruturas, modelagem e controle.

2.1.2 Manipuladores robóticos

De acordo com Siciliano *et al.* (2009), a estrutura de manipuladores robóticos consiste em uma sequência de corpos rígidos, chamados de “elos”, interligados por meio de articulações, também conhecidas como “juntas”, como pode ser observado na Figura 5, ilustrando um robô manipulador PUMA.

Figura 5 – Ilustração de um robô manipulador PUMA, identificando suas juntas, elos e sistema referencial.



Fonte: Lopes (2002, p. 26).

As juntas são acionadas por atuadores – como motores, cilindros hidráulicos, entre outros similares – resultando em movimentos angulares ou lineares, dependendo do tipo de manipulador.

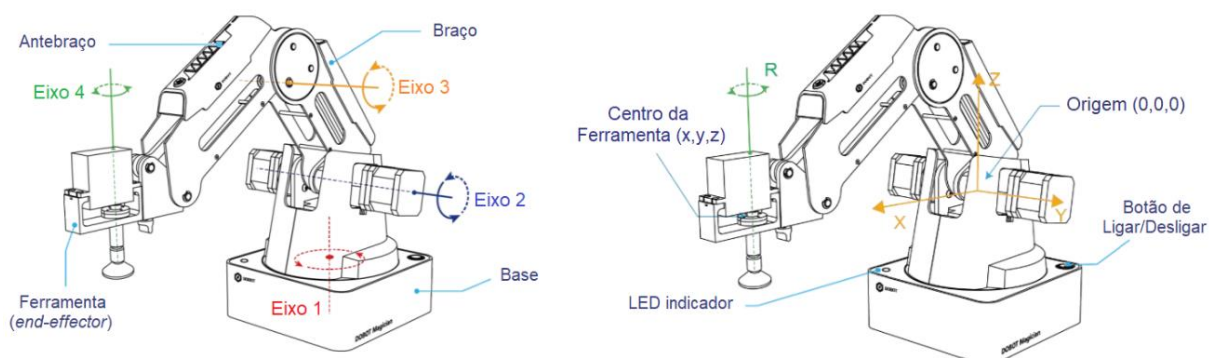
Um manipulador é caracterizado por um braço, que proporciona a mobilidade, um pulso que garante destreza e uma ferramenta (*end-effector*) que permite que o robô realize determinadas tarefas. Siciliano *et al.* (2009), explica em seu trabalho que a estrutura mecânica de um manipulador robótico é determinada pelo número de graus de liberdade (DoF – *Degrees of Freedom*), que determinam sua postura. Cada DoF está tipicamente associado a uma junta articulada, constituindo uma “variável de junta”.

Calcular a postura do manipulador para mover a ferramenta de um ponto a outro no espaço, em função das variáveis de junta, é denominado de resolução de cinemática direta, além disso, o caminho inverso também pode ser calculado. O chamado problema de cinemática inversa consiste em determinar as variáveis de junta que correspondem a uma determinada posição e orientação da ferramenta.

A solução para o problema de cinemática inversa é fundamental para transformar as especificações de movimento, atribuídas à ferramenta do manipulador no espaço operacional, em movimentos correspondentes das juntas no espaço, permitindo a execução dos movimentos desejados.

Para o presente trabalho, será utilizado o manipulador robótico DOBOT Magician, ilustrado na Figura 6, um modelo de manipulador categorizado como educacional, ou para treinamento, desenvolvido pela empresa Shenzhen Yuejiang Technology, sediada em Shenzhen, na China.

Figura 6 – Ilustração do manipulador DOBOT Magician.



Adaptado de: DOBOT Magician User Guide V1.7.0.

O manipulador opera com dois tipos de sistema de coordenadas, como pode ser observado na Figura 6, o sistema de coordenadas angulares das juntas, ou o sistema de coordenadas Cartesiano.

O manipulador possui 4 eixos de rotação: a base (eixo 1), com um ângulo de rotação de 180°; o braço (eixo 2), com um ângulo de rotação de 85°; o antebraço (eixo 3), também com ângulo de rotação de 85°; e o pulso (eixo 4), com ângulo de rotação de 180°. O braço completamente estendido tem um alcance máximo de 320mm e é capaz de carregar, em sua ferramenta, uma carga máxima de 500g sem sobrecarregar os servos.

Além disso, o manipulador DOBOT Magician suporta três modos de movimentação: o modo jogging (JOG), que consiste em movimentar manualmente a ferramenta ao longo do sistema de coordenadas Cartesiano, ou movimentar livremente os eixos pelo sistema de coordenadas angulares; o modo ponto-a-ponto (PTP – *Point-to-Point*), o qual consiste em marcar os pontos do trajeto da ferramenta no sistema de coordenadas; e o modo arco (ARC), que cria uma trajetória em formato de arco a partir de três pontos, não alinhados, determinados pelo usuário.

Para este trabalho, o modo jogging é o modo de movimentação adequado para a implementação do método de controle proposto, levando em consideração o sistema de coordenadas angulares das juntas. As juntas atuam de acordo com os movimentos angulares capturados a partir do braço humano do operador. Na seção 2.1.3, é realizada uma comparação entre as juntas e movimentos do braço humano com as juntas e movimentos do braço robótico, e como é possível relacionar esses membros humano e robótico, determinando suas similaridades e limitações.

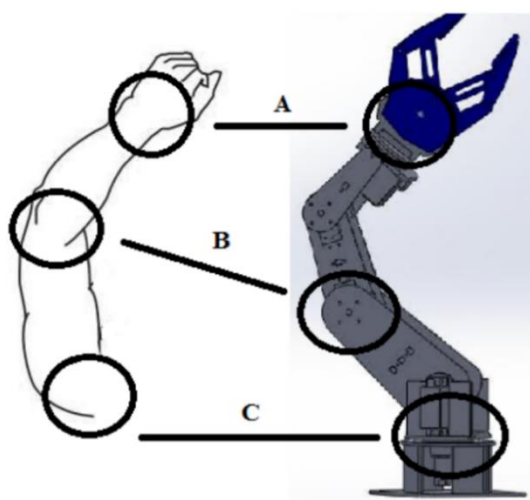
2.1.3 Relação entre o braço humano e um braço robótico

Tanto manipuladores robóticos quanto o braço humano, são sistemas mecânicos que possuem uma extremidade fixa a uma base – ou ombro, no caso do braço humano – enquanto a outra extremidade pode se mover livremente pelo espaço. Esse movimento livre é definido pelo número de graus de liberdade que um sistema possui.

Kim *et al.* (2011), em seu trabalho, afirma que o braço humano – incluindo o ombro, o cotovelo, o pulso e excluindo o movimento escapular – possui 7 DoF. No entanto, o posicionamento do pulso e orientação da palma da mão no espaço é uma tarefa que requer apenas 6 DoF, ou seja, o braço humano possui um grau de liberdade redundante.

A Figura 7 mostra a relação das articulações do manipulador robótico de 6 DoF, desenvolvido no trabalho de Moreno (2014), com as articulações do braço humano. Na figura, o autor compara os graus de liberdade que descrevem o movimento de cada braço. A relação A determina o movimento da ferramenta, a relação B determina o grau de movimento do cotovelo e a relação C determina o movimento da base do sistema robótico de acordo com a movimentação do ombro do operador.

Figura 7 – Graus de liberdade do braço humano e do manipulador robótico.



Fonte: Moreno (2014, p. 2)

Devido a essa natureza redundante do braço humano, é possível utilizar diversas configurações de posicionamento das juntas para concluir uma determinada tarefa, portanto, a cinemática inversa do braço humano não é expressa por uma única solução matemática. Com o avanço das tecnologias de controle de manipuladores robóticos, assim como sistemas robóticos vestíveis (exoesqueletos), a resolução desta redundância tornou-se fundamental, pois sistemas robóticos antropomórficos são desenvolvidos com estruturas de 6 DoF, o mínimo necessário para concluir tarefas no espaço. Portanto, de acordo com Perry *et al.* (2007) e Kim *et al.* (2011), a solução da cinemática inversa para contornar a redundância dos sistemas associados devem ser idênticas, assim garantindo uma integração adequada.

O operador do manipulador robótico comanda suas ações através de uma interface de controle, utilizando dispositivos como joystick, teclado, mouse ou simples botões táteis ou *touchscreen*. Na seção 2.1.4, são abordados os conceitos de controle e interfaceamento do manipulador robótico, e como o controle é realizado no presente trabalho.

2.1.4 Interação e interface humano-máquina

Nesta seção serão abordados os métodos de controle utilizados para operar manipuladores robóticos. Para fins de manutenção, manipuladores e robôs móveis autônomos também precisam de acesso ao controle manual do braço robótico. Normalmente, o controle é feito através de joysticks, mouse e teclado ou, com controles mais recentes, controles com sensores de movimento.

No trabalho de Li *et al.* (2018), foi desenvolvido um sistema de controle para interação homem-máquina de um manipulador de manutenção remoto para o reator de fusão Tokamak (*Токама́к*, abreviação em russo para тороидальная камера с аксиальным магнитным полем, em português “câmara toroidal com campo magnético axial”). Como pode ser observado na Figura 8, a orientação e posicionamento da ferramenta em cada braço robótico pode ser controlado através de uma interface gráfica de usuário (GUI – *Graphical User Interface*) e com o uso dos controles com sensores de movimento *Razer Hydra*. A estação base do controle utiliza sensores de campos magnéticos fracos para detectar a posição absoluta e orientação dos controles, e então, os movimentos dos controles são mapeados e replicados pelos manipuladores robóticos.

Figura 8 – Interação do operador com dois braços robóticos através do controle com sensores de movimento Razer Hydra.



Fonte: Li *et al.* (2018, p. 4)

Escavadeiras hidráulicas são robôs de construção que constantemente operam em ambientes que expõem risco a seus operadores. A fim de remover operadores de escavadeiras desse risco, Jin *et al.* (2008) desenvolveu em seu trabalho um sistema de controle remoto para operar esse tipo de escavadeira. A estação de operação remota da escavadeira hidráulica, mostrada na Figura 9, é composta por um monitor, que exibe o vídeo ao vivo de uma câmera integrada na escavadeira, e dois joysticks eletrônicos, os quais controlam os movimentos do braço da escavadeira.

Figura 9 – Componentes da estação de operação remota da escavadeira.



Fonte: Jin *et al.* (2008, p. 2)

Controles com sensor de movimento e joysticks são suficientemente simples de manusear, mas requerem um treinamento relativamente extenso para operar de maneira eficiente um manipulador robótico, ou um conjunto de manipuladores. Portanto, o presente trabalho propõe o uso de tecnologias de captura de movimentos (MoCap – *Motion Capture*) para monitorar os movimentos do próprio braço do operador humano, e replicar tais movimentos em um manipulador robótico.

A tecnologia MoCap, comumente conhecida por sua aplicação na indústria cinematográfica, tem mostrado grande valor de aplicação no campo de realidade virtual, reabilitação e análise de movimentos do corpo humano, entretenimento interativo, como jogos digitais, e no campo de controle de robôs (Jin *et al.*, 2008).

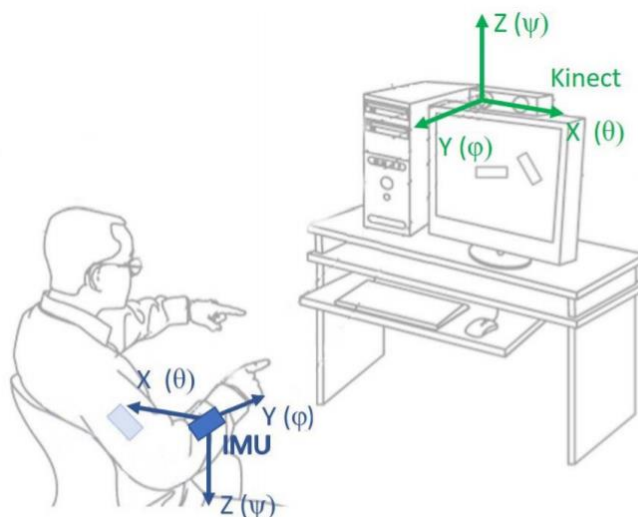
A captura de movimentos pode ser feita de diversas maneiras, sendo a mais conhecida a captura por dispositivos ópticos e marcadores reflexivos para monitoramento dos membros do corpo humano. No entanto, tal método, embora seja

eficiente e preciso, tem um custo elevado e requer a preparação de um ambiente espaçoso e bem iluminado. Com o lançamento do sistema óptico *Kinect*, pela empresa Microsoft, em 2010, a captura de movimentos tornou-se acessível e popular entre diversos campos de pesquisa e entretenimento. O método de captura com o sistema *Kinect* consiste no uso do dispositivo óptico e utilizar o processamento de imagem para identificar os membros do corpo e monitorar seus movimentos, mas o problema de instalação e iluminação para a captura ainda persiste neste método.

Para evitar a dependência de um ambiente pré-estruturado para capturar os movimentos humanos e replicar em manipuladores robóticos, o trabalho propõe o uso de sensores inerciais e transdutores angulares para fazer a aquisição das informações de movimentos das juntas do operador humano e fazer a combinação desses dados, a fim de compensar os erros de cada tipo de sensor (Jin *et al.*, 2008).

O trabalho de Glonek & Wojciechowski (2017), propõe uma solução similar, neste caso, para compensar os erros da captura de movimentos do sistema *Kinect* em ambientes oclusos, os autores fazem a combinação dos dados adquiridos pelo *Kinect* com os dados de sensores inerciais no corpo do usuário para corrigir o posicionamento dos membros do corpo no espaço, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Sistemas de coordenadas dos dispositivos de medição.



Fonte: Glonek & Wojciechowski (2017, p. 10)

Na seguinte seção, são introduzidos os conceitos de funcionamento dos sensores inerciais e magnéticos que farão a coleta dos dados de movimento, além dos métodos de fusão e processamento desses dados, a fim de compensar suas limitações, corrigindo o erro associado à cada tipo de sensor.

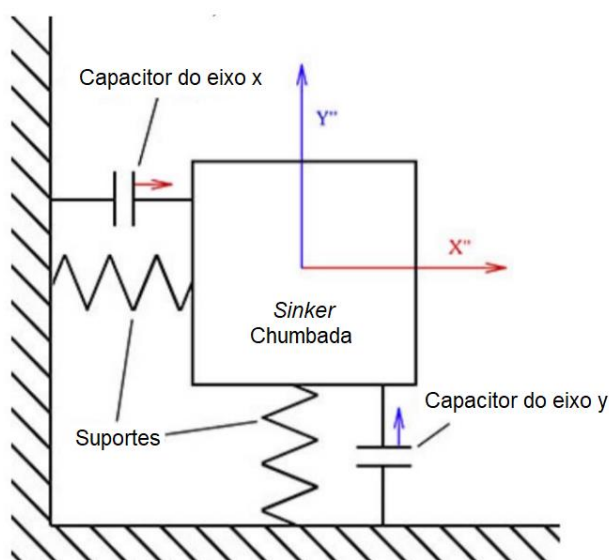
2.1.5 Sensores para captura de movimentos e fusão de dados

Como citado anteriormente, os sensores utilizados para o método de captura de movimentos do braço do operador humano serão sensores inerciais, conhecidos como IMUs (*Inertial Measurement Units*, do inglês “Unidades de Medição Inerciais”) que utilizam a tecnologia MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*, do inglês “Sistemas Microeletromecânicos”) e transdutores angulares (*encoders*, do inglês “codificadores”).

De acordo com Kempe (2011), IMUs são dispositivos que fazem a medição de aceleração linear nos três eixos do espaço e a medição de velocidade angular nos três eixos de rotação no espaço. São inúmeras as suas aplicações, variando desde reconhecimento de movimentos e gestos 3D para equipamentos médicos, controles de jogos e *smartphones* até sistemas de navegação pessoal.

Waldner (2008), em seu trabalho, apresenta a tecnologia MEMS como dispositivos constituídos por componentes microscópicos, especialmente componentes móveis ou flexíveis, comumente de tamanhos entre $10\ \mu\text{m}$ e $100\ \mu\text{m}$, combinando componentes eletrônicos e mecânicos. Normalmente, tais dispositivos consistem em uma unidade central que processa os dados, um microprocessador e diversos componentes que interagem com o meio externo, como micro sensores de pressão, temperatura, químico ou magnéticos. O diagrama de funcionamento mecânico é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de um acelerômetro com a tecnologia MEMS.

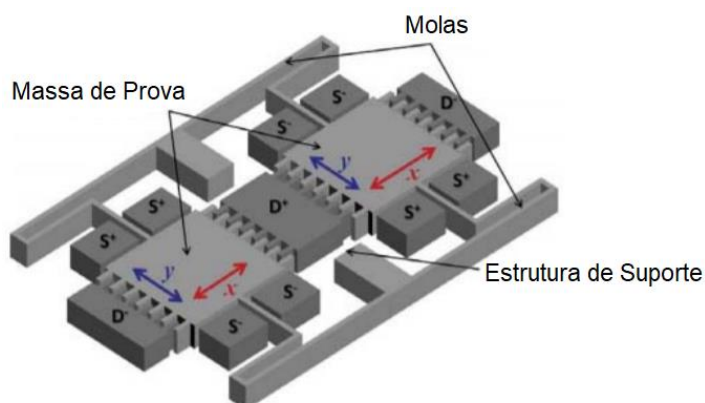


Adaptado de: Ivanov & Zhilenkov (2018, p. 3)

Como pode ser observado na Figura 11, dentro de sensores com a tecnologia MEMS localiza-se uma massa de prova (*sinker*, em tradução literal para o português “chumbada”), um corpo com massa determinada, conectado a suportes (molas) e capacitores, ou placas piezoelétricas. De acordo com Ivanov & Zhilenkov (2018), caso ocorra uma situação em que o sensor é acelerado, a estrutura do sensor é deslocada e a chumbada se mantém parada devido ao efeito da inércia.

O deslocamento dessa massa de prova relativo ao estado de repouso, resultará em uma diferença de capacitância entre as placas do capacitor, que posteriormente é convertida em um sinal digital. Este princípio é conhecido como efeito Coriolis, a Figura 12 ilustra esse princípio de operação de um acelerômetro com a tecnologia MEMS.

Figura 12 – Ilustração do princípio de operação de um acelerômetro com a tecnologia MEMS.



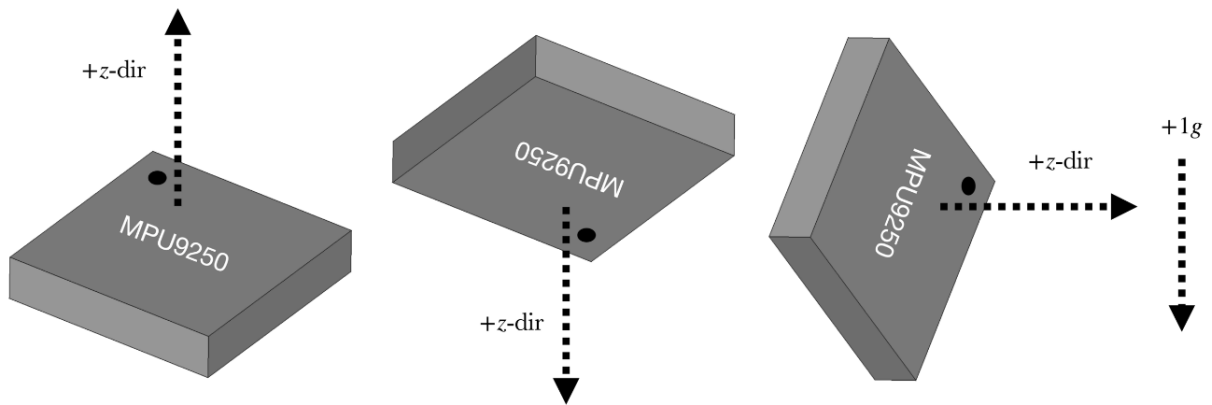
Adaptado de: Ivanov & Zhilenkov (2018, p. 3)

Como os sensores inerciais baseados na tecnologia MEMS possuem uma alta sensibilidade, existe um erro associado na medição das componentes de aceleração linear e de velocidade angular (Ivanov & Zhilenkov, 2018).

A partir do entendimento dos sensores citados, partimos para as técnicas de processamento e fusão dos dados coletados por tais sensores. Muitos métodos de processamento dos dados de sensores inerciais são capazes de anular o erro associados a tais sensores, no entanto, a implementação da fusão de dados pode contribuir para a estabilidade e robustez do sistema como um todo. Distúrbios como impactos ou influências magnéticas podem influenciar no erro acumulado do sensor, afinal, por serem de alta precisão as IMUs facilmente detectam movimentos e vibrações as quais, para o tato humano, não são reconhecidas.

Hrisko (2021), em sua publicação, afirma que a calibração do acelerômetro requer tirar vantagem da própria aceleração da gravidade, a qual pode ser utilizada tanto na orientação positiva como na orientação negativa do sensor, para ter dois pontos de referência. Além disso, a fim de obter um terceiro ponto de referência para calibração, é possível posicionar o sensor perpendicularmente a aceleração da gravidade, como ilustrado na Figura 13.

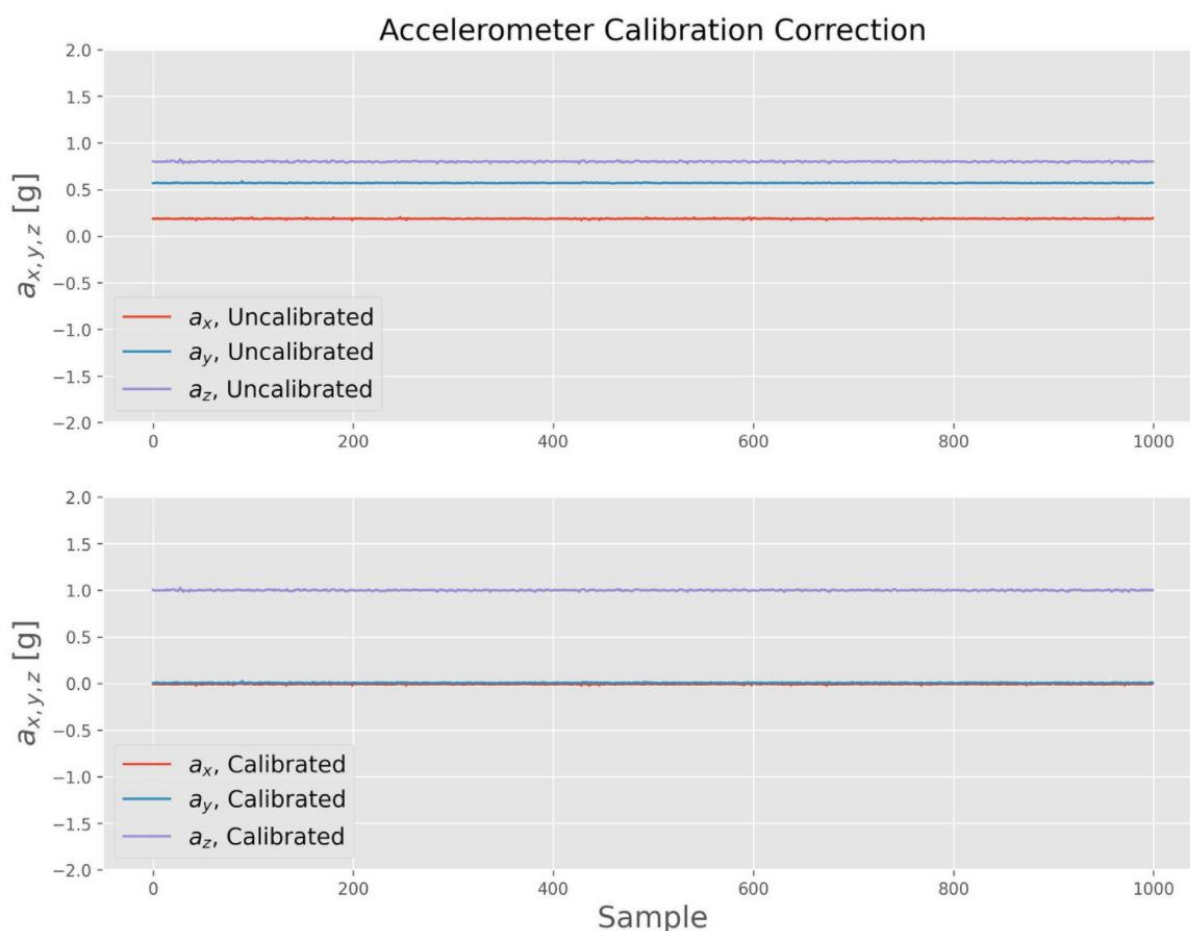
Figura 13 – Orientações do sensor com relação a aceleração da gravidade.



Adaptado de: Hrisko (2021)

Esses três pontos de referência para calibração devem ser utilizados para configurar os 3 eixos de aceleração. Hrisko (2021), aponta que os três pontos permitem que seja aplicado o método dos mínimos quadrados em um modelo de primeira ordem para o fator de escala e deslocamento, ou erro, em cada eixo de aceleração, assim corrigindo o erro natural do sensor, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Gráfico dos sinais do acelerômetro padrão (superior) e gráfico dos sinais do acelerômetro calibrados (inferior).



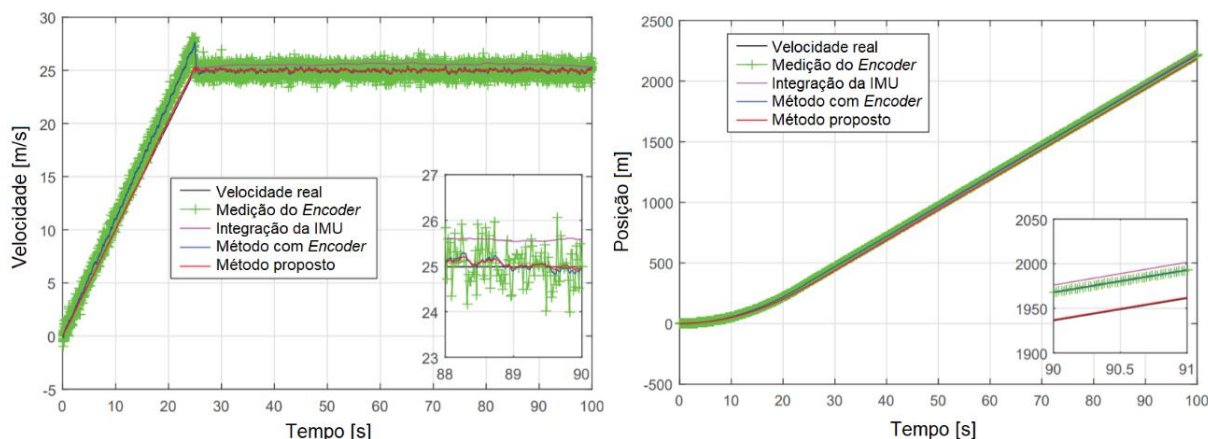
Fonte: Hrisko (2021)

No trabalho de Patel & Faruque (2021), é feita uma abordagem de fusão de dados coletados por múltiplas IMUs, utilizando múltiplas estimativas locais de atitude e aplicando o algoritmo do filtro de Kalman estendido (*Extended Kalman Filter*) para fornecer uma estimativa adequada. Então, essas estimativas locais são combinadas utilizando um filtro de Kalman federado (KFK – *Federated Kalman Filter*) para otimizar a fusão desses dados. Utilizando um sistema óptico de captura de movimentos como referência, a técnica proposta pelos autores provou ser eficaz, reduzindo o erro associado comparado a estimativa dos dados de uma única IMU.

O método de fusão de dados utilizando o filtro de Kalman também é aplicado no trabalho de Li *et al.* (2020), onde os autores utilizam os dados coletados por uma IMU e dados de um *encoder* fotoelétrico da baixa resolução para estimar a posição, aceleração e velocidade de veículos ferroviários inteligentes. Combinando as informações de velocidade coletadas pelo *encoder* e as informações de aceleração

coletadas pela IMU em um algoritmo de fusão de dados baseado no filtro de Kalman, foi possível fornecer informação precisa de velocidade e posicionamento de sistemas ferroviários, como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Estimativa de velocidade e posição de veículos ferroviários inteligentes.



Adaptado de: Li *et al.* (2020)

Nas seções 2.2 e 2.3, são apresentados trabalhos relacionados ao tema de manipuladores robóticos aplicados em ambiente e cenários de risco, e trabalhos que implementam técnicas de fusão e métodos de processamento de dados coletados por sensores, constituindo o Estado da Arte do presente trabalho.

2.2 Manipuladores Robóticos em Ambientes de Risco

Marturi *et al.* (2017) investiga, em seu trabalho, o desempenho do ser humano para executar tarefas de descomissionamento nuclear com manipuladores robóticos remotamente operados, posteriormente comparando com o desempenho de sistemas semiautônomos. Também é apresentada uma estrutura de estimação de estados guiada por visão, a fim de estimar a configuração de um robô “sub-sensorial” – ou seja, um robô que não é equipado com sensores adequados para a operação remota, ou autônoma, apenas operações manuais supervisionadas –, através da utilização de uma câmera monocular. Assim, sendo possível auxiliar na automatização de manipuladores industriais que são utilizados atualmente. Apesar da necessidade de realizar manipulações remotas, surpreendentemente poucos robôs são usados na indústria nuclear, sendo a maioria das tarefas de manipulação remota realizadas através de sistemas mecânicos convencionais.

Os poucos manipuladores robóticos implementados são tele operados de maneiras rudimentares, com praticamente nenhuma autonomia ou movimento pré-programado. Além disso, a maioria destes robôs são “sub-sensorizados”, sem propriocepção, impossibilitando a implementação de tarefas automáticas. A utilização de manipuladores robóticos semiautomatizados, com noção de posicionamento no espaço, pode melhorar significativamente o desempenho e segurança em operações remotas para descomissionamento nuclear. Dois conjuntos de experimentos foram conduzidos para avaliar a performance do ser humano e para avaliar o sistema de estimação de estados guiada por visão. No primeiro conjunto de experimentos foi utilizado um manipulador industrial de 7 DoF (*Degrees of Freedom*, do inglês “Graus de Liberdade”), portando uma garra paralela como ferramenta. Já no segundo conjunto de experimentos conduzidos, foi utilizado um robô industrial de baixa carga útil, de 6 DoF.

No primeiro conjunto de testes, é montada uma câmera junto a ferramenta dos manipuladores, operando apenas em tarefas semiautônomas. No segundo conjunto de testes, a câmera é instalada dentro do ambiente de trabalho, tornando visível todos os robôs conectados para completar as tarefas. Foram utilizadas duas tarefas para cada conjunto de testes, uma tarefa de destreza, com o objetivo de mover a ferramenta ponto-a-ponto, sem colidir com obstáculos, e uma tarefa de empilhar objetos.

Analisando os resultados, concluiu-se que, em média, os sistemas semiautônomos acabam sendo dez vezes mais rápidos do que o operário humano, para realizar as mesmas tarefas. Para o sistema robótico de estimação de estados, também foram conduzidas duas séries de experimentos. Inicialmente, a precisão do método encadeado implementado, onde o robô estima os ângulos das juntas através da visão, tendo como referência o chão. Em média, a estimativa de erro, para os ângulos, é inferior à 4°, demonstrando a eficiência do método de estimativa por visão.

Em seguida, a estimativa da configuração do robô na malha de controle cinemático, utilizando visão derivada, a fim de demonstrar a eficiência em realizar tarefas de regulação Cartesianas. A partir dos testes realizados, o método demonstrou clara robustez.

O trabalho de Lunghi *et al.* (2019) descreve o design e o processo de engenharia de software por trás do desenvolvimento de uma interface homem-robô modular e multimodal para intervenção de sistemas robóticos remotamente

controlados, a fim de operar cooperativamente com uma equipe de robôs em ambientes de risco. Também é apresentada a validação e comissionamento da interface, utilizada em operações reais no complexo do acelerador de partículas da Conselho Europeu para a Pesquisa Nuclear (CERN - *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*).

A interface homem-robô (HRI - *Human-Robot Interface*) tem um papel importante no design de sistemas robóticos seguros e eficientes. Porém, robôs para intervenção em cenários não planejados e de risco precisam de um aprofundamento maior na pesquisa e desenvolvimento desses sistemas robóticos para atingir um nível aceitável de usabilidade e segurança, especialmente quando as missões nesses cenários inesperados necessitam de múltiplos robôs. A interface proposta permite o controle de conjuntos heterogêneos de robôs, homoganeamente, fornecendo ao operador funcionalidades roteirizadas, as quais podem ser customizadas e adaptadas em tempo real, de acordo com a operação em andamento.

A HRI e a estrutura robótica do CERN foram desenvolvidas de maneira a serem modulares, a fim de que ambas as arquiteturas de hardware e software sejam adaptáveis em um curto período, preparando os sistemas para as próximas missões planejadas. O objetivo principal do projeto foi construir uma arquitetura modular para uma HRI multimodal intuitiva, permitindo que até mesmo um operário inexperiente controle múltiplos robôs. A modularidade possibilita uma adaptação fácil da interface para missões imprevistas e complexas.

A HRI apresenta três modos de controle: manual, semiautônomo e autônomo. Embora a tele operação consista principalmente em uma interação manual, a inteligência adicionada ao sistema garante segurança nas operações, auxiliando o operador na tomada de decisões. E no modo de controle completamente autônomo, o operador atua apenas como observador, interagindo com o robô através de comandos assíncronos de alto nível, por exemplo, movimentar o manipulador de um ponto a outro.

O canal de comunicação entre o dispositivo mestre e o robô pode ser estabelecido através dos protocolos de internet TCP (*Transmission Control Protocol*, do inglês “Protocolo de Controle de Transmissão”), UDP (*User Datagram Protocol*, do inglês “Protocolo de Datagramas de Usuário”), UDT (*UDP-based Data Transfer*, do inglês “Transferência de dados baseada em UDP”), HTTP (*HyperText Transfer Protocol*, do inglês “Protocolo de Transferência em Hipertexto”), entre outros.

Atualmente, atualizações de software não são comuns em sistemas de automação industrial, no entanto, a HRI desenvolvida neste trabalho já é adaptada para lidar propriamente com esse tipo de atualizações, a fim de se adaptar constantemente às mudanças contínuas de requerimentos provenientes de novas tarefas e novas dificuldades, bem como a correção de possíveis *bugs* no sistema.

A HRI proposta foi validada através de diversos testes e mais de 100 intervenções reais nas instalações do CERN, com ambos os operadores treinados e os inexperientes, demonstrando uma melhor usabilidade e adaptabilidade nas diferentes tarefas, comparando a outras soluções comerciais previamente adquiridas pela organização. Também foram apresentados os valores de eficácia da atual implementação da interface, as quais podem ser utilizadas como referências para trabalhos e melhorias futuras.

O objeto de estudo do trabalho de French *et al.* (2016) é a análise de como os materiais e componentes de sistemas robóticos hábeis, manipuladores que se assemelham ao braço humano, se comportam depois de expostos a altos níveis de radiação. Em 2025, o acelerador de partículas HL-LHC (*High Luminosito Large Hadron Colider*, do inglês “Grande Colisor de Hádrons de Alta Luminosidade”), sediado no CERN, será desligado e temporariamente fechado para manutenção, mudanças na infraestrutura e instalação de novos atuadores e sensores melhores.

De acordo com medições recentes realizadas pelo Grupo de Proteção à Radiação do CERN, a atividade humana nas áreas de experimentação, construção e manutenção do acelerador de partículas deve ser restringida, devido à exposição aos elevados níveis de radiação. O trabalho aborda a viabilidade da utilização de tecnologia robótica humanoide para manipulação dos componentes que devem ser substituídos na camada mais profunda da estrutura, onde os níveis de radiação são extremamente altos, cerca de 22 vezes mais altos que a exposição contínua permitida, pela regulamentação, dos operadores. Para realizar a avaliação do braço robótico hábil, foi utilizado um feixe de prótons em um único dedo do manipulador.

O dedo é a parte do manipulador que estará mais próxima a fonte de radiação, além disso, os componentes do dedo são iguais, ou similares, ao resto dos componentes presentes no restante da estrutura do manipulador. A parte mecânica do sistema é composta de polióxido de metileno e alumínio, tanto a estrutura quanto os rolamentos. Os tendões são feitos de polietileno ultraleve, neste caso, como eles atuam as juntas dos dedos, é o material mais importante do sistema.

Os resultados obtidos através do experimento foram comparados com as pesquisas anteriores realizadas pela Universidade de Sheffield sobre o mesmo manipulador, assim verificando a tolerância a radiação de cada componente. O estudo determinou que alguns componentes não seriam qualificados como resistentes a radiação, mas sim tolerantes a radiação. Os resultados desse experimento inicial possibilitam a progressão para uma série de novos testes, mais refinados e possivelmente mais caros.

Chen *et al.* (2017), em seu trabalho, tem como objetivo desenvolver e implementar um sistema robótico operado remotamente para realizar o descarte de lixo nuclear. A energia nuclear é uma alternativa para aplicações de larga escala, não emite gases poluentes no processo de geração de energia, alta densidade de energia e baixo custo. No entanto, a radiação emitida pelo material, ou lixo, nuclear é fatal ao corpo humano. Para evitar que seres humanos lidem com o material nuclear, é necessário utilizar um sistema robótico capaz de manipular e descartar esses materiais remotamente.

O sistema robótico proposto consiste em dois sistemas, o sistema de controle remoto e o sistema de móvel de descarte, no caso, o robô que opera em campo. O sistema móvel é composto por um controlador de movimento, sensor de detecção de fontes radioativas, motor, dispositivo de navegação e posicionamento, um manipulador robótico de 6 eixos, câmera, PTZ (*Pan, Tilt and Zoom*, do inglês “Panorâmica, Inclinar e Ampliação”) e a estrutura mecânica. O sistema de controle remoto, desenvolvido em Visual C++, é capaz de realizar as funções de planejamento de rota, monitoramento de status do equipamento, controle manual em tempo real, controle do manipulador robótico, controle do PTZ, controle dos sensores e controle de carga e descarga do robô.

A comunicação entre o operador remoto e o robô móvel é realizada em modo cliente/servidor, através do protocolo TCP/IP, onde o operador atua como servidor e o robô atua como cliente. Em ambiente de teste, o robô opera normalmente, no entanto, durante os experimentos, ocorrem erros na comunicação sem fio, devido a interferências complexas causadas pela radiação. O sistema não aparenta ter interrupção na comunicação, mas surgem erros no processo de operação.

O projeto ROBDEKON, *Robotic Systems for Decontamination in Hazardous Environments*, apresentado no trabalho de Petereit *et al.* (2020), tem o objetivo de desenvolver um sistema robótico para realizar tarefas de descontaminação de

ambientes com níveis de radiação altos, contaminados com substâncias químicas, ou gases tóxicos, deixando de expor operários humanos tais riscos. Contaminações causadas por substância perigosas podem ter diversas origens diferentes, por exemplo, vazamento de substâncias devido a incidentes em indústrias químicas, contaminação de estruturas em usinas nucleares, despejo impróprio de substâncias tóxicas, podendo contaminar o solo e a água subterrânea. Essas contaminações podem levar a consequências sérias para os seres humanos e para o meio ambiente.

Por esse motivo, a descontaminação de ambientes, como por exemplo para o descomissionamento de uma usina nuclear, é de suma importância. Os operários humanos que devem realizar esta tarefa, estão constantemente expostos a altos riscos de saúde. Devido aos riscos potenciais durante o procedimento de descontaminação de ambientes, é necessário que sejam tomadas extensas medidas de proteção, como por exemplo, o uso de vestes de proteção, que acabam aumentando a carga, normalmente com tanque de oxigênio, e limitam o tempo de trabalho, pela capacidade do tanque. Portanto, o objetivo deste projeto é livrar estes operários dos riscos, atribuindo a tarefa de descontaminação à sistemas robóticos.

As atividades de pesquisa deste trabalho incluem o desenvolvimento de robôs móveis, capazes de se movimentar por terrenos avariados, maquinários de construção civil, manipuladores robóticos e conceitos de descontaminação, algoritmos de planejamento, mapeamento multissensorial 3D do ambiente e o uso de realidade virtual para realizar a operação remota. Diversos testes foram realizados com os diferentes robôs desenvolvidos em sete ambientes de testes e laboratórios: um ambiente de teste para o maquinário pesado; um ambiente de teste para os sistemas robóticos tele operados em instalações nucleares; um laboratório para testar robôs de fresagem e capacidade de subir e descer escadas; um laboratório para testar robôs móveis em ambientes semiestruturados; um laboratório para testar a interface homem-máquina; um laboratório de manipuladores robóticos; e um laboratório de maquinário pesado autônomo.

O trabalho apresenta uma visão abrangente sobre o andamento das atividades de pesquisa do projeto ROBDEKON. O foco inicial estava no desenvolvimento de sistemas robóticos adequados para tarefas de descontaminação, e para trabalhos futuros o objetivo é concentrar no desenvolvimento de técnicas de descontaminação próprias para robôs e a capacidade de realizar essas tarefas de maneira completamente autônoma.

Patic *et al.* (2017), propõe em seu trabalho o desenvolvimento de um robô móvel para acessar áreas de risco, podendo ser adaptado para diferentes situações, adicionando equipamentos especializados para determinadas tarefas e terrenos. Robôs móveis podem ser aplicados em muitas áreas, substituindo seres humanos em tarefas de risco, ou mesmo ambientes que o expõem ao risco. Mais frequentemente usado por militares, robôs móveis podem ser enviados para coletar informações em áreas de conflito ou localizar e desarmar bombas. Mas também podem ser usados, por exemplo, na indústria química para manusear substâncias tóxicas, ou até mesmo substâncias radioativas.

O robô móvel desenvolvido é composto por três sistemas: um sistema de direção, para garantir mobilidade ao robô, um sistema de controle, para operar o robô, e um sistema de comunicação, para enviar informações para o robô, ou receber informações. Independentemente do tipo de robô, um dos problemas mais complexos é a estrutura mecânica, pois esta varia de acordo com a aplicação do robô, conseqüentemente variando seu volume e peso, que influenciam na eficiência do motor, que o carregará. Além disso, o robô precisa ser capaz de identificar as condições do ambiente ao seu redor, portanto, devem ser inclusos sensores que capturam e parametrizam essas condições. E para comunicar o robô móvel com o operador, é utilizado um módulo Bluetooth, pois garante um baixo consumo de energia, alta taxa de transferência e baixo custo. Foram instalados no robô, dois manipuladores robóticos capazes de realizar tarefas de pegar ou cortar objetos.

A maior desvantagem do projeto foi a utilização do Bluetooth para comunicação, pois a distância de ação do robô acaba sendo muito curta para operações remotas. Para trabalhos futuros, os autores sugeriram a utilização de comunicação via rádio ou controle via GPS (*Global Positioning System*, do inglês “Sistema de Posicionamento Global”), o que possibilitaria o controle em maiores distâncias.

O trabalho de Di Castro *et al.* (2018) propõe o uso de uma estrutura robótica com o sistema CERNTAURO para realizar inspeções autônomas e operações remotas supervisionadas em ambientes semiestruturados ou de risco. Usinas nucleares como a de Fukushima, usinas elétricas como a ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor* ou, em português, “Reator Experimental Termonuclear Internacional”) e instalações de aceleradores de partículas como o do CERN, possuem ambientes de risco.

Estruturas enormes, com milhares de equipamentos diferentes que precisam ser inspecionados e mantidos. Por serem ambientes de risco à seres humanos, devido aos altos níveis de radiação – e, no caso de aceleradores de partículas, devido aos fortes campos magnéticos produzidos – as usinas e aceleradores precisam ser inspecionados e mantidos de maneira remota, evitando a exposição dos operadores à riscos de vida.

O sistema robótico proposto foi desenvolvido com base em três pontos principais: a preparação e instruções para intervenção; sistema de controle e inteligência artificial; e a interface homem-robô. A preparação e instruções foram subdivididas em três itens, os requerimentos funcionais para intervir em ambientes de risco, a identificação de falhas utilizando análise por clusterização e procedimentos de recuperação de falhas, e o treinamento do algoritmo. O sistema de controle e inteligência artificial são separados em cinco módulos: a evasão de obstáculos, a percepção através de sensores, o controle guiado por visão computacional, navegação autônoma e comunicação com o operador, no caso de controle supervisionado.

A interface homem-robô foi elaborada de maneira a tornar mais confortável possível ao operador, podendo escolher, a qualquer momento durante uma intervenção, entre o controle padrão, com joystick, mouse e teclado, ou o controle por captura de movimentos. A solução proposta foi validada através de 82 operações robóticas nas instalações do acelerador de partículas CERN, completando 132 tarefas, totalizando 220 horas de operação, poupando a exposição de funcionários humanos à radiação.

A solução CERNTAURO foi integrada com sucesso em diferentes manipuladores robóticos, assim como os robôs desenvolvidos no CERN. Foi realizada uma comparação de controle supervisionado entre o sistema proposto e diferentes manipuladores industriais. Seis operadores treinados e vinte operadores sem treinamento receberam a tarefa de aparafusar usando os manipuladores. Todos os operadores sem treinamento foram capazes de concluir a tarefa utilizando o sistema CERNTAURO, diferente dos sistemas industriais.

O desenvolvimento, características e modos de operação do sistema i-TIM, *Intelligent Train Inspection Monorail* – ou, em português, “Trem Monotrilho de Inspeção Inteligente” –, é apresentado no trabalho de Di Castro *et al.* (2018).

O sistema i-TIM tem o objetivo de realizar, de maneira automática, diferentes missões dentro dos ambientes de operação do colisor de partículas do CERN. A estrutura subterrânea do colisor de partículas do CERN, HL-LHC, cobre cerca de 50 *km*, contendo milhares de equipamentos que precisam ser inspecionados e mantidos. No entanto, as áreas experimentais apresentam diferentes tipos de perigos à humanos, principalmente devido a radiação, deficiência de oxigênio e fortes campos magnéticos. Essa exposição à riscos de saúde, ou até mesmo riscos de vida, levam a necessidade de implementar sistemas robóticos para realizar tais inspeções e manutenções frequentes. Além de riscos de saúde, a estrutura do ambiente experimental do CERN apresenta outras dificuldades para seres humanos, como espaços confinados, percorrer longas distâncias, oclusão em áreas desordenadas, entre outras limitações.

A utilização de sistemas robóticos permite superar essas dificuldades, sendo possível operar automaticamente, para operações de inspeção por exemplo, ou ter a possibilidade de controlar manualmente através de uma interface homem-robô amigável, permitindo que operadores experientes com a estrutura do acelerador seja capaz de manipular o robô, sem a necessidade de treinar especificamente para usá-lo. O sistema i-TIM se desloca através de um monotrilha aéreo dentro do túnel, e pode realizar diferentes missões autônomas. O i-TIM é equipado com um vagão de brigada de incêndio, sendo capaz de fazer intervenções antecipadas em casos de incêndio, busca e resgate de pessoas. Além disso, é equipado com diversos módulos mecatrônicos e sistemas inteligentes para realizar inspeções de radiação, monitoração da estrutura e medições de dispositivos do acelerador.

O sistema i-TIM se manteve operacional no túnel do LHC durante 2 anos consecutivos, até a data de publicação do trabalho, provando ser um sistema robusto e confiável. Sua característica modular torna-se de extrema utilidade, pois novos módulos podem ser implementados, de maneira simples e fácil, em forma de vagões adicionando sistemas robóticos e sensores quando necessários. O sistema também provou ser de grande ajuda para as equipes de resgate, especialmente nas áreas do longo túnel do LHC, onde a intervenção humana pode levar horas, além de expor outros funcionários à riscos.

O objetivo do trabalho de Lösch *et al.* (2018) é fazer uma análise de requerimentos e apresenta o design de um robô capaz de navegar em minas subterrâneas de modo autônomo e manipular objetos com um braço robótico.

Minas subterrâneas são ambientes de alto risco e segurança é de suma importância, visto que serviços de emergência normalmente não se encontram por perto, e levam horas para chegar ao local. De 1839 até 2010, foram registrados 726 desastres em minas, de carvão e metais, apenas nos Estados Unidos, resultando em 15269 mortes.

A fim de reduzir o número de seres humanos expostos aos riscos de operar em uma mina subterrânea, a implementação de robôs móveis podem ser a melhor solução. Robôs de resgate podem auxiliar no trabalho de equipes de busca em caso de desastres, além disso, podem auxiliar na inspeção de minas antes mesmo de começarem operações com operários humanos. A base do robô móvel é uma plataforma robusta equipada com quatro rodas movidas à motores elétricos, capazes de resistir ao terreno rigoroso. Equipado com câmeras de profundidade e imagem colorida, luzes, scanners a laser, unidade de movimento inercial (IMU) e um manipulador robótico. Além disso, colunas de aço ou corpos de minérios podem interferir na localização via GNSS (*Global Navigation Satellite System*, do inglês “Sistema de Navegação Global via Satélite”), portanto a única maneira confiável de manter controle da localização é a visão computacional.

O robô usa uma infraestrutura IoT (*Internet of Things*, do inglês “Internet das Coisas”) para auxiliar na navegação e coleta de dados dos sensores, o que também contribui para a localização, reduzindo o erro de posicionamento. Foram conduzidos dois experimentos, testando o mapeamento e a navegação autônoma, o primeiro realizou o mapeamento de uma rota, em circuito fechado, de 75 metros com sucesso, resultando em um mapa qualitativamente igual ao mapa original.

Em um segundo teste, em uma rota de 150 metros, em circuito fechado, também obteve sucesso no mapeamento e navegação. Porém, foi observado que, se a rota não for um circuito fechado, ocorrem erros na criação do mapa. Para projetos futuros, está planejada a avaliação da capacidade de manipular objetos com o braço robótico.

Zhong *et al.* (2019), descreve em seu trabalho, o desenvolvimento de um sistema robótico capaz de realizar três tipos de tarefas típicas de manutenção em linhas de transmissão. Estas tarefas incluem o ajuste dos amortecedores de vibração, limpeza dos contatos nas derivações de corrente e montagem do contrapino. As linhas de transmissão de alta potência ficam expostas ao ar livre, e operam sobre constante tensão mecânica devido aos fatores climáticos.

Essas condições climáticas frequentemente causam problemas nas redes de transmissão, como por exemplo o afrouxamento dos amortecedores de vibração, os contatos das derivações sujam por causa das chuvas e ventos, ou até mesmo o afrouxamento de parafusos em conectores, podendo causar falhas imperceptíveis. Portanto, são necessárias inspeções regulares nas linhas de transmissão.

Atualmente, a realização destas tarefas requer profissionais especialmente treinados. Considerando as condições climáticas, os altos níveis de tensão que passam pelas linhas de transmissão, além da altura onde as manutenções devem ser feitas, estas tarefas tornam-se perigosas e de alto custo. Então, visando tirar os operários humanos da exposição a estes ambientes de alto risco, sistemas robóticos tornam-se perfeitos candidatos.

Para realizar as diferentes tarefas de manutenção, foram desenvolvidos três *end-effectors* (ferramentas) modulares, assim estes módulos podem ser conectados ao manipulador e alternados para realizar cada tarefa. Portanto, para fazer a troca dos *end-effectors*, também foi necessário elaborar um dispositivo que intercale essas ferramentas. O sistema robótico, como um todo, é constituído pelos três módulos *end-effectors*, o dispositivo de troca da ferramenta, um manipulador robótico leve de 5 DoF e um dispositivo mestre para controlar remotamente o robô.

Para verificar a confiabilidade e performance do sistema remotamente operado, foram realizados diversos experimentos para cada uma das três tarefas, as quais foram executadas com sucesso. O sistema desenvolvido nesta abordagem é flexível e adaptável a diferentes tarefas, utilizando componentes relativamente simples e de baixo custo.

Chowdhury *et al.* (2021), desenvolve em seu trabalho, o projeto e implementação de um robô remotamente controlado para desarmar e descartar bombas sem a necessidade de intervenção humana direta, utilizando *hardware* disponível localmente, a fim de minimizar gastos.

A demanda de novas tecnologias em robótica vem crescendo rapidamente na indústria e, cada vez mais, novas aplicações para tais tecnologias vão surgindo também em outros campos de pesquisa. A fim de minimizar os riscos à seres humanos no controle de desastres, em operações de resgate, operações militares, entre outras tarefas de alto risco, a ideia de implementar sistemas robóticos para substituir humanos nestas tarefas vem crescendo lado a lado com a tecnologia.

O robô desenvolvido neste trabalho possui um manipulador robótico com 4 graus de liberdade, capaz de levantar e carregar objetos de até 5 *kg* de maneira precisa e suave, idealmente para realizar tarefas de desarmamento de bombas e fazer o descarte seguro das partes coletadas. A estrutura do robô e do manipulador foram projetadas em liga de alumínio, para minimizar o peso da estrutura e aumentar a capacidade de carga, sendo capaz de coletar e carregar até 10 *kg* em seu chassi. O robô também é equipado com sensores de gás, incêndio e detecção de obstáculos.

Para o sistema de controle, foi utilizado uma *Raspberry Pi* como processador, e para a comunicação e coleta de dados dos sensores, foi utilizado um *Arduino Mega*. O robô pode ser controlado via conexão à internet. O objetivo do projeto foi minimizar os riscos da interação humana em tarefas de desarmamento e descarte de explosivos. No entanto, surgiram algumas limitações de *hardware*, como o limite da capacidade de carga e a força na pegada da garra do manipulador. Essas limitações possivelmente serão superadas em trabalhos futuros, com componentes de maior custo.

O robô provou ter uma boa coordenação entre os codificadores (*encoders*) ópticos, RFID (*Radio-Frequency Identification*, do inglês “Identificação por Radiofrequência”), GSM (*Global System for Mobile Communications*, do inglês “Sistema Global para Comunicações Móveis”), GPS, *Arduino* e *Raspberry Pi*, além de mostrar ser eficaz para coletar informações.

Quadro 1 - Resumo de metodologias para aplicação de manipuladores robóticos em ambientes ou cenários de risco.

Autores	Ano	Título da Publicação	Relação com o Trabalho
Marturi <i>et al.</i>	2017	Towards Advanced Robotic Manipulations for Nuclear Decommissioning	Análise de performance de sistemas robóticos
Lunghi <i>et al.</i>	2019	Multimodal Human-Robot Interface for Accessible Remote Robotic Interventions in Hazardous Environments	Interface intuitiva para controle de sistemas robóticos
French <i>et al.</i>	2016	Usability study to qualify a dexterous robotic manipulator for high radiation environments	Análise da implementação de sistemas robóticos remotamente operados em áreas contaminadas por altos níveis de radiação
Chen <i>et al.</i>	2017	Design and implementation of control system for nuclear pollution disposal robot based on wireless communication	
Petereit <i>et al.</i>	2019	ROBDEKON - Robotic Systems for Decontamination in Hazardous Environments	
Patic <i>et al.</i>	2017	Designing a Mobile Robot used for Access to Dangerous Areas	Aplicação de robôs modulares para missões em diferentes áreas de risco
Di Castro <i>et al.</i>	2018	CERNTAURO - A Modular Architecture for Robotic Inspection and Telemanipulation in Harsh and Semi-Structured Environments	
Di Castro <i>et al.</i>	2018	i-TIM: A Robotic System for Safety, Measurements, Inspection and Maintenance in Harsh Environments	
Lösch <i>et al.</i>	2018	Design of an Autonomous Robot for Mapping, Navigation, and Manipulation in Underground Mines	Aplicação de robôs autônomos em áreas de risco específicas
Zhong <i>et al.</i>	2019	Development of A Robot System Performing Maintenance Tasks on High-Voltage Power Transmission Lines	
Chowdhury <i>et al.</i>	2021	Implementation of Cost-Effective Bomb Defusing Robot with Live Streaming Dual Camera Interface	

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2021).

Os trabalhos mencionados no Quadro 1, descrevem a implementação de sistemas robóticos em diferentes ambientes, ou situações, de risco. A maioria dos trabalhos, focam em situações em que o ambiente de operação do robô está contaminado por altos níveis de radiação, isso se deve ao fato de que, com o avanço das tecnologias envolvendo a indústria nuclear, gerando lixo radioativo, e o campo da física de partículas, com aceleradores de partículas, é necessário garantir a segurança dos seres humanos que trabalham nas áreas.

Portanto, tem-se como objetivo, substituir os operários expostos a riscos por sistemas robóticos robustos, capazes de suportar a radiação e realizar as tarefas designadas com precisão. Além disso, os modelos de controle de manipuladores robóticos comuns no mercado utilizam joystick e teclado, o que não é muito intuitivo, necessitando de treinamento prévio extenso, especialmente quando se trata de operações delicadas. Para isso, alguns trabalhos abordam diferentes modelos de interfaces homem-robô, utilizando a imitação de movimentos humanos em tempo real, movimentos pré-programados, ou então permitindo intercalar entre funções autônomas e manuais, assim auxiliando o operador.

A seção a seguir irá tratar dos conceitos e técnicas de captura de movimentos humanos para o controle de manipuladores robóticos, avaliando diferentes métodos de coleta, processamento e fusão dos dados de diferentes classes de sensores, garantindo maior precisão na aquisição e reprodução dos movimentos do operador.

2.3 Processamento e Fusão de Dados de Sensores

O trabalho de Baldi *et al.* (2017) apresenta o sistema sensor e atuador vestível GESTO, *Glove for Enhanced Sensing and Touching*, O sistema, baseado em sensores inerciais e magnéticos para monitorar o movimento da mão do usuário, é equipado com dispositivos cutâneos para simular o *feedback* de força.

Nos últimos anos, vem crescendo o interesse em desenvolver novas soluções para monitorar o movimento do corpo humano com maior precisão e proporcionar ao usuário um *feedback* háptico realístico. Porém, a maioria das soluções existentes não são completamente vestíveis, ou portáteis, normalmente dependendo de ambientes estruturados com câmeras e sensores, ou dispositivos referenciados a um ponto fixo, normalmente no chão.

A captura e análise dos movimentos do corpo humano, em particular as mãos humanas, é fundamental em diversas áreas de aplicação, como por exemplo, reabilitação de movimentos, interação e interface homem-robô, jogos digitais, entre outras áreas similares. Neste caso, a possibilidade de vestir o dispositivo de captura de movimentos, torna-se um ponto importante, já que, por ser leve e portátil, não prejudica os movimentos do usuário.

Como metodologia de monitoramento, o trabalho focou no uso da tecnologia MEMS, *Micro-ElectroMechanical Systems*, para estimar o posicionamento da mão. A fim de fornecer *feedback* háptico, a luva foi equipada com sensores MARG, *Magnetic, Angular Rate and Gravity*, uma solução eficaz em termos de integração de *hardware* e capacidade de monitoramento.

Para renderizar a força aplicada a cada dedo, quando interagindo com um objeto, são utilizados motores DC que vibram sobre a pele, dando a sensação de toque. A luva é capaz de estimar os ângulos das juntas dos dedos, assim como a rotação da mão, levando em consideração uma referência global.

Uma possível desvantagem de combinar o uso de sensores magnéticos e motores DC, consiste em ter um material magnético permanentemente no mesmo dispositivo, o que pode levar a problemas de performance dos sensores magnéticos. Para superar esta restrição, a luva foi projetada de modo a tirar vantagem das limitações biomecânicas da mão humana.

Os experimentos de validação conduzidos em dez indivíduos saudáveis resultaram em um erro de orientação das juntas estimado de $3,06^\circ \pm 0,12^\circ$ para testes sem o uso dos dispositivos háptico, e um erro de $3,32^\circ \pm 0,15^\circ$ para testes com os dispositivos hápticos. Assim, concluiu-se que, embora exista a interferência magnética dos motores, que compõem o *feedback* de força para o usuário, o sistema demonstra eficácia para monitorar os movimentos da mão humana.

O estudo realizado por Maruyama *et al.* (2018) teve o objetivo de, em seu trabalho, desenvolver um sistema de captura de movimentos (MoCap – *Motion Capture*) do corpo humano em tempo real, utilizando unidades de medição inerciais (IMUs). Então, comparar a precisão da estimativa de movimento do sistema proposto com os resultados de um sistema MoCap óptico.

Sistemas de captura de movimentos tem sido amplamente utilizado em análises biomecânica de locomoção, realidade virtual e design de equipamentos ergonômicos. Normalmente, sistemas MoCap são capazes de medir ambos ângulo e

posição de cada junta do corpo humano, onde o sistema irá monitorar o movimento de marcadores reflexivos, vestidos pelo usuário, através de câmeras infravermelho instaladas no ambiente de análise. No entanto, sistemas baseados em dispositivos ópticos podem ser utilizados apenas em condições ideais de luminosidade, restringindo sua usabilidade a ambientes internos e pré-arranjados com os equipamentos ópticos, além do alto custo associado a tais equipamentos.

O método de captura proposto no trabalho consiste em cinco estágios, começando pelo posicionamento e calibração das 15 IMUs espalhadas uniformemente pela superfície do corpo do usuário: na cabeça, nas costas, nos ombros, nos antebraços, nas mãos, na cintura, nas coxas, nas canelas e nos pés. Cada IMU será utilizada para estimar os ângulos das juntas de um modelo humano digital (DHM).

Depois da calibração, os ângulos e posições das juntas são estimados a partir de um algoritmo de otimização por minimização de uma função objetivo, definida pelo somatório das funções de custo de diferença de orientação, custo de limitações do DHM estimado e custo de variação de movimento.

A função objetivo é minimizada utilizando o algoritmo Quasi-Newton e por fim, a posição e ângulos das juntas do DHM é determinada através da cinemática direta. Para validar o sistema proposto, são realizados experimentos monitorando dois tipos de movimentos de um usuário jovem, homem, com 1,82m de altura. O primeiro movimento consiste simplesmente em andar em linha reta e o segundo, sentar-se em uma cadeira.

Durante os experimentos os movimentos foram capturados com o sistema proposto, com as 15 IMUs, e com o sistema MoCap óptico da *Vicon*, com 57 marcadores reflexivos, simultaneamente, para comparar os resultados. O erro relativo na direção de movimento da cintura chegou em média a 8,02%, além disso, notou-se que o erro associado a posição tende a acumular com o avançar do tempo, portanto, para usos prolongados o autor sugere o uso de sensores como GPS para correção periódica do erro.

Liu *et al.* (2018) propõe o design de um sistema de captura de movimentos de baixo custo, utilizando unidades de medição inerciais vestíveis e sem fio, baseando-se em um sensor de 9 graus de liberdade, MPU9250, e um microcontrolador *Arm Cortex M3*.

Sistemas de captura de movimentos tem sido uma tecnologia importante em diversas áreas de aplicação, como por exemplo, sistemas de realidade virtual (VR – *Virtual Reality*), produções de cinema e jogos, treinamento de reabilitação e assistência médica, controle robótico, entre outras áreas. Os sistemas de captura de movimentos humanos atualmente utilizados consistem principalmente de equipamentos ópticos, os quais dependem da instalação de uma série de câmeras em um ambiente específico e marcadores no corpo de usuário, para detectarem o movimento e os ângulos das juntas do corpo. Embora efetivo, o sistema é de alto custo e requer que o ambiente seja bem iluminado, pois oclusões podem atrapalhar na captura dos movimentos ou causar erros no ângulo das juntas.

Com o avanço das tecnologias MEMS (*Micro-ElectroMechanical Systems*), a captura de movimentos utilizando sistemas inerciais tornou-se um novo ponto de pesquisa. A tecnologia MEMS utiliza unidades de medição inerciais, as quais não são afetadas por limitações de espaço ou fontes de luminosidade, além de serem de baixo custo, comparados a sistemas ópticos. O sistema consiste em três partes, os sensores IMUs sem fio, posicionados nos membros do corpo do usuário, cada um fornecendo suas informações de atitude, um computador que recebe os dados das IMUs e por último um programa, desenvolvido através da plataforma Unity, processa os dados e atualiza os movimentos em um modelo humano digital.

A fim de obter a performance do sistema, foram realizados, inicialmente, alguns testes dos sensores para garantir que os ângulos estão de acordo com seu posicionamento. Em um plano estático e horizontal, o sensor se estabiliza no ângulo 0° , com pequenas variações de $\pm 0,25^\circ$. As variações angulares são muito pequenas, demonstrando a estabilidade do sensor que, para esta aplicação, é considerado estável.

O sistema demonstrou confiabilidade e performance, sendo capaz de manter uma taxa de atualização de 80 FPS, entre o movimento do usuário e o movimento do modelo humano digital.

Um método baseado em IMUs para monitorar, em tempo real, a postura de movimento e posição do corpo humano é introduzido no trabalho de Li *et al.* (2020). A tecnologia de captura de movimentos (MoCap – *Motion Capture*) tem mostrado grande valor de aplicação no campo de controle de robôs, entretenimento interativo, realidade virtual, reabilitação e análise do corpo humano durante a prática de esportes.

As tecnologias MoCap são subdivididas em diversas categorias, óptica com marcadores reflexivos, óptica sem marcadores, inercial, magnética e sistemas de monitoramento mecânico e acústico. A maioria desses sistemas MoCap são de alto custo, necessitam de instalações complexas nos ambientes de aplicação, mas com a vantagem de possuírem alta resolução na captura de movimentos. Comparado a sistemas ópticos, por exemplo, os sistemas inerciais, IMUs, não são dependentes de luminosidade, podendo ser facilmente implementados em ambientes escuros ou a luz do dia, além de serem mais acessíveis.

Foram estabelecidos quatro modelos cinemáticos, de acordo com os quatro estados do posicionamento dos pés durante as atividades diárias do corpo humano, o pé esquerdo no chão, o pé direito no chão, ambos os pés no chão e o modelo cinemático da pélvis para quando os pés não estiverem em nenhum dos estados estacionários. Esses modelos podem comutar durante o monitoramento, para identificar essa troca de posição foi utilizada a integral da aceleração. A combinação desses modelos cinemáticos estacionários com o modelo cinemático da pélvis melhora o desempenho da captura de movimentos, evitando o acúmulo de erros causados pela aceleração de longo prazo.

Os resultados dos experimentos mostraram que o monitoramento de postura e posição pode ser realizado com precisão, gerando um erro de posição de aproximadamente 3,6%. O método não requer informações adicionais de dispositivos externos, as IMUs são leves, pequenas e fáceis de vestir, além de não estar limitadas a ambientes previamente estruturados, sendo versátil e flexível para captura de movimentos na prática de esportes ao ar livre.

O trabalho de Nakamura & Hase (2020) descreve um método de detecção de movimentos dos braços humanos utilizando IMUs vestíveis. Em diversas áreas, a captura de movimentos e atitude do corpo humano tem sido alvo de pesquisa. Dentre os métodos de captura de movimentos incluem os sistemas ópticos utilizando marcadores reflexivos e câmeras, comumente utilizados na indústria cinematográfica. No entanto, esse método possui limitações de ambiente e condições de luminosidade.

O trabalho tem como objetivo de desenvolver um método de monitoramento dos movimentos do corpo humano sem estas limitações, permitindo que o usuário continue o monitoramento durante atividades físicas ao ar livre, por exemplo. O autor propõe que sejam vestidos dispositivos com IMUs de 6 DoF no antebraço, próximo ao pulso, e no braço, entre o ombro e o cotovelo.

Esses dispositivos são capazes de transmitir as informações de orientação e aceleração através de comunicação sem fio, e os dados são processados por um filtro de Kalman, para remover ruídos das medições feitas pelo giroscópio, e é implementado um filtro de média móvel, para compensar o erro acumulado pelo acelerômetro. Foram conduzidos experimentos para comparar o desempenho dos sensores com, e sem, a implementação dos filtros, onde foi possível observar a eficácia e estabilidade que tais filtros proporcionam.

Liu *et al.* (2018) propõe, em seu trabalho, um método tri-adaptativo, capaz de otimizar três parâmetros que afetam a performance de sensores com a tecnologia MEMS, a amplitude adaptativa, a frequência de amostragem adaptativa e a frequência de saída adaptativa.

Sensores digitais, que utilizam a tecnologia MEMS, são implementados em diversas áreas de aplicação, por exemplo, na indústria, navegação e posicionamento. Para alcançar a resolução completa de um sensor, normalmente a tendência é diminuir a amplitude dos dados coletados, levando ao problema comum de “*out-of-range*” (fora de escala). A performance do sensor é normalmente feita a partir de uma otimização de dois entre três parâmetros, a resolução, a amplitude e a eficiência, mas é difícil de otimizar os três.

O trabalho propõe um método tri-adaptativo para melhorar a resolução dos sensores, onde o objetivo é combinar os dados de sensores de baixa resolução a fim de gerar dados de alta resolução. A comunicação entre os sensores é realizada através da interface I²C à 400 kHz ou então através da interface SPI à 1 MHz. A frequência de saída padrão é de 100 Hz, a qual atende a maioria das aplicações em tempo real. A fusão dos dados é feita a partir da média dos dados de cada sensor, podendo aplicar um peso para cada dado, se necessário.

Neste trabalho, foram considerados todos os pesos iguais a 1, o que, em termos de precisão da fusão de dados, não é a melhor opção, mas é a mais simples e com um equilíbrio adequado entre precisão e complexidade computacional. Para verificar a performance do algoritmo proposto, foram configuradas duas plataformas, uma baseada nos sensores MPU6050, um acelerômetro e giroscópio MEMS de baixo custo, e a outra baseada nos sensores MPU9250, um módulo multi-chip com acelerômetro, giroscópio e magnetômetro. Em um experimento, foram posicionados os sensores em uma mesa rotativa, então a velocidade de rotação poderia ser calculada a partir da força centrípeta.

Os resultados dos testes mostraram que o algoritmo proposto é capaz de melhorar a resolução dos sensores em ambas as plataformas, além disso, os experimentos de simulação numérica indicam que o método proposto pode ser generalizado para qualquer tipo de sensor digital, onde uma quantidade grande de dados de baixa resolução, podem ser combinados a fim de gerar uma alta resolução. Porém, os autores apontam que a qualidade dos dados deve ser monitorada para garantir integridade, por exemplo a perda de dados, *overflow* de dados e outros comportamentos anormais podem piorar a qualidade com a fusão desses dados. Portanto, um esquema de validação de dados é necessário, antes da fusão dos dados, para identificar e eliminar os *outliers* e falhas do sensor.

Um novo algoritmo para o processamento de medidas de duas unidades de medição inerciais durante o movimento de um objeto é proposto por Liang *et al.* (2019), em seu trabalho, a fim de estimar as componentes de erro dos sensores inerciais sem informações adicionais de navegação, fatores de erro escalares e ângulos de desalinhamento.

Sistemas de navegação inerciais (INS – *Inertial Navigation Systems*) são utilizados para determinar os parâmetros de atitude e navegação de diversos equipamentos móveis, como veículos terrestres, aviões, navios e sistemas robóticos.

Os INS têm uma atenção especial para aplicações onde outros sistemas, como GPS, não estão disponíveis, como por exemplo em aplicações subaquáticas ou subterrâneas. Um problema bem conhecido em INSs, é o acúmulo de erros de medição com o tempo. Implementando a técnica de modulação rotacional (RM – *Rotation Modulation*) para a IMU, é possível reduzir de maneira significativa esses erros.

Usando uma IMU rotacionando periodicamente, é possível aumentar a precisão do sistema pelo fato de que as tendências (*biases*) constantes, no giroscópio e acelerômetro, tornam-se variáveis. Outra maneira de aumentar a precisão e autonomia de um INS está associada ao uso de uma IMU redundante. Neste trabalho, os autores consideram um INS com duas IMUs montados em plataformas rotacionais uniaxiais separadas.

O algoritmo proposto leva em consideração erros dos dados de ângulos de um *encoder* para processar as medidas das duas IMUs, a fim de estimar e compensar pelas tendências do giroscópio, fator de erros escalares e ângulos de desalinhamento.

Foram conduzidos simulações e experimentos em uma mesa rotativa para avaliar a eficiência do algoritmo proposto. Os resultados mostraram uma melhoria de cinco vezes na precisão da atitude e dos ângulos direcionais, comparando com sistemas contendo apenas uma IMU. O sistema proposto, com duas IMUs, é inferior em termos de volume, peso e consumo, principalmente devido ao motor adicional necessário para rotacionar as IMUs. Além disso, a vibração do motor e os erros causados no acelerômetro, pelo material magnético, podem reduzir a performance do sistema.

Park *et al.* (2016), em seu trabalho, propõe uma interface de operação intuitiva, para controlar remotamente um braço robótico com 6 graus de liberdade, utilizando unidades de medição inerciais (IMUs) e uma luva háptica para ter o *feedback* de força da garra do manipulador.

Com o desenvolvimento das tecnologias de automação, sistemas tele operados tem sido implementado para realizar tarefas em ambientes extremos, os quais apresentam riscos ou até mesmo sejam de difícil acesso à seres humanos. No entanto, interfaces de controle que utilizam apenas teclado e joystick não são intuitivas, e requerem treinamento prévio de operadores. Além disso, dificuldades na comunicação sem fio impedem a aplicação de tais sistemas em alguns ambientes de risco, como por exemplo, minas subterrâneas ou ambientes contaminados por radiação. Para substituir essa interface de controle não intuitiva, é desenvolvida uma interface baseada na captura de movimentos do operador humano, permitindo que um operário inexperiente realize qualquer tarefa de manipulação remota.

Utilizando medições de ângulos das juntas coletados pelas IMUs, é possível obter, através da cinemática direta, a posição do pulso do braço humano. E esta é usada para calcular os ângulos das juntas do robô, através da cinemática inversa. A mão do robô manipulador é controlada pelas medições dos ângulos das juntas dos dedos, na luva háptica, a qual também fornece *feedback* de força da mão robótica. Foi utilizado uma rede 3GPP-LTE e uma VPN como método de comunicação entre o dispositivo mestre e o manipulador robótico.

Foram realizados experimentos para verificar se o braço robótico é capaz de seguir o movimento do usuário sem atrasos longos ou diferença na trajetória. Em um dos experimentos, onde o movimento do braço humano desenha um círculo, o braço robótico foi capaz de copiar o movimento sem diferença de trajetória, mas com um atraso de 0,4 segundos.

Em outro experimento, onde o usuário tinha que pegar uma garrafa de água e derramar a água em um copo, o braço robótico seguiu com sucesso o movimento do usuário.

O trabalho de Gu *et al.* (2018), descreve o desenvolvimento de um sistema de controle robótico inteligente baseado na detecção da postura e movimento da cabeça, com o sensor MPU6050 (uma unidade de medição inercial, IMU), além de executar comandos a partir de movimentos musculares da face, detectados a partir de sensores de eletromiografia (EMG).

A vida diária de pessoas com deficiências físicas possui grandes dificuldades e limitações. A fim de melhorar as vidas de algumas dessas pessoas, por exemplo pacientes tetraplégicos, o trabalho visa no desenvolvimento de um manipulador robótico controlado pelos movimentos da cabeça e dos músculos da face. O sistema de controle movimenta o manipulador robótico de acordo com o movimento da postura da cabeça do usuário, detectado pela IMU. O controle de abrir e fechar a garra do manipulador é realizado a partir da leitura de sinais mioelétricos faciais. Além disso, o sistema pode ser inicializado, desligado e configurado a partir de comandos de voz.

Para processar os dados de atitude da IMU, foram combinados os algoritmos do método de quatérnios e do filtro de Kalman. O método de quatérnios é um grupo de equações diferenciais lineares que requer apenas 4 variáveis para resolver, sendo mais simples do que o método de decomposição vetorial.

O filtro de Kalman é um algoritmo de otimização recursiva de processamento de dados, o qual pode ser aplicado a sistemas dinâmicos sujeitos a interferências aleatórias. Nesse algoritmo, o estado do sistema é estimado linearmente, sem *bias*, e o resultado apresenta variações mínimas de erro.

Para comunicar os dispositivos de controle e do manipulador é estabelecida uma comunicação serial Bluetooth entre eles. Para validar o sistema robótico, foi realizado um experimento onde o usuário deve vestir os módulos de aquisição de dados em sua cabeça, iniciar o sistema e efetuar 6 ações: virar à esquerda, virar à direita, inclinar para frente, inclinar para trás, inclinar para a esquerda e inclinar para a direita. O usuário também pode utilizar os comandos de voz “*open*” e “*shut down*” para controlar a operação e reinicialização do sistema, respectivamente.

Quando os músculos faciais do usuário relaxam ou contraem, a garra do manipulador abre e fecha de acordo com o sinal miográfico lido. O usuário teve de mover um objeto específico, até uma posição específica, utilizando apenas os

comandos com a cabeça, e os resultados do experimento demonstraram que as ações de manipulação são consistentes com as ações faciais do usuário em tempo real.

Em seu trabalho, Narayan *et al.* (2019) modela um sistema exoesqueleto de membros inferiores (LLES - *Lower Limb Exoskeleton System*) para reabilitação de crianças, entre 8 e 12 anos, com dificuldades de movimento por fraqueza, ou deficiência, nos nervos. O exoesqueleto dá assistência na movimentação ao caminhar, além disso, para monitorar a movimentação são utilizadas IMUs, obtendo as variações angulares nas juntas das pernas.

Nos últimos anos, equipamentos médicos têm sido desenvolvidos e aprimorados para auxiliar na locomoção e reabilitação de pacientes. De acordo com o censo Indiano de 2015, aproximadamente 1,8 milhões de pessoas sofrem com deficiência ou fraqueza nos nervos dos membros inferiores e, por dificuldades financeiras, a maioria dessas pessoas optam pelo uso da cadeira de rodas para compensar a falta de mobilidade. No entanto, cadeiras de rodas possuem suas limitações, como o uso em terrenos irregulares, volumoso para locomover-se em ambientes estreitos, entre outras dificuldades.

O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema exoesqueleto para membros inferiores, auxiliando na reabilitação de crianças paraplégicas. O exoesqueleto possui 6 DoF, cada perna do LLES é composta por 3 conexões: no quadril, na panturrilha e no pé. As juntas do quadril são atuadas por motores de passo. As juntas dos joelhos são atuadas com a ajuda de um mecanismo de parafuso de avanço linear, utilizando suportes de aço. E as juntas dos calcanhares permanecem passivas, seguindo a natureza do movimento.

A fim de monitorar a trajetória de locomoção, são implementadas IMUs para obter a variação dos ângulos das juntas de uma criança saudável. Esses dados são posteriormente utilizados como referência para o LLES. Para a modelagem dinâmica do LLES, é implementado o método de Euler-Lagrange para a dinâmica individual de cada perna, simplificando o sistema como um mecanismo de 3 DoF. Como estratégia de controle, foi implementada a transposta da matriz Jacobiana, pela sua simplicidade e capacidade de manter resultados melhores em casos de singularidade. Os parâmetros do LLES podem variar com diferentes massas corpóreas. Estimando as massas dos membros superiores, massa da das coxas, das juntas, das panturrilhas, dos calcanhares e pés, e medindo os comprimentos entre as juntas, é possível aplicar a estratégia de controle.

Os autores observaram que a trajetória controlada varia de acordo com diferentes ganhos. O conjunto de ganhos com maior desempenho mostra potencial para monitorar a trajetória do movimento com maior precisão. Os torques e velocidades angulares que atuam nas juntas do LLES são estimados com a estratégia de controle de transposta da Jacobiana. No entanto, os autores sugerem que seria necessária uma técnica de controle mais precisa para melhorar o equilíbrio do dispositivo, especialmente em situações extremas.

O projeto e desenvolvimento de um sistema robótico biônico baseado em internet das coisas (IoT – *Internet of Things*) é apresentado por Li *et al.* (2020), dividindo seu trabalho em duas partes, o desenvolvimento de um dispositivo sensorial vestível para controle e um robô manipulador. Um sistema robótico biônico se refere a um sistema elétrico e mecânico capaz de imitar a estrutura biológica e características de movimento do ser humano.

Robôs biônicos têm mostrado uma boa perspectiva de aplicação em ambientes de risco ou inacessíveis a seres humanos, como em desarmamento de bombas, exploração espacial, missões de emergência e auxílio em desastres. Atualmente, com o avanço das tecnologias da informação, a tecnologia IoT desempenha um papel importante em sistemas inteligentes modernos, na indústria, comércio, manufatura e no dia a dia do ser humano.

O sistema robótico biônico baseado na tecnologia IoT, desenvolvido no trabalho, é composto por um dispositivo sensorial vestível, capaz de capturar as informações de atitude do movimento do corpo humano utilizando sensores inerciais. Esses dados de atitude coletados são processados e replicam o movimento dos braços do usuário para os braços do robô. Assim, o sistema robótico proporciona uma interface amigável para qualquer usuário, sem a necessidade de passar por longos treinamentos.

O núcleo do sistema proposto é constituído de um microcontrolador *Arm Cortex M4*. Os sensores utilizados são IMUs, de 6 DoF, que utilizam a tecnologia MEMS para obter dados de aceleração transversal e aceleração angular. Os dados são processados por um algoritmo de otimização de enxame de partículas e pelo algoritmo do filtro de Kalman. O sistema desenvolvido obteve sucesso em coletar as informações de postura e posicionamento do corpo do usuário, processá-los e transmitir em tempo real os dados processados ao robô. O sistema é estável e seguro, possuindo funções de proteção, de baixo custo e de fácil controle.

Glonek & Wojciechowski (2017), propõe em seu trabalho um método de orientação das juntas dos membros do corpo humano baseado na fusão de dados coletados por duas classes de dispositivos: sensores de profundidade e unidades de medição inerciais. Uma das principais tecnologias por trás da interação homem-máquina e do diagnóstico de movimentos humanos é a captura e monitoramento do movimento dos membros do corpo humano.

Desde 1973, inventados por Gunnar Johanson, tais sistemas de captura de movimentos eram disponibilizados apenas para profissionais. No entanto, desde 2010, quando a empresa Microsoft® lançou o *Kinect*, a captura de movimentos tornou-se acessível e disponível para aqueles que pudessem comprar. Embora tenha sido desenvolvido, principalmente, para atividades de movimentação física em jogos, o *Kinect* tornou-se popular entre os pesquisadores, aplicando o dispositivo em diferentes cenários como, por exemplo, reabilitação de pacientes com dificuldades motoras. Outro método de captura de movimentos pode ser feito com dispositivos inerciais como acelerômetros e giroscópios, estes dispositivos permitem o reconhecimento de aceleração translacional e rotacional, garantindo precisão no monitoramento do movimento e ângulo das juntas do corpo humano.

O trabalho aborda a fusão dos dados coletados pelos sensores de profundidade (*Kinect*) e inerciais (IMUs), a fim de compensar as limitações das medições de ambos os dispositivos e corrigir suas imperfeições. O método de fusão dos dados é dividido em diversas fases sequenciais, começando pela inicialização das IMUs e filtragem dos dados das IMUs, coleta de dados do *Kinect* e correção de ruídos nos dados, verificação de sincronização entre os sensores, fusão dos dados de ambos os sensores e estimativa da posição das juntas de acordo com o resultado da fusão dos dados.

As IMUs ficam posicionadas na superfície do corpo do usuário e o *Kinect* fixo em uma superfície a frente do usuário, assim, para reduzir o número de transformações e facilitando a fusão dos sinais dos sensores, o espaço de coordenadas do *Kinect* é admitido como espaço de coordenadas global.

A fim de verificar a precisão do método, foram conduzidos diversos experimentos, utilizando o sistema de captura de movimentos *Vicon* como referência. Foram monitorados os movimentos das mãos de três usuários experimentais, onde o *Kinect*, duas IMUs posicionadas na superfície da mão e no antebraço e o sistema *Vicon* monitoram simultaneamente os movimentos.

Cada usuário teve de realizar quatro exercícios, duas vezes cada com cinco repetições por série. Cada série de exercícios iniciava com a pose T (*T-Pose*), assim tendo uma posição inicial das juntas como referência para a sincronização do dispositivo. O método proposto teve uma redução de 18% no erro estimado da posição da junta do cotovelo e 16% no erro estimado da posição da junta do pulso, comparando com o método de Kalkbrenner (2014), utilizado como referência pelos autores.

Uma solução de otimização não-linear para sistemas de captura de movimentos dos membros superiores do corpo humano é proposta por Zhang *et al.* (2020). A tecnologia de captura de movimentos do corpo humano pode ser aplicada à medicina, esportes, indústria cinematográfica, e muitas outras áreas.

Nos últimos anos, o desenvolvimento da colaboração homem-robô (HRC – *Human-Robot Collaboration*) impõe requisitos mais elevados de precisão e estabilidade dos sistemas MoCap. Na HRC, as informações de posição e rotação das juntas do esqueleto humano devem ser identificadas pelo sistema, assim o robô pode colaborar com o operário humano de maneira segura, precisa e eficiente.

O sistema proposto no trabalho combina as características da alta precisão dos dados capturados pelo dispositivo *Kinect*, da Microsoft, e a estabilidade dos dados de orientação dos membros coletados por 5 IMUs. Assim, a fusão desses dados pode compensar na precisão de captura dinâmica do corpo humano, distúrbios magnéticos e condições de oclusão. Essa fusão dos conjuntos de dados é feita por um método de otimização não-linear.

Para verificar sua aplicabilidade, o sistema proposto foi implementado em um caso simples de HRC, onde o operador humano e o manipulador robótico cooperam para carregar uma vara de madeira. Por conveniência, o sistema de coordenadas da plataforma do robô operador é tomado como sistema de coordenadas global para o sistema de captura de movimentos.

O método de captura de movimentos proposto no trabalho demonstrou ser capaz de compensar a suscetibilidade do *Kinect* à oclusão, e compensar a baixa precisão das IMUs em casos de distúrbios magnéticos, assim aumentando a precisão da captura de movimentos em ambientes imprevisíveis e com interferências complexas.

Um controlador de modelo virtual que utiliza dois sensores de torque de 6 DoF para controlar os movimentos das articulações de um exoesqueleto é introduzido por

Zimmermann *et al.* (2020) em seu trabalho. A interação física homem-robô tem sido impulsionada pela crescente fusão de robôs no ambiente de trabalho humano. Muitos desses sistemas renderizam ambientes táteis para o usuário com um desempenho razoavelmente bom, mas para sistemas universais, geralmente surge dificuldade em alcançar a fidelidade de renderização adequada como, por exemplo, para robôs de reabilitação de pacientes.

Tendo em vista essa dificuldade, é apresentado no trabalho um método de linearização de realimentação através de um controlador de modelo virtual usando dinâmica inversa. É introduzido um controlador que renderiza uma massa virtual na mão do exoesqueleto, convertendo os valores de aceleração virtual desejados em torque equivalente nas juntas do exoesqueleto. Para compensar os erros no modelo de dinâmica inversa, os autores propõem um controlador de aceleração em malha fechada, esse método de controle utiliza sinais de múltiplos sensores com a medida de aceleração direta como realimentação.

A fim de proporcionar uma largura de banda maior, e um sistema de estimação de aceleração com baixa tendência (*low-bias*), é proposto um observador de estado, o qual faz a fusão das informações de codificadores (*encoders*) nas juntas com as informações de orientação de 7 IMUs de baixo custo. O desempenho da estrutura de controle proposta foi validado no braço do exoesqueleto ANYexo, desenvolvido no trabalho de Zimmermann *et al.* (2019).

Os experimentos realizados demonstraram que o controle de aceleração em malha fechada melhora a precisão da dinâmica inversa. O método é útil para todas as aplicações que envolvem dinâmica inversa, sendo possível aplicá-lo a dispositivos com ferramentas hápticas, ou também manipuladores que precisam de interações precisas.

Quadro 2 - Resumo de metodologias para o processamento e fusão de dados de sensores.

Autores	Ano	Título da Publicação	Relação com o Trabalho
Baldi <i>et al.</i>	2017	GESTO: A Glove for Enhanced Sensing and Touching Based on Inertial and Magnetic Sensors for Hand Tracking and Cutaneous Feedback	Sistemas de captura de movimentos utilizando apenas IMUs
Maruyama <i>et al.</i>	2018	Constraint-Based Real-Time Full-Body Motion-Capture Using Inertial Measurement Units	
Liu <i>et al.</i>	2018	The Design of Wearable Wireless Inertial Measurement Unit for Body motion Capture System	
Li <i>et al.</i>	2020	A Multi-model Human Motion Tracking Approach with Wearable IMU Sensors	
Nakamura & Hase	2020	Measuring Arm Motions Using the Inertial Measurement Unit	
Liu <i>et al.</i>	2018	Tri-Adaptive Method for Improving the Resolution of MEMS Digital Sensors	Métodos de configuração e processamento de dados de sensores inerciais
Liang <i>et al.</i>	2019	A Solution to the Attitude Problem Using Two Rotation Units of Micromechanical Gyroscopes	
Park <i>et al.</i>	2016	A tele-operation interface with a motion capture system and a haptic glove	Controle de sistemas robóticos baseados em sensores inerciais
Gu <i>et al.</i>	2018	Intelligent Manipulator Based on Head Posture Detection	
Narayan <i>et al.</i>	2019	Reference Trajectory based Jacobian Transpose Control of a Novel Lower Limb Exoskeleton System for Children	
Li <i>et al.</i>	2020	Bionic robot based on Internet of Things	
Glonek & Wojciechowski	2017	Hybrid Orientation Based Human Limbs Motion Tracking Method	Fusão de dados de diferentes sensores para compensação de erros
Zhang <i>et al.</i>	2020	Human Motion Capture Based on Kinect and IMUs and Its Application to Human-Robot Collaboration	
Zimmermann <i>et al.</i>	2020	Towards Dynamic Transparency: Robust Interaction Force Tracking Using Multi-Sensory Control on an Arm Exoskeleton	

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2021).

Definidos os conceitos básicos para o entendimento dos componentes que são abordados no trabalho e o referencial teórico, expondo trabalhos relacionados aos conceitos aplicados, partimos para o próximo capítulo, onde serão abordados em detalhes os métodos aplicados no processamento dos dados que cada sensor captura, assim como as técnicas de combinação, ou fusão, desses dados para compensar o erro associado a cada sensor.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, explicando desde a ideia inicial, passando pela pesquisa dos fundamentos necessários para a implementação, até o desenvolvimento e validação do sistema.

3.1 Visão Geral do Projeto

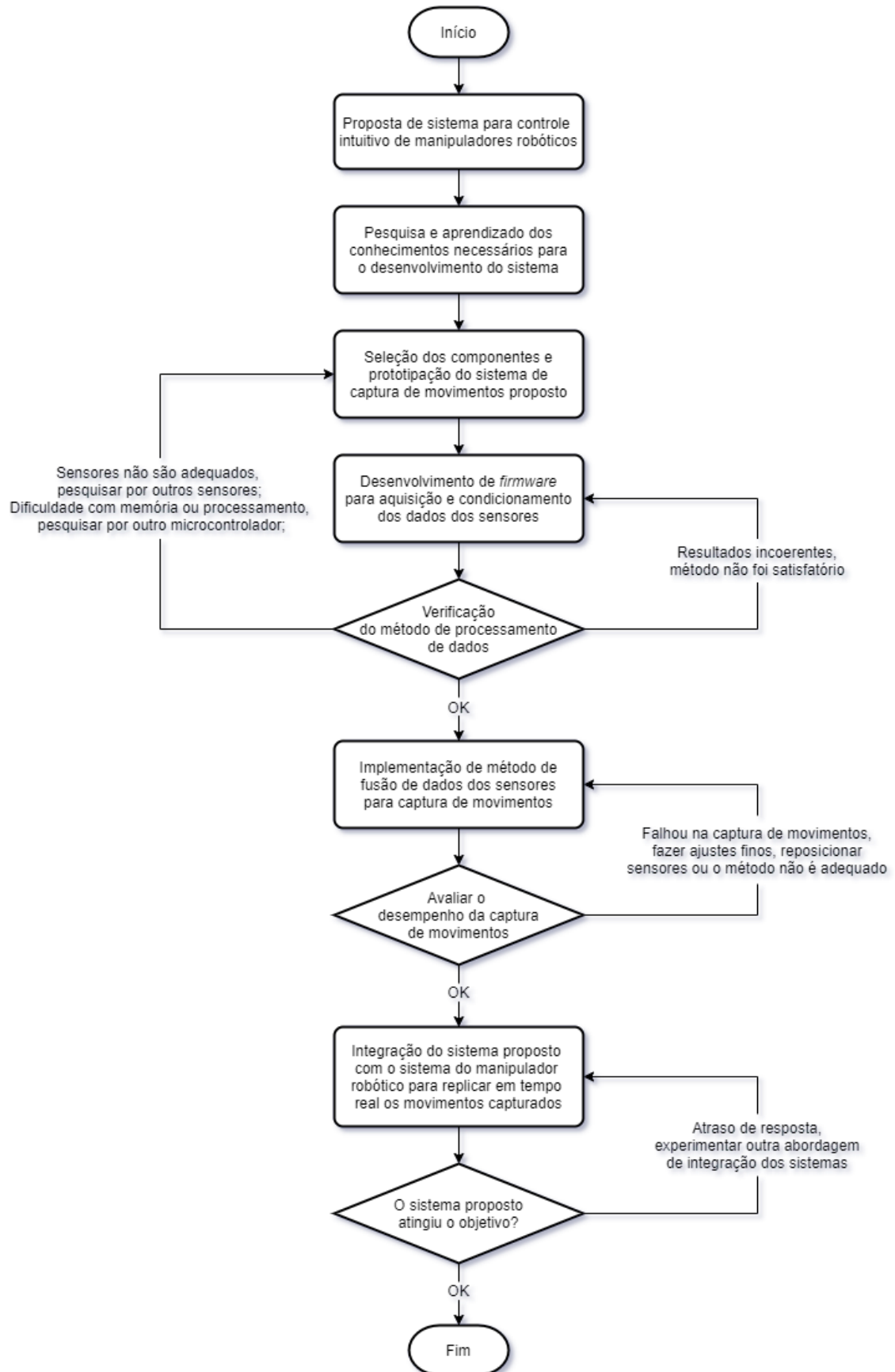
O trabalho teve início a partir da ideia de tornar o controle de manipuladores robóticos mais simples e intuitivo, propondo um método que utilize os próprios movimentos das mãos do operador humano para controlar a ferramenta de braços robóticos. Com essa proposta em mente, foi realizada a pesquisa dos fundamentos teóricos e práticos necessários para a implementação em hardware e *firmware* do sistema, buscando métodos e soluções para a captura e processamento de dados e entender o manuseio e programação do manipulador robótico escolhido.

A partir dos conhecimentos adquiridos na etapa de pesquisa, é feita uma seleção de componentes para a prototipação do sistema, buscando sensores e um microcontrolador adequados para a aplicação. Então, foi desenvolvido o hardware para o sistema de captura de movimentos. O desenvolvimento de hardware é realizado de maneira progressiva em paralelo com o *firmware*, fazendo testes e calibração de cada componente, assim como o condicionamento dos dados coletados, antes de partir para a implementação do próximo

Concluída a prototipação do hardware para o sistema proposto, já com a aquisição e condicionamento dos dados verificados, são implementados métodos de fusão dos dois tipos de dados, angulares e inerciais, para compensação de erros associados aos tipos de medição e limitações de cada sensor.

Como última etapa de desenvolvimento, é feita a integração do sistema de captura de movimentos proposto com o manipulador robótico DOBOT Magician. Nesta etapa, são avaliados os métodos de comunicação que proporcionem o menor atraso possível, relevando a velocidade dos movimentos e dando prioridade para a precisão da reprodução dos movimentos capturados. A ordem de desenvolvimento do projeto, como descrito nesta seção, pode ser observada no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma das etapas do projeto.



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2021).

Com o sistema desenvolvido, são feitos experimentos com usuários inexperientes com a operação de manipuladores robóticos, analisando o desempenho do sistema comparando com os métodos de controle tradicionais, com joystick, teclado e mouse.

3.2 Sistema Proposto

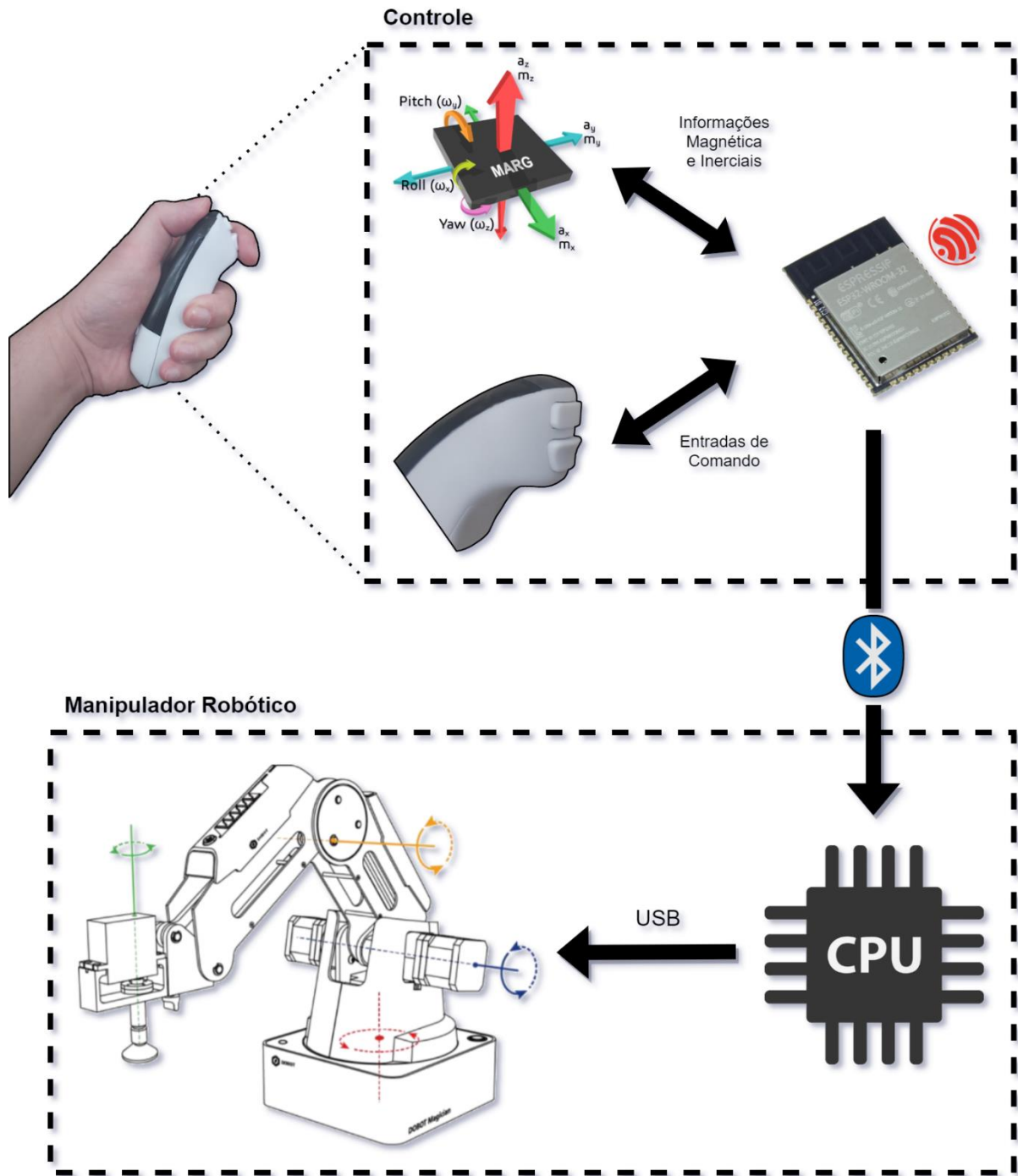
O sistema proposto, representado na Figura 17, consiste em um controle (joystick) para uma única mão, equipado com um microcontrolador ESP32, interfaceando dois botões táteis e um módulo MPU9250, que comporta três sensores: acelerômetro, giroscópio e magnetômetro.

O controle tem a função de identificar, através dos sensores magnético e inerciais, a orientação e aceleração do dispositivo (atitude) do dispositivo na mão de um operador e transmitir essas informações para uma unidade de processamento diretamente conectada a um manipulador robótico. Esse sistema proporciona um controle intuitivo, que permite que qualquer operador, seja ele experiente ou não, tenha a capacidade de trabalhar com o manipulador utilizando os próprios movimentos manuais.

Inicialmente, o sistema tinha o objetivo de ser utilizado com um manipulador antropomórfico, sendo necessário, além de computar a atitude da mão do operador, projetar e desenvolver uma luva para capturar o movimento de cada dedo de sua mão, no entanto, em termos de hardware, o sistema fica limitado apenas a este tipo de manipulador. Portanto, visando abranger uma amplitude maior de possíveis ferramentas (garra, ventosa, solda, corte, etc.), opta-se por implementar o controle dos atuadores da ferramenta do manipulador, assim como frenagem instantânea quando necessário, através de botões táteis presentes no joystick.

Neste trabalho, o sistema proposto utiliza da comunicação Bluetooth para transmitir os comandos do joystick para a unidade de processamento central (CPU) do manipulador. Como unidade de processamento, foi utilizado um computador com sistema operacional Windows, conectado via USB a um manipulador robótico DOBOT, modelo Magician, disponibilizado pelo Laboratório de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Figura 17 – Diagrama do funcionamento do sistema proposto.



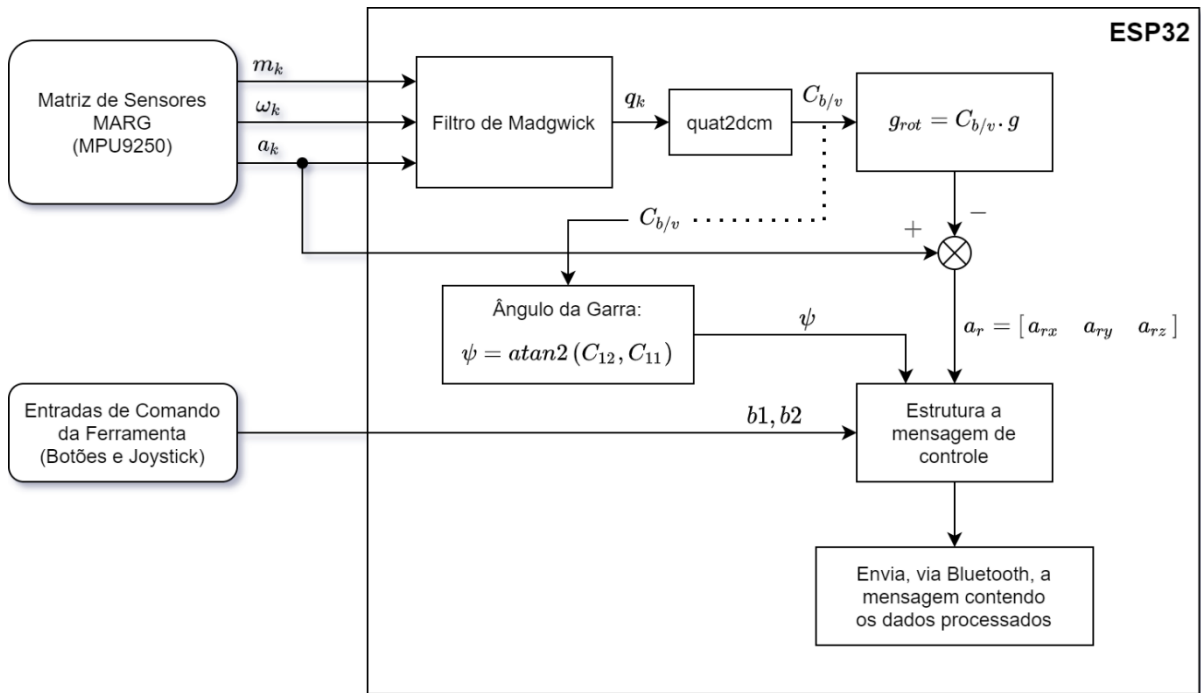
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

Como pode ser observado na Figura 17, o projeto é dividido em duas partes, o sistema de comando e monitoramento de atitude do controle (bloco superior) e o sistema operacional do manipulador robótico (bloco inferior).

O controle deve ser capaz de captar e transmitir a aceleração pura do movimento nos três eixos do espaço, $a_r = [a_{rx} \ a_{ry} \ a_{rz}]$, o ângulo de rotação da

ferramenta, ψ , e os comandos de atuação da ferramenta e frenagem do manipulador. O diagrama de blocos do sistema de comando e monitoramento de atitude é ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Diagrama de blocos do controle.

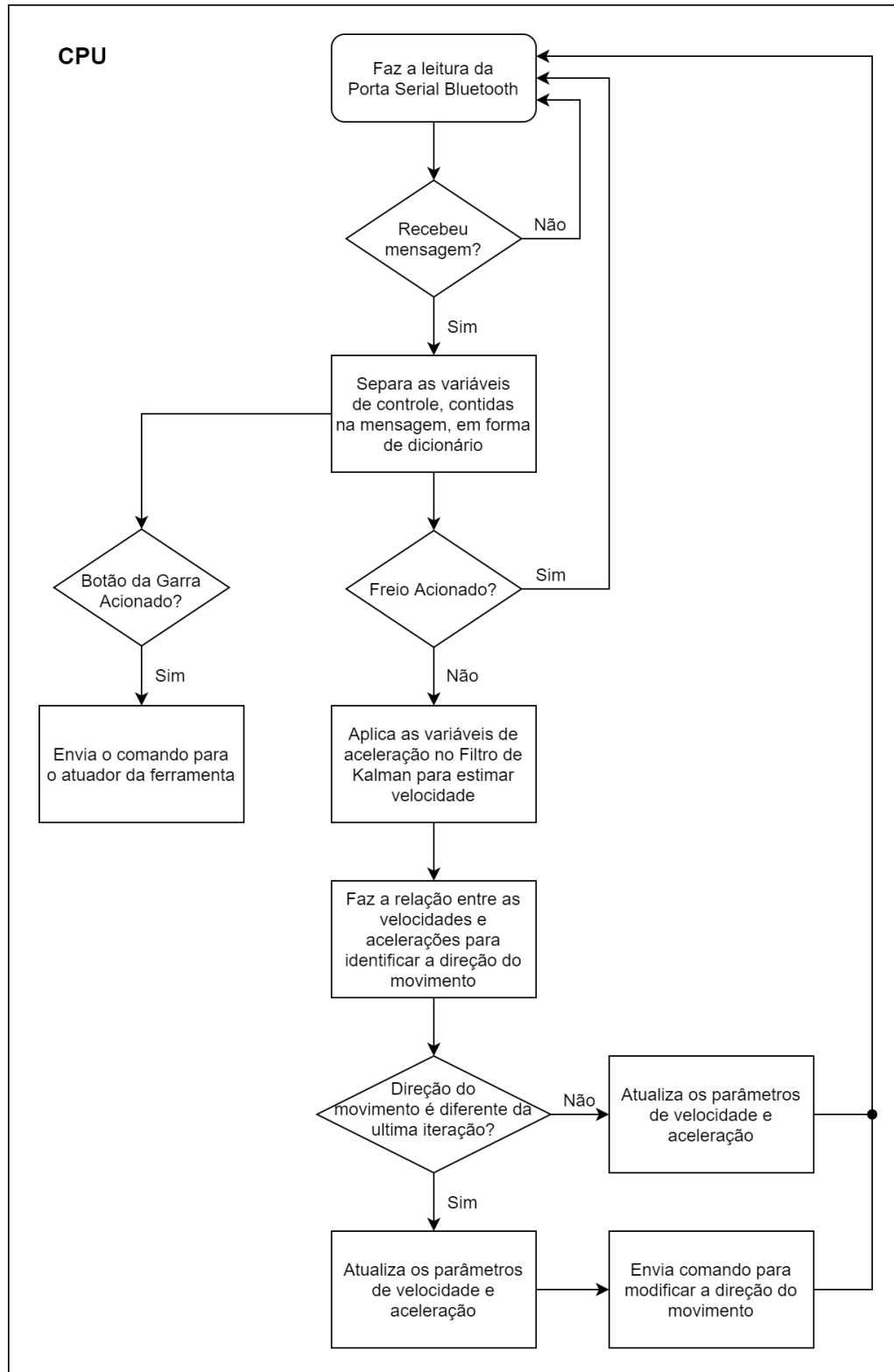


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

Como pode ser observado na Figura 18, as medições instantâneas realizadas pela matriz de sensores MARG são utilizadas como sinais de entrada para o Filtro de Madgwick, o qual realiza a estimação de orientação do dispositivo.

A segunda parte do projeto, o sistema operacional do manipulador robótico, ilustrado pelo diagrama da Figura 19, tem a função de receber as informações transmitidas pelo controle do operador, fazer o processamento destes dados para melhor se adequar ao manipulador e atualizar o estado do manipulador, enviando comandos na linguagem do próprio sistema robótico para movimentar, ou frear, os eixos e comandar os atuadores da ferramenta.

Figura 19 – Diagrama de blocos do sistema operacional do manipulador robótico.



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

Na seção 3.3, são abordadas as etapas de desenvolvimento, assim como o funcionamento de cada bloco do sistema.

3.3 Desenvolvimento e Funcionamento do Sistema

Nesta seção é abordado o funcionamento de cada bloco do sistema proposto, aplicando os conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento do *firmware*, assim como as dificuldades encontradas durante a execução prática do projeto.

Os tópicos do projeto são abordados nas subseções 3.3.1 a 3.3.6, proporcionando um melhor entendimento dos métodos utilizados e uma breve análise matemática do sistema.

3.3.1. Sensores, Comandos e Microcontrolador

O principal componente do projeto é a matriz de sensores triaxiais MARG (*Magnetic, Angular Rate and Gravitational*, do inglês “Magnético, Frequência Angular e Gravitacional”), um conjunto de três sensores – acelerômetro, giroscópio e magnetômetro – integrados em um único módulo, capaz de capturar as informações magnética e inerciais do dispositivo e do ambiente em que se encontra.

Para este trabalho, optou-se por utilizar o módulo MPU-9250 (Figura 20), fabricado pela *TDK InvenSense Inc.*, uma Unidade de Medição Inercial e Magnética (MIMU – *Magnetic and Inertial Measurement Unit*) de 9 eixos, a qual conta com um acelerômetro triaxial, um giroscópio triaxial, um magnetômetro triaxial e um processador digital de movimentos (DMP – *Digital Motion Processor*).

Figura 20 – MPU-9250, integrado no módulo de desenvolvimento GY-9250.



Fonte: Loja virtual.

O módulo apresenta conversores analógico-digitais de 16-bits para digitalizar cada saída dos sensores. Proporciona configuração da sensibilidade dos sensores e implementação de filtros digitais passa-baixas integrados, ambos recursos programáveis por operações em registradores endereçados.

As informações do acelerômetro, giroscópio e magnetômetro são fornecidas em unidade gravitacional terrestre (g , onde $1g = 9,80665 m/s^2$), graus por segundo ($^\circ/s$) e micro Tesla (μT), respectivamente, para os três eixos do espaço.

O microcontrolador ESP32 (Figura 21), da *Espressif Systems*, foi escolhido para controlar o sistema de aquisição e processamento dos dados, por se tratar de um microcontrolador com alto poder computacional, baixo consumo de energia e preço acessível, além de proporcionar os meios de comunicação Bluetooth e Wi-Fi para transmissão dos dados processados.

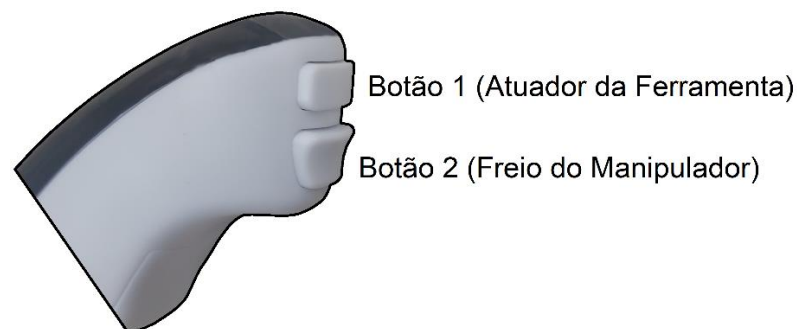
Figura 21 – Módulo Microcontrolador ESP32.



Fonte: Loja virtual.

O módulo MPU9250 é interfaceado pelo ESP32 através do protocolo de comunicação I2C para realizar a configuração, calibração dos sensores e coleta das medições. Além disso, o microcontrolador também é responsável pelo monitoramento das interações com os botões 1 e 2 presentes na parte frontal do controle, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Botões do controle e suas funções.



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

Como descrito na Figura 22, os botões 1 e 2 são utilizados, respectivamente, para abrir/fechar a garra, utilizada no projeto, e frear o manipulador.

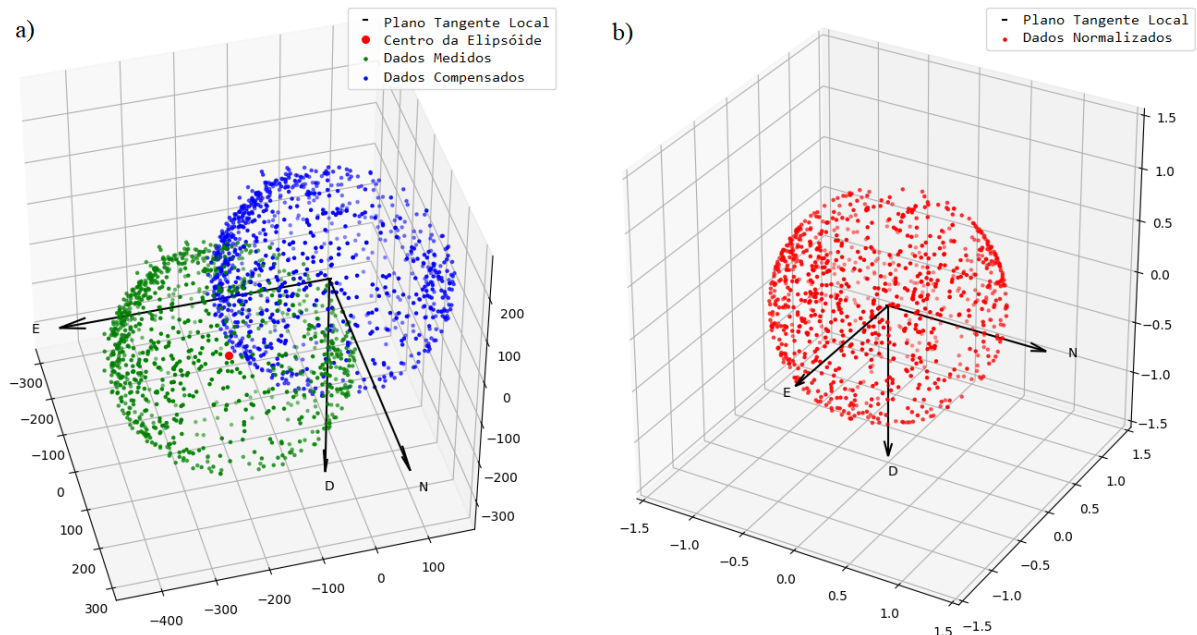
3.3.2. Método de Compensação para Distorções Magnéticas

De acordo com Bachmann *et al.* (2004), as medições do campo magnético da Terra são distorcidas por interferências do tipo *soft-iron*, que se caracteriza pela presença de elementos ferromagnéticos nas proximidades do magnetômetro, como por exemplo, fontes de energia elétrica, móveis e quaisquer estruturas metálicas que não compartilhem os mesmos eixos de rotação do sensor. Assim, quando o magnetômetro é rotacionado ou movido, estas fontes de interferência mudam de posição com relação ao sensor, alterando a direção do campo magnético medido.

Os componentes ferromagnéticos que compõem a estrutura que acompanha o sensor, são interferências do tipo *hard-iron*. Por rotacionarem junto com o sensor, estas distorções possuem intensidade fixa, deslocando a origem das medições do campo magnético.

Na Figura 23, são ilustrados os gráficos de pontos realizados com 1000 amostras de medidas realizadas pelo magnetômetro. Durante a amostragem, o dispositivo contendo o sensor foi manualmente submetido a movimentos circulares no espaço, tentando formar, com a maior número de pontos possíveis, uma esfera.

Figura 23 – Compensação da distorção magnética do tipo *hard-iron*.



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

Na Figura 23 (a), em verde, pode ser observado o conjunto de pontos medidos, deslocados da origem devido as distorções magnéticas do tipo *hard-iron*. Para compensar esse deslocamento, a simples média entre os pontos máximos e mínimos dos valores amostrados pelo magnetômetro nos eixos x , y e z fornece um ponto adequado para o centro da elipsoide – ponto vermelho, na Figura 24 (a). Subtraindo as coordenadas deste ponto, dos valores medidos, é obtido uma estimativa – não perfeita, mas aceitável para a aplicação – da elipsoide centrada na origem, como pode ser observado pelo conjunto de pontos em azul.

$$b = \left[\frac{m_{x,max} - m_{x,min}}{2} \quad \frac{m_{y,max} - m_{y,min}}{2} \quad \frac{m_{z,max} - m_{z,min}}{2} \right]$$

$$m_c = (m_k - b)$$

$$m_c = [m_x - b_x \quad m_y - b_y \quad m_z - b_z]$$

Normalizando os dados do magnetômetro compensados, m_c , encontra-se uma esfera com raio unitário e centrada na origem, ilustrada pela Figura 23 (b). Com estes dados compensados e normalizados, é possível calcular novamente a direção do campo magnético compensado, da Terra, medido pelo magnetômetro.

$$\hat{m}_t = \frac{m_c}{\|m_c\|}$$

Na subseção a seguir, será apresentado o filtro complementar, utilizado para realizar a fusão dos dados dos sensores magnético e inerciais, onde será descrito, em uma etapa da iteração, como o filtro corrige de maneira ativa essa distorção magnética do tipo *soft-iron*.

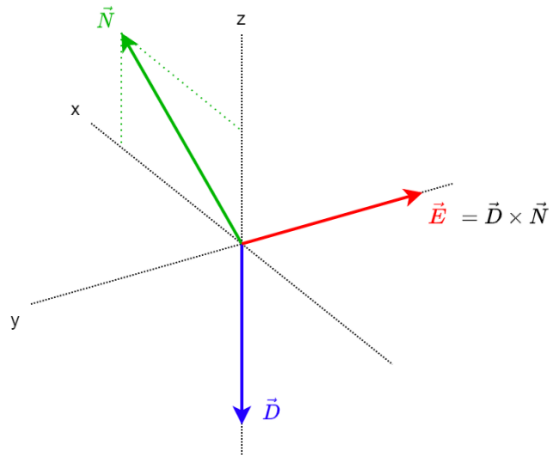
3.3.3. Fusão de Sensores

A fim de realizar a fusão dos dados dos sensores inerciais e magnético para computar a orientação do dispositivo, optou-se por implementar um filtro popularmente conhecido como “Filtro de Madgwick” (Figura 25), apresentado por Madgwick (2010) em seu trabalho.

O Filtro de Madgwick é um filtro complementar utilizado para estimar a orientação do dispositivo, tomando os vetores de aceleração da gravidade (para baixo), \vec{D} , e de direção do campo magnético (norte), \vec{N} , e realizando o produto vetorial destes vetores, para obter um terceiro vetor, perpendicular ao plano formado por

$\vec{D} \times \vec{N}$, apontando para o leste, \vec{E} . Estes três vetores formam o sistema de referência do dispositivo, como é ilustrado na Figura 24.

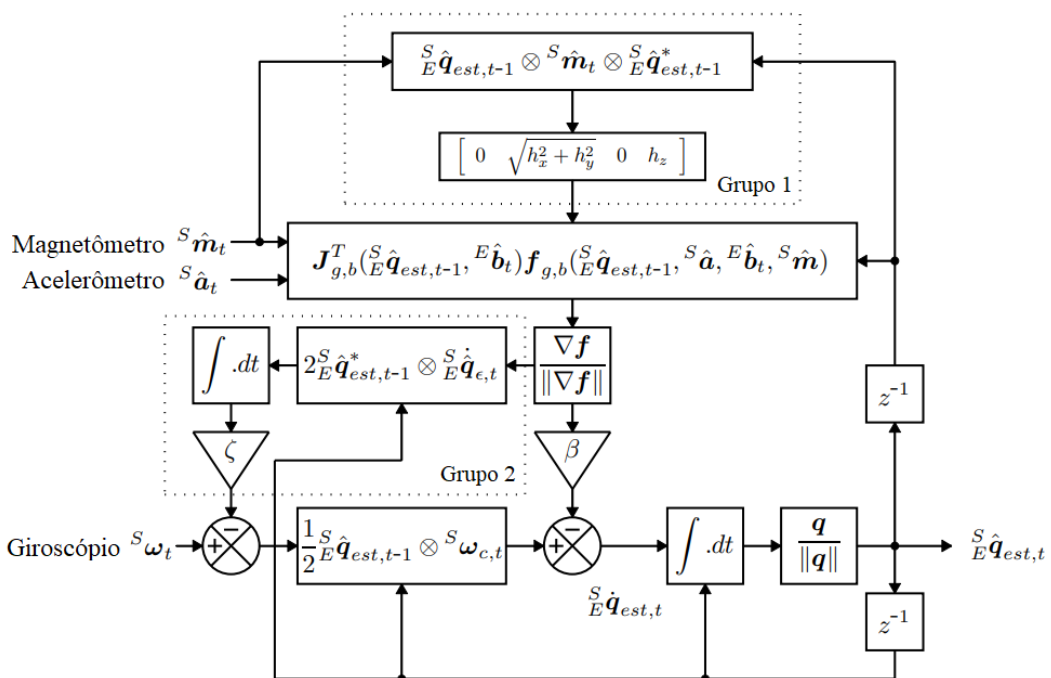
Figura 24 – Obtenção do sistema de referência do dispositivo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

Além disso, o filtro implementa a representação de orientação no espaço em forma de quaternions, aplicando as medições instantâneas do acelerômetro e do magnetômetro em um algoritmo de gradiente descendente, a fim de calcular a direção do erro de medição do giroscópio (observado no Grupo 2 da Figura 25).

Figura 25 – Representação em diagrama de blocos do filtro orientacional completo para a implementação de uma matriz de sensores MARG.



Adaptado de: MADGWICK (2010).

As medições realizadas pelo giroscópio são implementadas em um conjunto de equações diferenciais, conhecidas como equações cinemáticas de quaternions (QKE – *Quaternion Kinematical Equations*), transformando as frequências angulares axiais em sua derivada de quaternion equivalente.

O quaternion que representa a direção do erro na medição do giroscópio, é então subtraído do quaternion produzido pelo próprio giroscópio, e sua resultante é integrada em relação ao tempo, fornecendo o quaternion que representa a orientação estimada do sistema.

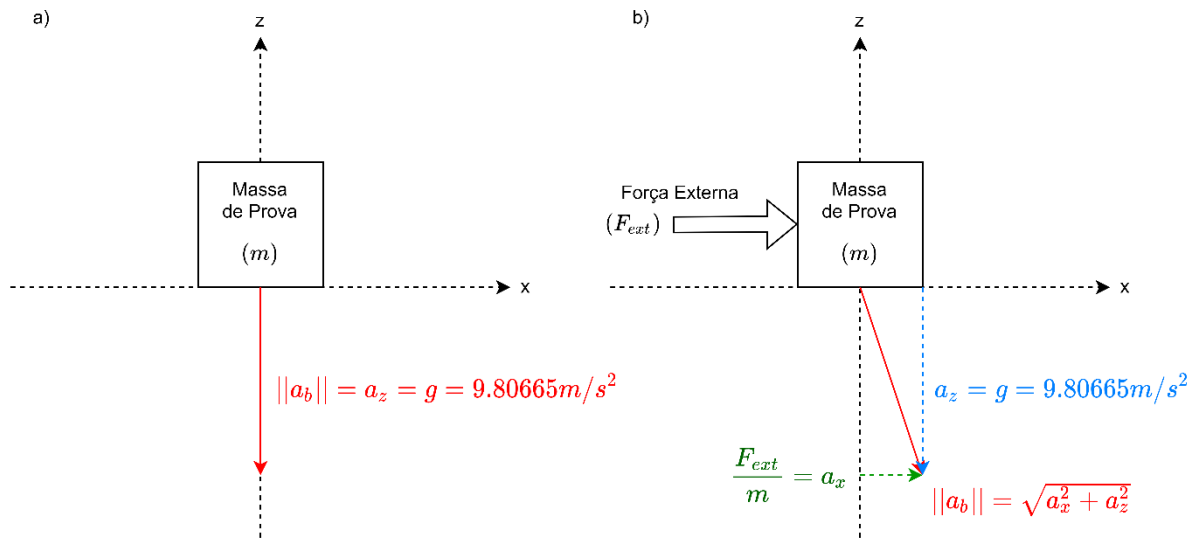
As distorções magnéticas detectadas pelo magnetômetro são classificadas como *hard-iron* e *soft-iron*, como descrito na subseção anterior (3.3.2) as distorções do tipo *hard-iron* são compensadas durante a etapa de amostragem e calibração do sensor. Já, para tratar das distorções do tipo *soft-iron*, o filtro proposto por Madgwick utiliza a própria rotação estimada na iteração anterior, $\hat{q}_{est,t-1}$, como realimentação do filtro para rotacionar o vetor da força do campo magnético normalizado, \hat{m}_t , medida pelo magnetômetro (já compensada pelo deslocamento da elipsoide).

Segundo Madgwick, o efeito de uma inclinação errônea na medição da direção do campo magnético pode ser facilmente corrigido se a direção de referência do campo magnético estimado pelo filtro possuírem a mesma inclinação. Para isso, a medição e estimativa devem ser calculadas e normalizadas de modo a possuírem componentes apenas nos eixos x e z (observado no Grupo 1 da Figura 25).

3.3.4. Método de Compensação da Aceleração da Gravidade

Uma das maiores dificuldades em lidar com o monitoramento de aceleração de dispositivos que se movam no espaço – como por exemplo, aeronaves ou drones – é a aceleração da gravidade. As medições de um acelerômetro são influenciadas por todas as acelerações que atuam em sua massa de prova interna, isso inclui a própria aceleração da gravidade do ambiente em que se encontra. Levando isso em conta, quando o acelerômetro é movido, independente da direção e sentido, a aceleração da gravidade é somada ao módulo de aceleração total da massa de prova, como ilustrado no sistema bidimensional da Figura 26.

Figura 26 – Influência da aceleração da gravidade na massa de prova (sistema bidimensional).

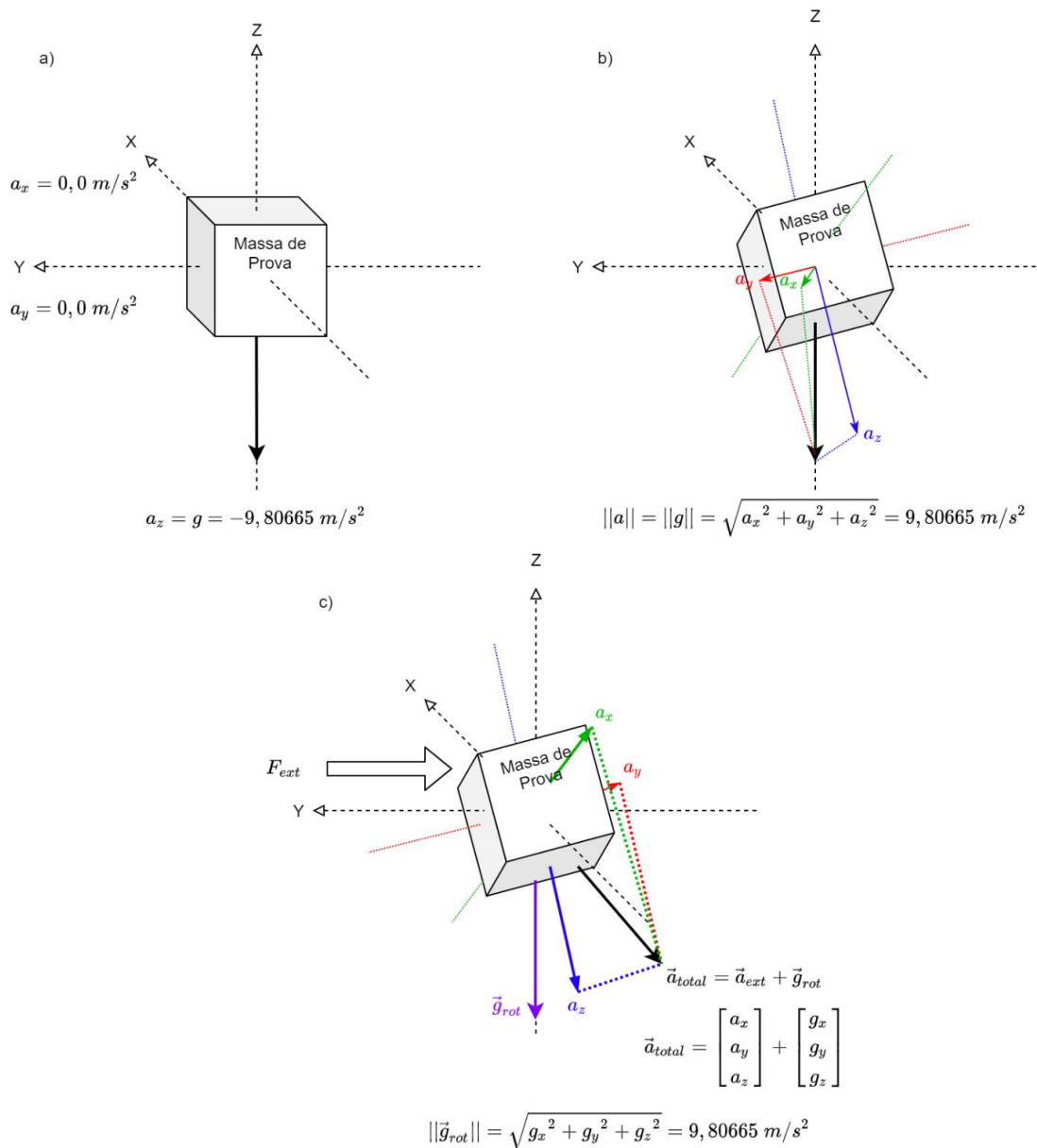


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

Na Figura 26 (a), é possível observar a influência da aceleração da gravidade mensurada sobre a massa de prova em repouso, idealmente contribuindo apenas na componente de aceleração no eixo z. Na Figura 26 (b), nota-se que, ao introduzir uma força externa na massa de prova, a aceleração medida será composta pela aceleração da gravidade, somada a aceleração resultante da força externa sobre a massa de prova.

Caso fosse necessário monitorar um dispositivo no plano XY – supondo que esse veículo não sofra nenhuma inclinação, e que o atrito da massa de prova com o ambiente seja próximo de, ou igual a, zero – simplesmente subtraindo a componente de aceleração da gravidade no eixo z, a_z , seria o suficiente para obter o resultado da aceleração no plano. No espaço, XYZ, este método de correção não funcionaria de maneira tão simples, pois qualquer mínima rotação do sensor muda a direção de seus eixos de referência, alterando a direção do eixo da gravidade em relação ao sensor, e tornando o cálculo de aceleração real impossível para qualquer força externa aplicada sobre a massa de prova, como é ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Influência da aceleração da gravidade na massa de prova (sistema tridimensional).



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

Na Figura 27 (a), é ilustrado um sistema ideal, onde a aceleração da gravidade possui componente apenas no eixo z, do sistema de referência, sobre a massa de prova. Na Figura 27 (b), a massa de prova do sensor é rotacionada no espaço, mas nenhuma força externa é aplicada sobre ela, portanto as medições de aceleração nas componentes a_x , a_y e a_z serão distribuídas de maneira a produzir um módulo igual ao módulo da gravidade. E na Figura 27 (c), é representada a aplicação de uma força externa sobre a massa de prova, e a influência dessa força nas componentes de aceleração, já influenciadas pela aceleração da gravidade.

Para lidar com este problema é possível aplicar a mesma rotação do dispositivo, detectada pela fusão de sensores, sobre o vetor de gravidade ideal do ambiente, $g = [0 \ 0 \ g_z]$, onde g_z é a média do módulo de aceleração da gravidade previamente amostrado. A partir do quaternion estimado pelo Filtro de Madgwick é possível desenvolver a matriz de rotação, $C_{b/v}$, ou matriz de direção dos cossenos (DCM – *Direction Cosine Matrix*), a qual também é utilizada para representação de orientação, ou rotação, no espaço.

$$C_{b/v} = \begin{bmatrix} q_s^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 & 2 \cdot (q_x \cdot q_y + q_z \cdot q_s) & 2 \cdot (q_x \cdot q_z - q_y \cdot q_s) \\ 2 \cdot (q_x \cdot q_y - q_z \cdot q_s) & q_s^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2 & 2 \cdot (q_y \cdot q_z + q_x \cdot q_s) \\ 2 \cdot (q_x \cdot q_z + q_y \cdot q_s) & 2 \cdot (q_y \cdot q_z - q_x \cdot q_s) & q_s^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2 \end{bmatrix}$$

A matriz descreve como um veículo, v , está orientado em relação a uma base de referência, b , onde q_s , q_x , q_y e q_z são as componentes do quaternion obtido pelo Filtro de Madgwick. Aplicando essa matriz de rotação sobre o vetor da gravidade, g , é obtido o vetor da gravidade rotacionado, g_{rot} , na mesma orientação do dispositivo.

$$g_{rot} = C_{b/v} \cdot g$$

Logo, a aceleração pura, ou real, estimada do dispositivo, a_r , pode ser calculada pela subtração do vetor de aceleração medido, a_{total} , pelo vetor da gravidade rotacionado pela orientação do sensor, g_{rot} .

$$a_r = a_{total} - g_{rot}$$

3.3.5. Estimação da Velocidade do Movimento e Atenuação de Ruído

De acordo com as equações de cinemática, da Física clássica, calcula-se a velocidade instantânea, $v(t)$, de um objeto a partir da integração de sua aceleração instantânea, $a(t)$, em relação ao tempo de deslocamento, dt . Porém, isto somente é valido para casos em que os valores de aceleração e intervalo de tempo são bem definidos, sem ruídos e incertezas.

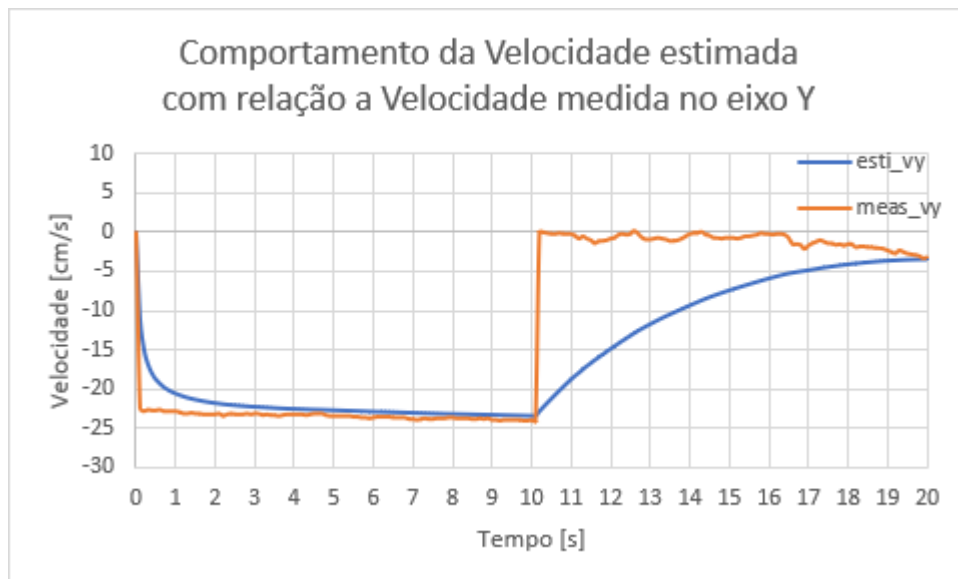
Neste trabalho, para obter os valores de velocidades nos três eixos do espaço, é implementado o Filtro de Kalman, tomando como modelo dinâmico do sistema as equações de movimento uniformemente variado de cada eixo.

$$X_{k_p} = A \cdot X_{k-1} + B \cdot u_k + \omega_k$$

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_{x0} + a_x \cdot dt \\ v_y &= v_{y0} + a_y \cdot dt \\ v_z &= v_{z0} + a_z \cdot dt \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt & 0 & 0 \\ 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & dt \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + 0$$

O Filtro de Kalman é uma ferramenta matemática utilizada para estimar valores de um sistema onde é conhecido o modelo dinâmico, mas as medições deste sistema possuem erros, incertezas ou variações aleatórias. O que torna o Filtro de Kalman adequado para o presente trabalho é sua capacidade de “aprender” sobre o sistema através do cálculo do estado predito, covariância no processo de predição e do Ganho de Kalman, o qual determina o peso dos valores medidos com relação aos valores preditos, assim conseguindo rapidamente convergir para o valor real, como pode ser observado no exemplo da Figura 28.

Figura 28 – Gráfico de comparação dos valores de velocidade predita pela equação de movimento uniformemente variado e velocidade estimada pelo Filtro de Kalman.



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

Na Figura 28, é apresentado um exemplo de aplicação do filtro nas medições de aceleração coletadas. A curva laranja (meas_vy) é composta pelo cálculo de integração da aceleração no eixo y, para obter a velocidade no mesmo eixo. A curva azul (esti_vy) é composta pela estimativa da velocidade no eixo y, realizada pelo Filtro de Kalman utilizando a aceleração no mesmo eixo.

3.3.6. Interface com o Manipulador Robótico

Os sistemas do controle e do manipulador são intermediados por uma unidade de processamento central (CPU) com sistema operacional Windows. As medições de aceleração e orientação são coletadas e enviadas, via Bluetooth, para a CPU como uma mensagem Serial forma de dicionário. Utilizando a linguagem de programação Python 3.10, o sistema conecta-se ao dispositivo Bluetooth, faz a leitura e organização das variáveis recebidas.

Por se tratar de um controle do manipulador robótico em tempo real, o método de movimentação escolhido foi o jogging (JOG), muito utilizado para treinar manipuladores antes de executar tarefas automáticas, onde o operador faz o uso de incremento, ou decremento, de velocidade e aceleração de cada eixo, ou junta, individualmente, o que foi a principal razão pela escolha do método para o presente trabalho.

Durante a inicialização do script, a CPU faz o pareamento com o dispositivo Bluetooth e então, conecta-se ao manipulador robótico através de uma porta de comunicação serial. Em seguida, o programa entra em um laço infinito onde, a cada iteração, é feita a leitura dos dados enviados pelo dispositivo Bluetooth e os implementa no Filtro de Kalman, atualizando a velocidade estimada do dispositivo. Com as medições de aceleração e as velocidades estimadas (dados de controle), a CPU entra em um laço condicional, verificando o estado do manipulador, a direção em que ele está se movendo, as posições da ferramenta e das juntas, o estado da ferramenta e verifica se o freio foi acionado.

Se os dados de controle indicam que o manipulador não mudou a direção e sentido do seu movimento, comparado a iteração anterior, apenas serão atualizados os parâmetros de aceleração e velocidade de movimento nos eixos x, y e z, relativos ao sistema de coordenadas do próprio manipulador.

No caso de os dados de controle indicarem que houve uma mudança de direção ou sentido no movimento da ferramenta, é executado um comando para parar o movimento do manipulador, os parâmetros de aceleração e velocidade de movimento nos eixos x, y e z são atualizados, é executado um comando para iniciar o movimento do manipulador, especificando a direção e sentido do movimento. Na seção a seguir, são apresentados os experimentos realizados e a análise dos resultados obtidos.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante a etapa de desenvolvimento do projeto, a arquitetura do sistema foi gradualmente sendo alterada para obter melhor desempenho na tentativa de contornar as diversas dificuldades que foram encontradas. Neste capítulo são apresentadas estas dificuldades, como foram contornadas e os resultados obtidos em cada etapa do projeto.

4.1 Compensação da Aceleração da Gravidade

Como mencionado na seção 3.3.4, as medições do acelerômetro se movendo no espaço são comprometidas pela ação da gravidade. Aplicando o método de correção proposto, utilizando a matriz de rotação gerada pelo *quaternion* resultante do Filtro de Madgwick, é realizada a rotação no vetor da gravidade ideal, $g = [0 \ 0 \ -1]^T$, obtendo um novo vetor de gravidade rotacionado, g_{rot} , para a mesma orientação do dispositivo sensor. Subtraindo o vetor g_{rot} pelo vetor de aceleração medida, a_{total} , é possível obter a aceleração real do dispositivo, alguns exemplos de medições podem ser observados na Quadro 3.

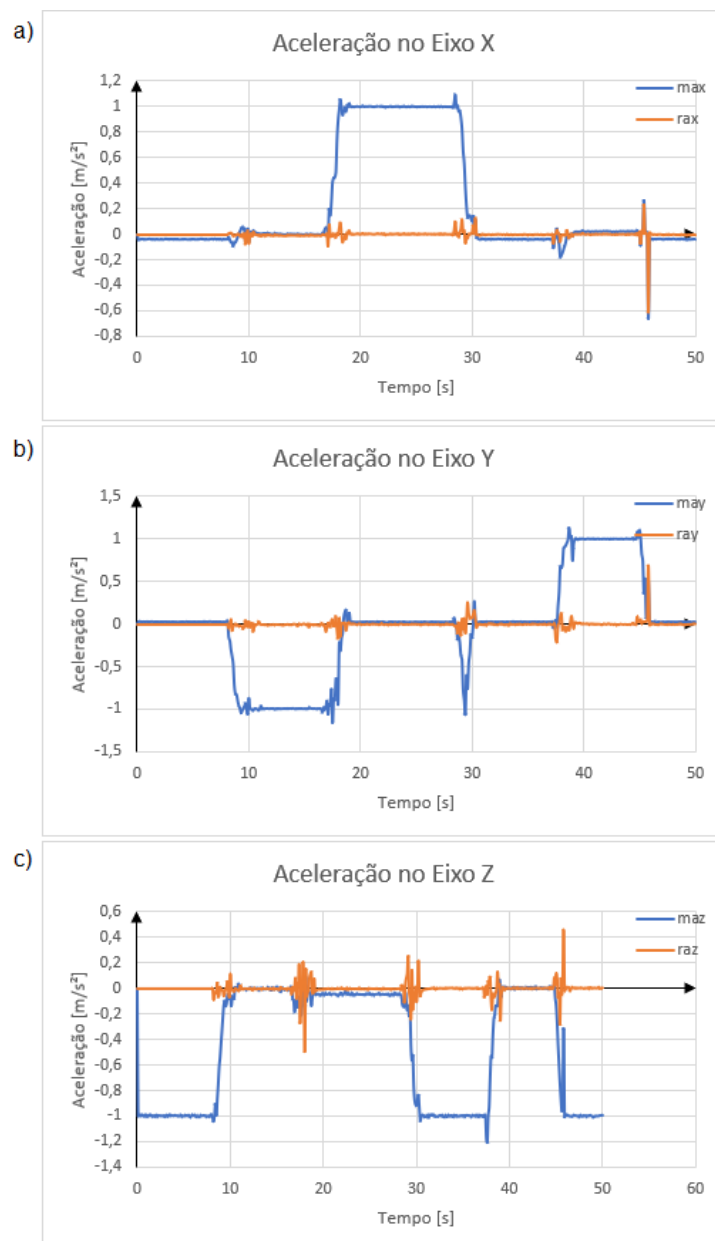
Quadro 3 - Resultados do método de compensação da aceleração da gravidade.

	Orientação Estimada (°)			Aceleração Medida (g)			Aceleração Real (g)		
	ψ	θ	φ	a_x	a_y	a_z	a_x	a_y	a_z
Posição 1	51,8°	1,8°	-89,0°	-0,030	-0,983	0,022	0,001	0,003	0,013
	51,6°	1,7°	-88,9°	-0,029	-0,989	0,019	0,001	-0,001	0,007
	51,4°	1,6°	-88,9°	-0,027	-0,982	0,019	0,000	-0,001	0,001
Posição 2	170,1°	-0,3°	178,0°	0,004	0,035	-0,990	-0,002	0,003	0,001
	170,1°	-0,3°	178,0°	-0,000	0,036	-0,992	-0,006	0,002	0,000
	170,1°	-0,3°	177,9°	-0,000	0,038	-0,991	-0,006	0,003	0,002
Posição 3	103,4°	84,3°	-82,1°	-1,010	-0,068	0,015	-0,015	0,003	-0,004
	103,8°	84,3°	-81,7°	-1,003	-0,068	0,018	-0,008	0,006	-0,004
	103,3°	84,3°	-82,2°	-1,005	-0,065	0,017	-0,009	0,006	-0,001

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

No Quadro 3, o dispositivo foi posicionado, sem movimento, em três orientações diferentes. Na posição 1, o módulo sensor está posicionado de lado, com o módulo sensor perpendicular ao plano da mesa onde se encontra, na posição 2, o módulo sensor está posicionado paralelo ao plano da mesa e na posição 3, o módulo sensor também está perpendicular ao plano da mesa, mas inclinado para baixo, ao invés de deitado. É possível observar melhor a subtração do vetor da gravidade através da representação gráfica da aceleração ao longo do tempo, como é ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Comparações de aceleração medida e aceleração real (a) no eixo x, (b) no eixo y e (c) no eixo z.



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

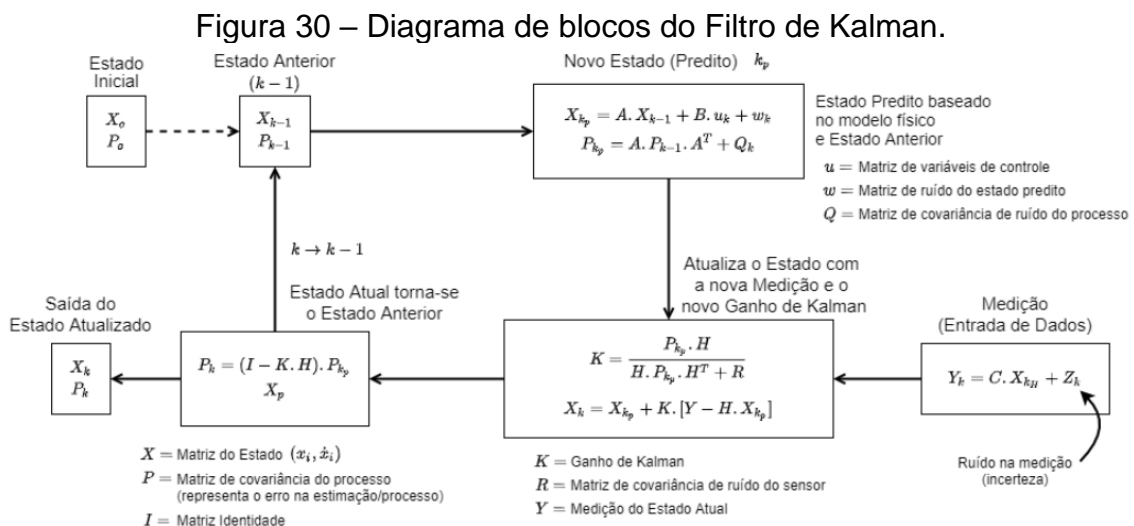
Observa-se na Figura 29 que o dispositivo muda sua orientação ao longo do tempo. Inicialmente, o dispositivo permanece paralelo ao plano da mesa, apresentando apenas componente significativa no eixo z, em seguida, no intervalo de tempo entre 8s e 10s, o dispositivo é orientado perpendicularmente ao plano da mesa, proporcionando componente significativa no eixo x, e assim por diante.

Também é possível observar que, nos instantes de tempo em que ocorre uma mudança de orientação, os traçados na cor laranja (Figura 29) apresentam pequenos ruídos, o que descreve a aplicação de acelerações externas sobre o sensor. Neste caso, o fator externo é a mão do autor rotacionando o dispositivo, demonstrando que o método de compensação garante o valor de aceleração real do dispositivo.

4.2 Estimação de Velocidade e Erro de Integração

Para controlar o manipulador robótico em tempo real, utiliza-se o método de movimentação jogging, o qual faz o cálculo de movimentação das juntas do manipulador de acordo com a velocidade e aceleração de cada eixo do seu sistema de referências. No entanto, as medições de aceleração são extremamente ruidosas. Integrando estas medições ruidosas, também resultaria em valores com alto ruído, gerando um erro exponencial ao longo do tempo.

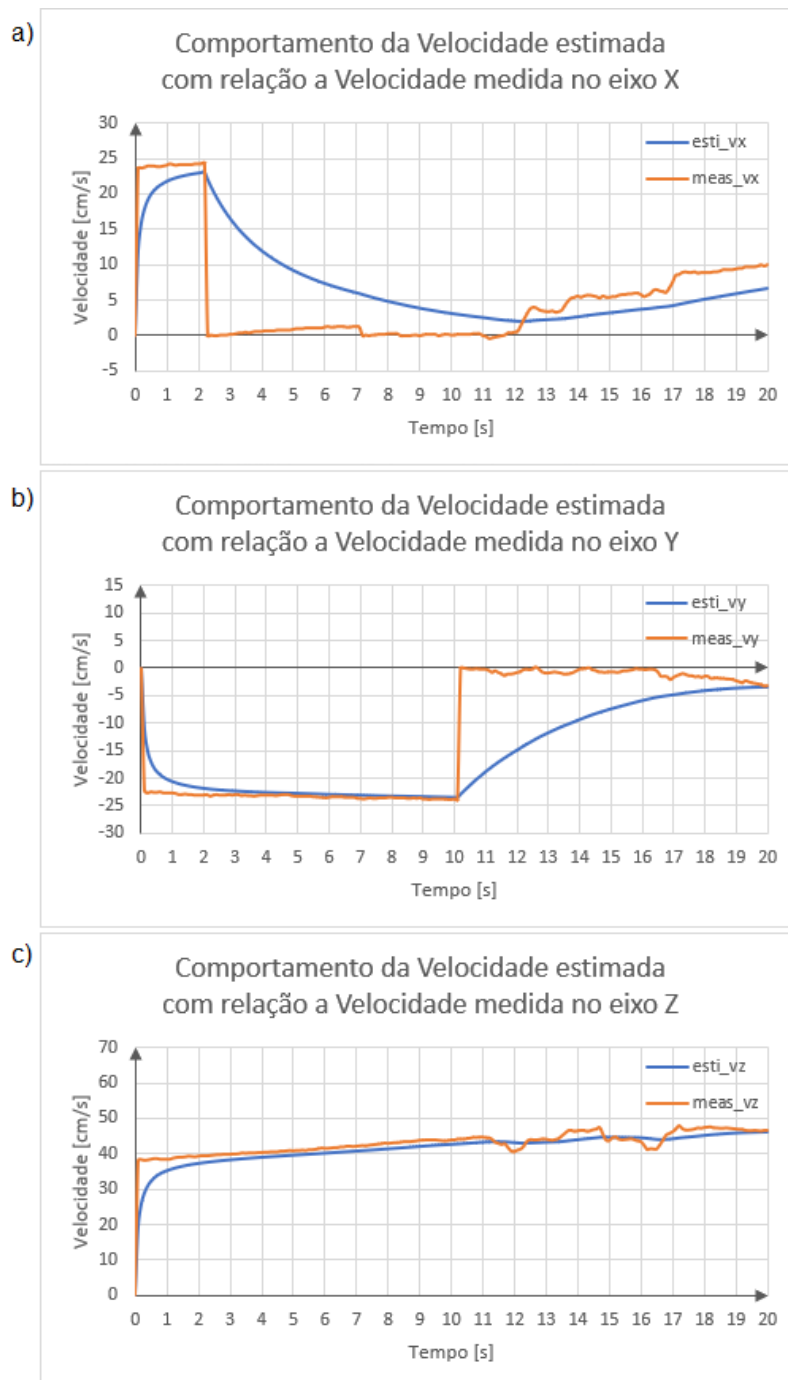
A fim de estimar a velocidade do controle e atenuar o ruído associado a integração, é implementado um modelo de Filtro de Kalman, ilustrado pelo diagrama da Figura 30.



Adaptado de: Michael Van Biezen (2015).

Como é ilustrado nos gráficos da Figura 31, o filtro faz um excelente trabalho em atenuar os ruídos ao longo do processo de estimação das velocidades em cada eixo. No entanto, ainda é possível observar que o erro associado a integração tende a influenciar o processo de estimação do filtro.

Figura 31 – Relação das velocidades estimadas pelo Filtro de Kalman com as velocidades preditas pelo método de integração comum realizadas (a) no eixo x, (b) no eixo y e (c) no eixo z.



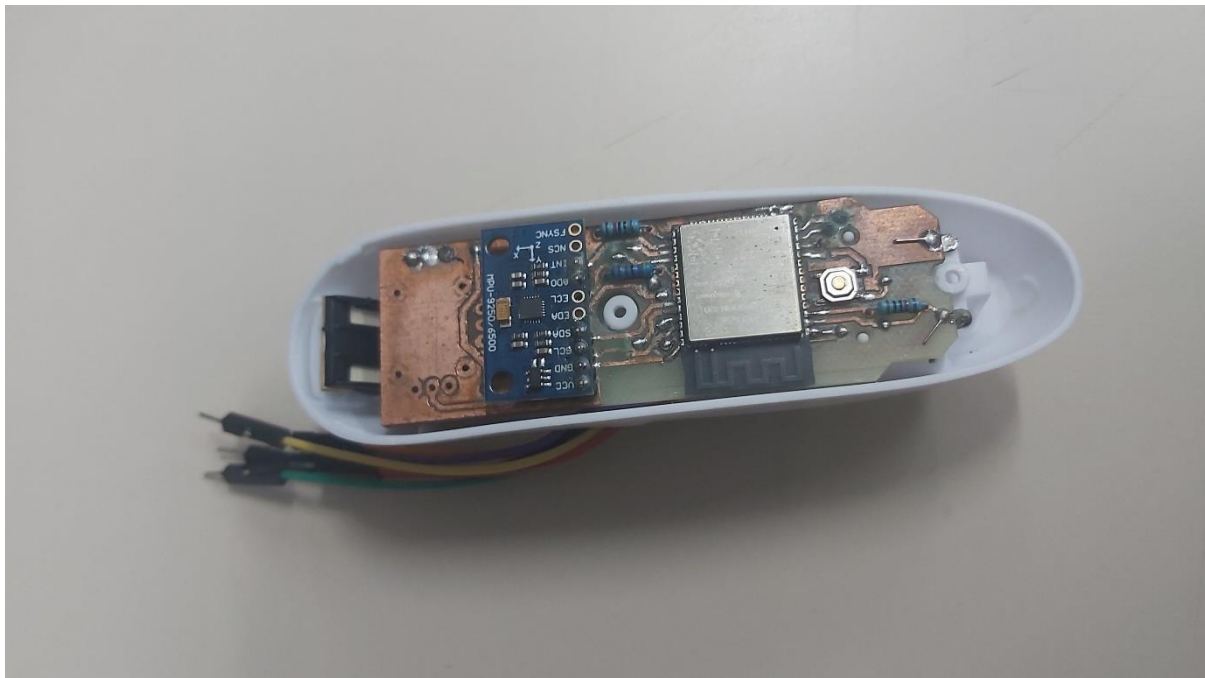
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

A fim de impedir que o erro associado à integração seja propagado ao longo do tempo, foi implementado em *software* um sistema de contagem que, ao atingir 10 medições com valores de aceleração abaixo de um limite, configurável, pré-estabelecido, a velocidade na saída do Filtro de Kalman será zerada. Deste modo, o erro de integração continua existindo, mas não tem tempo suficiente para que ocorra o crescimento exponencial e, conseqüentemente, reduzindo a possibilidade de que o manipulador perca a sincronia do movimento com o operador.

4.3 Integração do Sistema Proposto com o Manipulador Robótico

O sistema embarcado desenvolvido, para realizar as medições de aceleração da mão do operador, foi prototipado em uma placa de fenolite cobreada, ilustrada na Figura 32, nas dimensões adequadas para caberem em um controle de óculos de realidade virtual, escolhido por sua ergonomia.

Figura 32 – PCI do sistema prototipada e posicionada dentro do controle.



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2022).

O interfaceamento do manipulador robótico com a CPU é realizado através de uma porta de comunicação Serial USB, e apresentou um atraso, entre o envio e resposta do comando, de aproximadamente 10 ms , utilizando as bibliotecas de interfaceamento fornecidas pelo próprio fabricante do manipulador. Além disso, cada iteração de estimação de orientação realizada no *firmware*, apresentou um atraso de aproximadamente 100 ms .

Aproximadamente o mesmo atraso (entre 70 ms e 140 ms) foi identificado no processo da CPU de receber a mensagem via Bluetooth e implementar as medidas no Filtro de Kalman para estimar a velocidade. Porém, como os processos são paralelos, entre o *firmware* e o software, o atraso de resposta desde a movimentação do controle na mão do operador até a resposta de movimento no manipulador, não ultrapassa 150 ms .

O processo de atenuação realizado pelo Filtro de Kalman, proporciona ao manipulador uma movimentação mais fluída, comparada a implementação dos valores não filtrados. No entanto, justamente por essa característica de atenuação, a frenagem do manipulador ocorre de maneira muito devagar, dando continuidade ao movimento mesmo quando o operador tenha colocado o controle em repouso. A tentativa de ajuste de parâmetros do filtro não agregou muito para a solução do problema, portanto, foi optado pela implementação de frenagem através do hardware. Assim, quando o operador parar o movimento e pressiona o botão de freio, o manipulador interrompe o processo de estimação de velocidade, zera todos os parâmetros de movimentação e executa o comando de parar.

O processo de filtragem e estimação só retoma no instante em que o botão for liberado e, como os parâmetros foram zerados, a frenagem também contribui para o impedimento de propagação do erro associado a integração.

5 CONCLUSÃO

O trabalho propõe o uso de sensores magnético e inerciais para monitorar os movimentos da mão de um operador humano, pré-processar as informações de coletadas em uma unidade de processamento embarcada, transmitir essas informações para uma unidade de processamento intermediária, onde é feito um tratamento dos dados para estimar os parâmetros de movimentação de um manipulador robótico.

Por estar implementando apenas um módulo sensorial, o sistema fica limitado a poucos métodos de controle para garantir sua precisão e compensação de erros. Além disso, o acelerômetro possui uma sensibilidade muito grande, contribuindo para a geração de ruídos. Durante o desenvolvimento notou-se que, quando ambos manipulador e controle estavam em repouso sobre a bancada de trabalho, até mesmo a vibração dos servomotores do manipulador influenciava no acelerômetro e, conseqüentemente, induzindo movimento ruidoso no manipulador.

Inicialmente, por ser um sistema que opera em tempo real, uma das maiores preocupações seria o atraso entre a movimentação do controle pelo operador e a réplica de movimentação do manipulador, no entanto, com a arquitetura proposta, de pré-processamento em *firmware* e tratamento dos dados em software, o resultado de 150 *ms* de atraso foi surpreendente considerando o contexto de aplicação do trabalho, que se trata de operações cautelosas com movimentos suaves.

Embora os resultados finais do presente trabalho tenham atingido o objetivo inicial, de garantir um método de operação de manipuladores robóticos simples e intuitivo, o estudo mostrou que ainda há muitas possibilidades de melhoria no sistema proposto, especialmente com relação à análise e tratamento de dados coletados pelo acelerômetro e manipulação dos parâmetros dos filtros implementados.

6 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, é sugerido estudar a implementação do filtro de Kalman estendido para estimar a orientação, posição, velocidade e erros associados ao processo de medição e estimação. Também é recomendada a realização de análise dos dados dos sensores para desenvolvimento de melhores ferramentas de pré-processamento dos sinais coletados.

A implementação da fusão de dados de sensores é um campo a ser estudado, tentando implementar outros sensores como GPS, encoders, outras MIMUs para compensação, ou comparação, de orientação.

O sistema proposto, teoricamente, deve ser modular, sendo possível implementar em diferentes manipuladores. É recomendado a realização da integração – ou, possivelmente, adaptação – do sistema para o controle de manipuladores robóticos antropomórficos.

REFERÊNCIAS

- TREVELYAN, J. P.; Kang, S-C.; Hamel, W. R. "**Robotics in Hazardous Applications**," Springer Handbook of Robotics, 2nd ed., 2008, pp. 1101–1126. doi: 10.1007/978-3-540-30301-5_49.
- LÖSCH, R.; Grehl, S.; Donner, M.; Buhl, C.; Jung, B. "**Design of an Autonomous Robot for Mapping, Navigation, and Manipulation in Underground Mines**," *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, pp. 1407-1412. doi: 10.1109/IROS.2018.8594190.
- BAUDOIN, Y. & Habib, M. K. **Using Robots in Hazardous Environments: Landmine Detection, De-mining and Other Applications**. 1st ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2011. ISBN 9781845697860.
- MARTURI, N.; Rastegarpanah, A.; Rajasekaran, V.; Ortenzi, V.; Bekiroglu, Y.; Kuo, J.; Stolkin, R. **Towards Advanced Robotic Manipulations for Nuclear Decommissioning**, Robots Operating in Hazardous Environments, Hüseyin Canbolat, IntechOpen, 2017. doi: 10.5772/intechopen.69739.
- LEE, J. K.; Kim, K.; Park, B. S.; Yoon, J. S. "**Force-reflecting servo-manipulators for remote handling task in a radioactive environment**," 2007 International Conference on Control, Automation and Systems, 2007, pp. 1025-1028, doi: 10.1109/ICCAS.2007.4407048.
- SICILIANO, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G. **Robotics: Modelling, Planning and Control**. 1st ed. London: Springer, 2009. ISBN 9781846286414.
- LOPES, A. M. **Modelação Cinemática e Dinâmica de Manipuladores de Estrutura em Série**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Automação, Instrumentação e Controle, Universidade do Porto, 2002.
- Shenzhen Yuejiang Technology Co., Ltd. **Dobot Magician User Guide V1.7.0**. Disponível em: https://www.dobot.cc/downloadcenter/dobot-magician.html?sub_cat=73#sub-download. Acesso em: 16 jun. 2021.
- KIM, H.; Miller, L. M.; Al-Refai, A.; Brand, M.; Rosen, J. "**Redundancy resolution of a human arm for controlling a seven DOF wearable robotic system**," 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2011, pp. 3471-3474. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6090938.
- MORENO, R. J. "**Tracking of human operator arms oriented to the control of two robotic arms**," 2014 XIX Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision, 2014, pp. 1-4. doi: 10.1109/STSIVA.2014.7010125.
- PERRY, J. C.; Rosen, J.; Burns, S. "**Upper-Limb Powered Exoskeleton Design**," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 12, no. 4, pp. 408-417, Aug. 2007. doi: 10.1109/TMECH.2007.901934.

- LI, I.; Liu, Y.; Zang, X. "**Human-Machine Interaction Control System of a Remote Maintenance Manipulator for Tokamak***," 2018 Chinese Automation Congress (CAC), 2018, pp. 336-340. doi: 10.1109/CAC.2018.8623475.
- JIN, S.; Choi, J.; Lee, D.; Yang, S. "**Development of Remote Control System for Field Robot**," 2008 International Conference on Smart Manufacturing Application, 2008, pp. 428-432. doi: 10.1109/ICSMA.2008.4505587.
- GLONEK, G. & Wojciechowski, A. "**Hybrid Orientation Based Human Limbs Motion Tracking Method**," Sensors 2017, 17, 2857. <https://doi.org/10.3390/s17122857>.
- KEMPE, V. **Inertial MEMS: Principles and Practice**. 1st ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2011. ISBN 9780521766586.
- WALDNER, J-B. **Nanocomputers and Swarm Intelligence**. 1st ed. London, England and Hoboken, NJ, USA: ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., 2008. ISBN 9781848210097.
- GAD-EL-HAK, M. **The MEMS Handbook Introduction & Fundamentals**. 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2005. ISBN 9781420036572.
- HRISKO, J. "**Gyroscope and Accelerometer Calibration with Raspberry Pi - Part II**". Maker Portal, 2021. Disponível em: <https://makersportal.com/blog/calibration-of-an-inertial-measurement-unit-imu-with-raspberry-pi-part-ii>. Acesso em: 21 Jun. 2021.
- PATEL, U. N. & Faruque, I. A. "**Sensor Fusion To Improve State Estimate Accuracy Using Multiple Inertial Measurement Units**," 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021, pp. 1-4. doi: 10.1109/INERTIAL51137.2021.9430484.
- LI, B.; Zhang, C.; Ye, C.; Lin, W.; Yu, X.; Meng, L. "**A Robust Odometry Algorithm for Intelligent Railway Vehicles Based on Data Fusion of Encoder and IMU**," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2020, pp. 2749-2753. doi: 10.1109/IECON43393.2020.9255068.
- LUNGHI, G.; Marin, R.; Di Castro, M.; Masi, A.; Sanz, P. J. "**Multimodal Human-Robot Interface for Accessible Remote Robotic Interventions in Hazardous Environments**," in IEEE Access, vol. 7, pp. 127290-127319, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939493.
- FRENCH, R.; Marin-Reyes, H.; Kourlitis, E. "**Usability study to qualify a dexterous robotic manipulator for high radiation environments**," 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ETFA.2016.7733521.
- CHEN, W.; Zhao, Y.; Liu, C.; Jiang, M.; Sun, J. "**Design and implementation of control system for nuclear pollution disposal robot based on wireless communication**," 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2017, pp. 2475-2478. doi: 10.1109/IAEAC.2017.8054468.

- PETEREIT, J.; Beyerer, J.; Asfour, T.; Gentes, S.; Hein, B.; Hanebeck, U. D.; Kirchner, F.; Dillmann, R.; Götting, H. H.; Weiser, M.; Gustmann, M.; Egloffstein, T. "**ROBDEKON: Robotic Systems for Decontamination in Hazardous Environments**," 2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2019, pp. 249-255. doi: 10.1109/SSRR.2019.8848969.
- PATIC, P. C.; Mainea, M.; Pascale, L.; Mantescu, G. "**Designing a Mobile Robot used for Access to Dangerous Areas**," 2017 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO), 2017, pp. 60-65. doi: 10.1109/ICCAIRO.2017.21.
- DI CASTRO, M.; Ferre, M.; Masi, A. "**CERNTAURO: A Modular Architecture for Robotic Inspection and Telemanipulation in Harsh and Semi-Structured Environments**," in IEEE Access, vol. 6, pp. 37506-37522, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2849572.
- DI CASTRO, M.; Tambutti, M. L. B.; Ferre, M.; Losito, R.; Lunghi, G.; Masi, A. "**i-TIM: A Robotic System for Safety, Measurements, Inspection and Maintenance in Harsh Environments**," 2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/SSRR.2018.8468661.
- ZHONG, Y.; Fu, Z.; Su, M.; Guan, Y.; Zhu, H.; Zhong, L. "**Development of A Robot System Performing Maintenance Tasks on High-Voltage Power Transmission Lines**," 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2019, pp. 1344-1349. doi: 10.1109/ROBIO49542.2019.8961863.
- CHOWDHURY, A. A.; Hamid, M. A.; Ivan, M. N. A. S. "**Implementation of Cost Effective Bomb Defusing Robot with Live Streaming Dual Camera Interface**," 2021 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), 2021, pp. 439-444, doi: 10.1109/ICREST51555.2021.9331203.
- BALDI, T. L.; Scheggi, S.; Meli, L.; Mohammadi, M.; Prattichizzo, D. "**GESTO: A Glove for Enhanced Sensing and Touching Based on Inertial and Magnetic Sensors for Hand Tracking and Cutaneous Feedback**," in IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 47, no. 6, pp. 1066-1076, Dec. 2017. doi: 10.1109/THMS.2017.2720667.
- MARUYAMA, T.; Tada, M.; Sawatome, A.; Endo, Y. "**Constraint-Based Real-Time Full-Body Motion-Capture Using Inertial Measurement Units**," 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2018, pp. 4298-4303. doi: 10.1109/SMC.2018.00727.
- LIU, R.; Peng, L.; Tong, L.; Yang, K.; Liu, B. "**The Design of Wearable Wireless Inertial Measurement Unit for Body motion Capture System**," 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR), 2018, pp. 557-562. doi: 10.1109/IISR.2018.8535742.
- LI, X.; Zhou, L.; Li, Y. "**A Multi-model Human Motion Tracking Approach with Wearable IMU Sensors**," 2020 IEEE International Conference on Mechatronics

- and Automation (ICMA), 2020, pp. 1871-1876. doi: 10.1109/ICMA49215.2020.9233600.
- NAKAMURA, Y. & Hase, T. "**Measuring Arm Motions Using the Inertial Measurement Unit**," 2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), 2020, pp. 196-198. doi: 10.1109/LifeTech48969.2020.1570620424.
- LIU, G.; Shi, L.; Li, G.; Cheng, L. "**Tri-Adaptive Method for Improving the Resolution of MEMS Digital Sensors**," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 10, pp. 8189-8196, Oct. 2019. doi: 10.1109/TIE.2018.2883259.
- LIANG, Q.; Litvinenko, Y. A.; Stepanov, O. A. "**A Solution to the Attitude Problem Using Two Rotation Units of Micromechanical Gyroscopes**," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 2, pp. 1357-1365, Feb. 2020. doi: 10.1109/TIE.2019.2898608.
- PARK, S.; Jung, Y.; Bae, J. "**A tele-operation interface with a motion capture system and a haptic glove**," 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2016, pp. 544-549. doi: 10.1109/URAI.2016.7625774.
- GU, G.; Xu, P.; Shen, X.; Wang, Y.; An, L.; Shen, X. "**Intelligent Manipulator Based on Head Posture Detection**," 2018 2nd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS), 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICRAS.2018.8443183.
- NARAYAN, J.; Kalani, A.; Dwivedy, S. K. "**Reference Trajectory based Jacobian Transpose Control of a Novel Lower Limb Exoskeleton System for Children**," 2019 5th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC), 2019, pp. 102-107. doi: 10.1109/ISPCC48220.2019.8988474.
- LI, H.; Liu, J.; Sun, Y. "**Bionic robot based on Internet of Things**," 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA), 2020, pp. 404-406. doi: 10.1109/ICIBA50161.2020.9277181.
- ZHANG, J.; Li, P.; Zhu, T.; Zhang, W.-A.; Liu, S. "**Human Motion Capture Based on Kinect and IMUs and Its Application to Human-Robot Collaboration**," 2020 5th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), 2020, pp. 392-397. doi: 10.1109/ICARM49381.2020.9195342.
- ZIMMERMANN, Y.; Küçüktabak, E. B.; Farshidian, F.; Riener, R.; Hutter, M. "**Towards Dynamic Transparency: Robust Interaction Force Tracking Using Multi-Sensory Control on an Arm Exoskeleton**," 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020, pp. 7417-7424. doi: 10.1109/IROS45743.2020.9341054.
- LI, H.; Liu, J.; Sun, Y. "**Bionic robot based on Internet of Things**," 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial I
- BIEZEN, Michael Van. "**Special Topics - The Kalman Filter (7 of 55) The Multi-Dimension Model 1**". (25 de Outubro, 2015). Acessado em: 29 de Julho, 2021. [Online Video]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=SIQJaQYVtuE>.

MADGWICK, Sebastian O.H. **“An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays,”** 2010 Report x-io and University of Bristol (UK), v. 25, p.113-118.