



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

VITOR DOMINGUES MARQUES RIBEIRO

**MODELAGEM DINÂMICA DE PLATAFORMA ROBÓTICA DE CAPTURA DE
NANOSATÉLITES NA ÓRBITA TERRESTRE**

Recife
2023

VITOR DOMINGUES MARQUES RIBEIRO

**MODELAGEM DINÂMICA DE PLATAFORMA ROBÓTICA DE CAPTURA DE
NANOSATÉLITES NA ÓRBITA TERRESTRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Pernambuco, como requisitos parciais para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Aeroespaciais.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo.

Recife

2023

Catálogo na fonte

Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

R484m Ribeiro, Vitor Domingues Marques.

Modelagem dinâmica de plataforma robótica de captura de nanossatélites na órbita terrestre / Vitor Domingues Marques Ribeiro, 2023.

109 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial. Recife, 2023.

Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia aeroespacial. 2. Detritos espaciais. 3. Robótica. 4. Nanossatélites. 5. Servocontrole visual. I. Santos, Tiago Felipe de Abreu (Orientador). II. Araújo, Marcus Costa de (Coorientador). III. Título.

UFPE

629.1CDD (22. ed.)

BCTG / 2024 - 31

VITOR DOMINGUES MARQUES RIBEIRO

**MODELAGEM DINÂMICA DE PLATAFORMA ROBÓTICA DE CAPTURA DE
NANOSSATÉLITES NA ÓRBITA TERRESTRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Aeroespaciais.

Área de concentração: Ciências e Tecnologias Aeroespaciais.

Aprovada em: 28/09/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos
(Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araujo Filho
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Henrique Fernandez
(Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa, Aline, por sempre me estimular a perseverar e evoluir pessoal e intelectualmente, além de acreditar no meu potencial.

Agradeço ainda aos meus pais, Vera e Heron, por terem investido fortemente em uma base escolar, moral e ética que me acompanham por todo o tempo.

Ao meu irmão, Hiago por ter sido meu parceiro de vida desde que nasceu e que compartilhou de diversas vitórias em minha trajetória de vida e acadêmica.

Ao meu Orientador, Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos, por todo apoio, disposição, camaradagem e exemplo que me ofereceu ao longo dessa jornada acadêmica.

Ao meu Coorientador, Dr. Marcus Costa Araújo, pelas orientações complementares e oportunidades oferecidas ao longo dessa pesquisa.

A todos os amigos da família SOLDAMAT, por compartilharem alegria, motivação e terem oferecido amizade e esforços para explorar os diversos campos da ciência.

A todos os colegas do INTM, por estarem disponíveis em momentos definitivos para o desenvolvimento da pesquisa e nas trocas de rico conhecimento.

Ao Laboratório de Eletrônica e Sistemas Embarcados Espaciais (LABESEE) da UFMA, por terem cedido material importante para a elaboração de uma ferramenta de Inteligência Artificial primordial para o sucesso nesta pesquisa, especialmente aos professores: Dr. Carlos Alberto Rios Brito Júnior e Dr. Luís Cláudio de Oliveira Silva.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (PPGEA – UFPE) pela oferta de recursos e suporte em todas as fases desta pesquisa.

À Rede Nordeste Aeroespacial (RNA) pela interdisciplinaridade e intercâmbio de ideias e experiências entre vários professores e pesquisadores talentosos e na criação de uma comunidade amigável e solícita.

A todos que, ainda que não citados individualmente, se disponibilizaram a contribuir com a realização desse trabalho.

RESUMO

No presente trabalho é apresentado o estudo dos fenômenos dinâmicos de uma plataforma robótica em ambiente espacial na órbita do planeta Terra ao executar a atividade de captura de detritos espaciais com dimensões semelhantes às de um nanossatélite. O estudo se desenvolve considerando perturbações causadas pelos torques gerados pelas juntas do braço robótico durante o movimento de captura e a aplicação de uma técnica de controle que compense tais perturbações utilizando sensores de visão acoplados à ferramenta de captura instalada na extremidade do braço robótico. O braço robótico se descreve por um manipulador de seis juntas rotativas e, portanto, seis graus de liberdade, sendo três para posição e três para orientação do conjunto ferramenta-sensores. O estudo sugere desde a modelagem estrutural até os valores limites de torque e aceleração do braço robótico durante sua operação, simulado em ambiente de *software*. A avaliação do desempenho da plataforma robótica sugere que o robô deve ter sua base o máximo massiva possível a fim de reduzir os efeitos da inércia, responsável por reduzir o alcance do manipulador robótico durante a tarefa de captura. O algoritmo de controle aplicado fez uso de controle híbrido, combinando controles reativo e deliberativo, de forma a utilizar controle Proporcional Integral-Derivativo (PID) na porção reativa do algoritmo. O robô estudado mostrou capacidade de executar a tarefa de captura em 43,3 segundos em uma das configurações iniciais avaliadas. A configuração de melhor desempenho foi apontada como condição ótima de captura.

Palavras-chave: detritos espaciais; robótica; nanossatélites; servocontrole visual.

ABSTRACT

The present work presents a study of the dynamic phenomena of a robotic platform in a space environment in Earth orbit while performing the task of capturing space debris with dimensions similar to those of a nanosatellite. The study is developed considering disturbances caused by torques generated by the joints of the robotic arm during the capture motion and the application of a control technique that compensates for such disturbances using vision sensors coupled to the capture tool installed at the end of the robotic arm. The robotic arm is described as a manipulator with six revolute joints and, therefore, six degrees of freedom, three for position and three for orientation of the tool-sensor assembly. The study encompasses structural modeling and determination of torque and acceleration limits for the robotic arm during its operation, simulated in a software environment. The evaluation of the performance of the robotic platform suggests that the robot's base should be as massive as possible in order to reduce the effects of inertia, which is responsible for reducing the reach of the robotic manipulator during the capture task. The applied control algorithm makes use of hybrid control, combining reactive and deliberative controls, employing Proportional Integral-Derivative (PID) control in the reactive portion of the algorithm. The studied robot demonstrated the capability to perform the capture task in 43.3 seconds in one of the evaluated initial configurations, with the configuration yielding the best performance identified as the optimal capture condition.

Keywords: space-debris; robotics; nanosatellites; visual servoing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESPAÇO DE TRABALHO ESFÉRICO	22
FIGURA 2 - COMPARAÇÃO ENTRE ESPAÇO DE TRABALHO E DE CONFIGURAÇÃO DE UM ROBÔ PLANAR DE DUAS JUNTAS.	23
FIGURA 3 - ROBÔS DE PINTURA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA	24
FIGURA 4 - ROBÔ MANIPULADOR EM CADEIA ABERTA (A); PLATAFORMA DE STEWART-GOUGH DE MANIPULAÇÃO EM CADEIA FECHADA (B).	25
FIGURA 5 - ROBÔ SERIAL (A); E ROBÔ PARALELO (B)	26
FIGURA 6 - ESQUEMA CINEMÁTICO DE UM ROBÔ ARTICULADO DE 6 DOF EM CADEIA ABERTA.	27
FIGURA 7 - CINEMÁTICA DIRETA DE UM ROBÔ PLANAR "3R" DE CADEIA ABERTA.	28
FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG	30
FIGURA 9 - EXEMPLO DE MANIPULADOR DE SEIS GRAUS DE LIBERDADE EM CADEIA CINEMÁTICA SERIAL, COMPOSTO DE UM BRAÇO ARTICULADO SEM DESLOCAMENTO DE JUNTAS E UM PUNHO ESFÉRICO.	32
FIGURA 10 - SOLUÇÃO GEOMÉTRICA DE CINEMÁTICA INVERSA DO ROBÔ PLANAR DE 2 DOF	35
FIGURA 11 - CINEMÁTICA INVERSA DA POSIÇÃO DE UM ROBÔ 6R.	37
FIGURA 12 - MODELO DE ROBÔ EM ESPAÇO ORBITAL DE LIVRE-FLUTUAÇÃO	45
FIGURA 13 - MODELO EM CAD DA PLATAFORMA ROBÓTICA ORBITAL DE CAPTURA DE NANOSSATÉLITES (PROCAN)	54
FIGURA 14 - VISTA SUPERIOR DO ROBÔ PROCAN COMPLETAMENTE ESTENDIDO.	56
FIGURA 15 - COTAS NOTÁVEIS DOS ELOS DO MANIPULADOR ROBÓTICO	56
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DOS TENSORES DE INÉRCIA DISTRIBUÍDOS AO LONGO DO ROBÔ	61
FIGURA 17 - POSIÇÃO DE MÁXIMA EXTENSÃO DO MANIPULADOR ROBÓTICO.	62
FIGURA 18 - POSIÇÃO DOS SERVOMOTORES DO ROBÔ	63
FIGURA 19 - CONFIGURAÇÃO DO BRAÇO RECOLHIDO	64

FIGURA 20 - CONFIGURAÇÃO DO BRAÇO ESTENDIDO	64
FIGURA 21 - VARIAÇÃO DO TORQUE EM CADA JUNTA DURANTE A TRAJETÓRIA "RECOLHIDO/ESTENDIDO" COM VELOCIDADE MÁXIMA EM CADA JUNTA	65
FIGURA 22 - TORQUE EXIGIDO NA TRAJETÓRIA BRAÇO RECOLHIDO/BRAÇO ESTENDIDO.	66
FIGURA 23 -TORQUE NA TRAJETÓRIA BRAÇO RECOLHIDO/BRAÇO ESTENDIDO DENTRO DOS LIMITES DOS MOTORES ACOPLADOS ÀS JUNTAS DO ROBÔ	68
FIGURA 24 - TORQUES NECESSÁRIOS PARA DESLOCAMENTO DO OBJETO EM VELOCIDADE MÁXIMA.	69
FIGURA 25 - TORQUE DURANTE RECOLHIMENTO DO BRAÇO ROBÓTICO COM 40% DO TORQUE LIMITE DOS MOTORES.	69
FIGURA 26 - DIAGRAMA DE CONTROLE DA TAREFA DE CAPTURA	76
FIGURA 27 - POSIÇÃO INICIAL RELATIVA ENTRE CUBESAT E PROCAN PARA O EXPERIMENTO 1.	79
FIGURA 28 - TORQUES E ÂNGULOS DAS JUNTAS DO ROBÔ DURANTE O EXPERIMENTO 1	80
FIGURA 29 - POSIÇÃO DE CAPTURA DO CUBESAT EXERCIDA PELO ROBÔ PROCAN	80
FIGURA 30 - DESLOCAMENTO DA BASE SATELITAL NO EXPERIMENTO 1	81
FIGURA 31 - VARIAÇÃO DA ATITUDE DA BASE SATELITAL DURANTE O EXPERIMENTO 1	82
FIGURA 32 - POSIÇÃO DO CUBESAT PARA O EXPERIMENTO 2	82
FIGURA 33 - POSIÇÃO FINAL DE CAPTURA NO EXPERIMENTO 2	83
FIGURA 34 – POSIÇÃO FINAL DE CAPTURA DO EXPERIMENTO 2.1	84
FIGURA 35 - VARIAÇÃO DE ATITUDE DA BASE SATELITAL NO EXPERIMENTO 2	85
FIGURA 36 - VARIAÇÃO DE ATITUDE DA BASE SATELITAL NO EXPERIMENTO 2.1	85
FIGURA 37 - DESLOCAMENTO DA BASE SATELITAL NOS EXPERIMENTOS 2 E 2.1	86
FIGURA 38 - POSIÇÃO INICIAL DO EXPERIMENTO 3	86
FIGURA 39 - POSIÇÃO INTERMEDIÁRIA DO EXPERIMENTO 3	87

FIGURA 40 - DESLOCAMENTO DA BASE SATELITAL DURANTE O EXPERIMENTO 3	88
FIGURA 41 - VALORES DE TORQUE E ÂNGULO DAS JUNTAS DURANTE O EXPERIMENTO 3	89
FIGURA 42 - VARIAÇÃO DE ATITUDE DA BASE SATELITAL DURANTE O EXPERIMENTO 3	89
FIGURA 43 - POSIÇÃO FINAL DE CAPTURA DO CUBESAT NO EXPERIMENTO 3	90
FIGURA 44 - VISTAS ORTOGONAIS DA POSIÇÃO DO CUBESAT EM RELAÇÃO À BASE DO ROBÔ	91
FIGURA 45 - INSTANTE DA COLISÃO DA FERRAMENTA DE CAPTURA COM O CUBESAT NO EXPERIMENTO 4	91
FIGURA 46 - TAREFA DE CAPTURA LIMITADA PELO ALCANCE DO ROBÔ APÓS MUDANÇA DE CONSTANTES PID	93
FIGURA 47 - APROXIMAÇÃO MÁXIMA APÓS IMPLEMENTAÇÃO DE ESTRATÉGIA DE CONTROLE CONDICIONAL	94
FIGURA 48 - INSTANTE DE MAIOR APROXIMAÇÃO COM A FERRAMENTA DE CAPTURA RECOLHIDA	95
FIGURA 49 - POSIÇÃO DO MANIPULADOR APÓS APROXIMAÇÃO MÁXIMA E FERRAMENTA DE CAPTURA ESTENDIDA.	95
FIGURA 50 - POSIÇÃO DO CUBESAT EM RELAÇÃO AO ROBÔ	96
FIGURA 51 - COLISÃO ENTRE FERRAMENTA DE CAPTURA E CUBESAT AO APROVEITAR ESTRATÉGIA DE CAPTURA DO EXPERIMENTO 4 NO EXPERIMENTO 5	97
FIGURA 52 - INSTANTE DE CAPTURA DO CUBESAT EM POSIÇÃO LIMÍTROFE AO ALCANCE DURANTE EXPERIMENTO 5.1	98
FIGURA 53 - VARIAÇÃO DE ATITUDE DA BASE SATELITAL AO LONGO DO EXPERIMENTO 5.1	98
FIGURA 54 - VARIAÇÕES DE TORQUES E POSIÇÕES ANGULARES NAS JUNTAS DO ROBÔ DURANTE O EXPERIMENTO 5.1	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS D-H DO MANIPULADOR SERIAL DA FIGURA 9.	32
TABELA 2 - PARÂMETROS ESTRUTURAIS DO ROBÔ	57
TABELA 3 - PARÂMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG DO ROBÔ	57
TABELA 4 - COMPONENTES (HARDWARE) DO ROBÔ	60
TABELA 5 - ESPECIFICAÇÕES DINÂMICAS DOS SERVOMOTORES	62
TABELA 6 - COMBINAÇÃO DE MOTORES PARA AS JUNTAS DO ROBÔ	63
TABELA 7 - TESTES DE AJUSTE DE CONSTANTES DE CONTROLE PID NO EXPERIMENTO 4.....	92
TABELA 8 - TEMPO, CONSUMO E VALORES MÉDIOS CALCULADOS DE CADA EXPERIMENTO.....	99
TABELA 9 TEMPO, CONSUMO E VALORES MÁXIMOS OBTIDOS EM CADA EXPERIMENTO.....	100
TABELA 10 - TEMPO, CONSUMO E VALORES MÍNIMOS OBTIDOS EM CADA EXPERIMENTO.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicação)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i> (Agência de Projetos de Pesquisa Avançados de Defesa)
DH, D-H	Denavit-Hartenberg
DOF	<i>Degrees Of Freedom</i> (Graus De Liberdade)
IBVS	<i>Image-Based Visual Servoing</i> (Servocontrole Visual Baseado em Imagem)
IOC	<i>Initial Operational Capability</i> (Capacidade Inicial de Operação)
ISS	<i>International Space Station</i> (Estação Espacial Internacional)
LABESEE	Laboratório de Eletrônica e Sistemas Embarcados Espaciais
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação)
MJG	Matriz Jacobiana Generalizada
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
OOS	<i>On-Orbit Servicing</i> (Serviços Em-Órbita)
PBVS	<i>Pose-Based Visual Servoing</i> (Servocontrole Visual Baseado em Pose)
PD	Proporcional Derivativo
PID	Proporcional Integral-Derivativo
PROCaN	Plataforma Robótica Orbital de Captura de Nanossatélites
RAC	<i>Resolved Acceleration Control</i> (Controle de Aceleração Resolvido)
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i> (Detecção e Distanciometria por Rádio)
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório)
RMRC	<i>Resolved Motion Rate Control</i> (Controle de Taxa de Movimento Resolvido)
ROI	<i>Region Of Interest</i> (Região de Interesse)
TCP	<i>Tool Center Point</i> (Ponto Central da Ferramenta)
YOLO	<i>You Only Look Once</i> (Você Olha Apenas Uma vez)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	ABORDAGEM DO PROBLEMA	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2.3	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	18
2.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1.1	Espaço de trabalho do robô	21
3.1.2	Graus de liberdade do robô.....	23
3.1.3	Modelos de manipuladores robóticos	25
3.1.4	Cinemática	27
3.1.4.1	Cinemática direta.....	27
3.1.4.2	Cinemática inversa	33
3.1.4.3	Cinemática diferencial	38
3.1.4.4	Cinemática da plataforma satelital.....	40
3.1.5.1	Formulação de newton-euler	42
3.1.5.2	Dinâmica da plataforma satelital.....	44
3.1.6	Controle baseado em visão	49
3.1.6.1	Componentes básicos do Servocontrole Visual	50
3.1.6.2	Servocontrole Visual Baseado em Imagem.....	51
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
4.1	MODELAGEM DO MANIPULADOR ROBÓTICO.....	54
4.2	CINEMÁTICA DIRETA.....	57
4.3	CINEMÁTICA INVERSA	59
4.4	DINÂMICA	60
4.4.1	Formulação de Newton-Euler	70
4.4.2	Dinâmica da plataforma satelital.....	70
4.4.3	Matriz Jacobiana Generalizada (MJG)	73
4.5	CONTROLE	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	78

5.1	EXPERIMENTO 1	79
5.2	EXPERIMENTO 2	82
5.2.1	Experimento 2.1.....	83
5.3	EXPERIMENTO 3	86
5.4	EXPERIMENTO 4	90
5.5	EXPERIMENTO 5	96
5.5.1	Experimento 5.1.....	97
5.6	AVALIAÇÃO DOS DADOS DOS EXPERIMENTOS	99
6	CONCLUSÕES	101
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
	REFERÊNCIAS.....	105

1 INTRODUÇÃO

1.1 ABORDAGEM DO PROBLEMA

Os recursos desenvolvidos pela humanidade no contexto aeroespacial são percebidos pelos seres humanos em suas diversas atividades, considerando assim, principalmente as áreas governamentais e de pesquisa científica, bem como as indústrias: militar, agropecuária, de navegação aérea, terrestre e marítima, de busca e salvamento, de engenharia, entre outras. Sendo assim, há que ser considerada a preocupação sobre o acesso humano ao Espaço, uma vez que, depois de numerosas missões, a humanidade tem ocupado o território orbital da Terra com objetos artificiais. Tais objetos lançados pelo ser humano vão desde satélites de diversos tamanhos a pedaços de carenagens de veículos espaciais, parafusos, e até partículas de tinta solidificadas sob a temperatura da atmosfera orbital. Esses objetos artificiais são conhecidos, de forma geral, como “detritos espaciais” (*space debris*).

A presença de detritos espaciais na órbita da Terra traz risco às missões espaciais, uma vez que, a média de velocidade desses objetos ultrapassa 27 mil km/h em relação ao referencial inercial da Terra. Essa velocidade é suficiente para que qualquer colisão com veículos espaciais em órbita ou em trânsito pela órbita da Terra cause perdas significativas a satélites, veículos e à Estação Espacial Internacional (ISS – *International Space Station*).

Em 2013, o chefe da Agência Espacial Russa (*RosCosmos*) anunciou que a probabilidade de colisão entre uma nave espacial e detritos espaciais maiores que 1 centímetro era de 1 a cada 1,5 a 2 anos, considerando-se assim, a probabilidade de 50% a 67% para qualquer ser vivo ou objeto que passe 1 ano na órbita da Terra (HALL, 2014).

A década de 2010, para as Ciências Aeroespaciais, foi marcada pelo advento da tecnologia de nanossatélites, particularmente pelo modelo intitulado “CubeSat” (CDS, 2022), que propõe a miniaturização de missões satelitais à escala de cubos de 10 cm de aresta e até 2,0 kg de massa. Os CubeSats são satélites modulares em que cada módulo é limitado por um cubo com 10 cm de aresta e, cada CubeSat é classificado também pela quantidade de módulos, representados pela letra “U”. Sendo assim, um CubeSat de um módulo é chamado de “1U” e um CubeSat de 12 módulos é chamado de “12U”. Essa inovação tecnológica foi responsável pelo aumento

significativo de missões espaciais, ultrapassando 250 nanossatélites lançados em 2017 e mais de 300 nanossatélites lançados em 2021 (KULU, 2022). A contagem total até junho de 2022 é de 2037 nanossatélites lançados (KULU, 2022).

As missões de CubeSats foram responsáveis também por um expressivo aumento na quantidade de detritos espaciais na órbita da Terra. Estimou-se que, entre 2003 e 2015, chegaram à órbita da Terra aproximados 500 mil detritos espaciais de tamanhos entre 1 e 10 cm e mais de 100 milhões de partículas menores que 1 cm, que não são rastreadas no momento (PANG et al., 2016). Em 2022, do total de 2037 nanossatélites lançados, 241 são considerados não operacionais, ou seja, a não ser que seja provida a devida manutenção, são considerados também detritos espaciais, além de 127 nanossatélites que foram lançados e suas localizações não puderam ser determinadas (PANG et al., 2016).

Em 2019, a NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos), a DARPA (Agência de Projetos de Pesquisa Avançados de Defesa dos EUA - *Defense Advanced Research Projects Agency*) e o setor comercial da Astronáutica demonstraram interesse em demonstrar capacidade inicial de operação (IOC) de Serviços em Órbita Robóticos, os “*Robotics OOS*” (*On-Orbit servicing*), que se resumem em diversos serviços como inspeção, manutenção, abastecimento, etc, além de remoção de detritos por plataformas espaciais dotadas de mecanismos robóticos. O interesse se baseia na salvaguarda da vida humana e ampliação da disponibilidade do serviço, uma vez que a operação humana possui, em relação à operação por máquinas, maiores limitações tais como de oxigênio, e exposição a variações térmicas, radiação e de bateria para manter os subsistemas dos trajes espaciais. Observa-se ainda que o operador humano estaria ainda mais exposto a colisão com detritos espaciais no ambiente externo ao veículo ou estação espacial e, mesmo um robô sob a mesma exposição confere uma perda de menor valor em relação à vida humana (DAVIS; MAYBERRY; PENN, 2019).

É comum que robôs sejam utilizados como solução para ambientes considerados hostis para seres humanos, mesmo assim, observa-se que a operação de manipuladores robóticos e demais mecanismos em ambiente orbital de microgravidade traz um desafio particular à Robótica. Uma vez que, na superfície da Terra, a dinâmica de manipuladores robóticos conta com a dissipação de energia mecânica, através de sua base, sobre a superfície de instalação do robô e conseqüentemente da Terra, na órbita da Terra, a plataforma robótica se encontra

“flutuando”, sem os mesmos recursos de dissipação de energia. Esse cenário, do ponto de vista da operação do robô como uma espaçonave, afeta seu controle de atitude, ou seja, tanto sua orientação em relação a uma referência inercial, quanto suas velocidades angulares e até a inércia do corpo robótico por inteiro. Sendo assim, diversas técnicas de estimação de movimento e de controle do mecanismo robótico ficam comprometidas por dependerem principalmente da cinemática e da dinâmica inversa do robô (SEWERYN et al., 2017).

Diante de diversos modelos de controle usados em Robótica, para lidar com os distúrbios gerados sobre a base flutuante de um robô em micro gravidade, pode-se apontar como solução, o controle baseado em visão, conhecido como “*Visual Servoing*”, que insere o movimento da ferramenta do robô, em um sistema de controle alimentado pelas informações obtidas por uma câmera embarcada em um local específico do robô (SICILIANO; KHATIB, 2016). Esse modelo de controle, para robôs não-planares, deve utilizar dados de pelos menos dois sensores de posição, que podem ser duas câmeras, utilizando o conceito de “visão estereoscópica”, ou uma câmera e um sensor de distância (preferencialmente RADAR ou LASER), combinando assim a posição identificada a partir da câmera em duas coordenadas cartesianas com a distância obtida pelo sensor como terceira coordenada espacial.

Ainda com o *Visual Servoing*, deve-se combinar recursos de identificação de objetos oriundos de técnicas de Aprendizagem de Máquina, tais como algoritmos classificadores capazes de distinguir objetos em órbita quando avistados pelos sensores de visão do robô.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo dinâmico de um manipulador robótico apropriado para operação de captura de nanossatélites do padrão “CubeSat 1U”, que estejam fora de operação, em condições de microgravidade. CubeSats são o grupo mais frequente dentre os nanossatélites já lançados, por esse motivo, escolheu-se essa categoria como objetivo. A escolha da classe “1U” de CubeSat como objeto de captura se deve à reduzida variação de distância do centro do satélite à sua superfície e à elevada representatividade, sendo essa a segunda classe mais numerosa em CubeSats lançados (KULU, 2022). A classe de CubeSats lançados mais numerosa é a de “3U”, no entanto, sua geometria longilínea traria dificuldades na estimação de sua posição relativa ao robô. Deve-se ainda desenvolver o sistema de controle do robô, baseado em visão computacional, sendo capaz de compensar os distúrbios dinâmicos presentes no cenário orbital (“CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers”, [s.d.]).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, este trabalho propõe ainda: a simulação do modelo virtual, desenvolvido em *software* “Solid Edge” em ambiente de gravidade-zero no *software* “CoppeliaSim” para a verificação da melhor técnica de captura viável do “CubeSat”, considerando trajetórias do manipulador e diferentes ferramentas observadas em bibliografia.

Entende-se a melhor técnica viável de captura como, uma vez identificado o alvo, a que tiver menores: tempo até a captura; consumo de energia; e instabilidade dinâmica após captura (em que há a necessidade de controle de atitude do conjunto robô-CubeSat).

Para estabelecer a melhor técnica viável de captura, os seguintes objetivos devem ser cumpridos:

- Dimensionar as características estruturais da plataforma robótica combinando os padrões de “*CubeSat*” com o alcance de 0,5 m;
- Dimensionar os motores utilizados na estrutura do robô a partir das características de massa e inércia;
- Obter o modelo cinemático do robô a partir da Matriz Harmônica de Transformação;
- Obter a matriz Jacobiana do robô;
- Obter o modelo dinâmico do robô a partir da Matriz Jacobiana Generalizada para robôs em livre flutuação;
- Obter modelo de rede neural de detecção de “*CubeSat 1U*” para rastreamento do objeto a ser capturado;
- Elaborar modelo de controle dinâmico baseado em IBVS (Servocontrole Visual Baseado em Imagem);
- Avaliar o desempenho das técnicas de captura considerando os parâmetros de: consumo de energia e instabilidade dinâmica após captura.

2.3 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Dada a complexidade na condução de missões e operações espaciais, há que se considerar a significativa incidência de incertezas atreladas ao sucesso em diversas fases de uma missão espacial, tais como: lançar, entregar a carga na órbita correta, estabelecer comunicação, rastrear, operar, manter e retirar de órbita em segurança. Considerando ainda que tais missões são distintamente custosas, observa-se o interesse das partes interessadas, como as diversas agências espaciais nacionais e empresas privadas, em mitigar custos e riscos à vida humana e ao bom andamento de operações espaciais (DAVIS; MAYBERRY; PENN, 2019).

Uma vez compreendidas as inúmeras vulnerabilidades das missões espaciais, já se vê a robótica como solução por já haver atendido demandas de salvaguarda da vida humana e de redução de custos em diversos setores da indústria, haja visto o ambiente fabril de montadoras de automóveis e aparelhos eletrônicos, além de robôs figurando em terrenos acidentados, hostis e contaminados. Pensando analogamente, esses cenários não se diferem largamente do cenário orbital, podendo-se então

aproveitar de técnicas já consagradas e adaptá-las ao ambiente de microgravidade (ZHAO; LIU; WU, 2020).

2.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Nesta seção, discute-se o conteúdo deste trabalho, organizado em sete capítulos e o referencial de pesquisa para esta produção acadêmica.

No presente trabalho, após o entendimento do problema observado em contexto Aeroespacial, com conseqüente exposição dos objetivos deste trabalho, justificados e motivados, é exibida uma revisão da bibliografia disponível, responsável por embasar a proposta de solução à problemática apresentada. A revisão bibliográfica, como segundo capítulo desta produção, deve guiar o leitor a compreender a sequência de pesquisas e produções acadêmicas com mesmos ou semelhantes propósitos ao deste documento.

Ainda na revisão bibliográfica é desenvolvida a fundamentação teórica para o desenvolvimento da presente pesquisa, em que se observa o conteúdo didático extraído para sustentar o desenvolvimento teórico apresentado no presente trabalho.

No Capítulo 4 são observados os elementos considerados para simular a ação da plataforma robótica em ambiente orbital de microgravidade, bem como a utilização de tais elementos como parâmetros de configuração do cenário construído em simulação de *software*.

Ainda no Capítulo 4, se encontra o núcleo do desenvolvimento da presente produção, em que se apresenta a modelagem dinâmica da plataforma robótica, ou seja, a computação dos requisitos dinâmicos propostos para a produção do robô e conseqüente modelo de técnica de captura de objetos na órbita da Terra, observando-se as características semelhantes às de um nanossatélite "*CubeSat 1U*". No final do capítulo 4 é exibida a técnica de controle explorada para a tarefa de captura do *CubeSat*.

Os resultados obtidos em simulação de *software* são exibidos no Capítulo 5, onde são discutidos de forma a abordar os cenários de melhor operação e as características críticas à execução da tarefa pelo robô.

Ao final deste trabalho, podem-se observar no Capítulo 6 as considerações finais, com sugestões de trabalhos futuros a esta produção acadêmica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conteúdo deste capítulo apresenta trabalhos encontrados após pesquisa na literatura disponível sobre os temas relacionados a Robótica Espacial, Remoção de Detritos Espaciais, Serviços em Órbita, e palavras-chave afins.

O objetivo deste capítulo é contextualizar o leitor sobre possíveis soluções propostas a problemas parciais ou ao problema central, alvo deste trabalho: remover corpos inertes e inoperantes do ambiente orbital do planeta Terra.

Em 2017, Da Fonseca et al. apresentaram a modelagem das equações de estado de um veículo espacial dotado de manipulador robótico voltado à execução de Serviços em Órbita. No trabalho, os autores simulam a aproximação de duas espaçonaves: uma sendo o alvo e outra sendo a perseguidora, esta dotada de um manipulador robótico. O objetivo da simulação foi sincronizar a orientação (também chamada de “atitude”) das duas espaçonaves e reduzir a distância relativa, de modo a permitir o acoplamento entre os dois objetos por meio do manipulador robótico. No trabalho, tem-se a conclusão de que a perseguidora deve manobrar com o braço robótico recolhido e em seguida iniciar um movimento de rotação em torno do eixo do alvo. Tais condições permitiriam sensivelmente um acoplamento entre os dois objetos com o mínimo de distúrbios dinâmicos (DA FONSECA et al., 2017).

Deve-se considerar a importância do desenvolvimento de um protótipo de manipulador espacial dedicado à captura de satélites sem controle, esse é o conteúdo do trabalho de Seweryn et al. que, em 2017, publicaram um artigo sobre o robô WMS LEMUR. Os autores do artigo se preocuparam em lidar com os distúrbios dinâmicos gerados pelo torque das juntas do manipulador robótico. A estratégia incluiu trabalhar em um sistema de controle ótimo adaptativo, baseado em planejamento de trajetória e movimentos da plataforma robótica (SEWERYN et al., 2017).

Flores-Abad et al. (2014) apresentam uma revisão de tecnologias espaciais para Serviços em Órbita, que revelou que, das tecnologias disponíveis naquele momento, todas foram projetadas para operar com alvos perfeitamente conhecidos e cooperativos (que tenham capacidade de se mover para facilitar a captura). Segundo Flores-Abad et al, a operação de robôs para remoção de detritos espaciais ou de satélites inoperantes ainda é um conceito de missão espacial não validado que pode ter de lidar com muitos desafios técnicos, tais como mitigar os efeitos de distúrbios gerados pelas juntas do robô, estimação e predição da posição do alvo, além de

estratégias e mecanismo de captura, principalmente considerando que os alvos não são desenvolvidos para serem capturados (FLORES-ABAD et al., 2014).

Em 2016, Alepuz, Emami e Pomares desenvolveram um estudo sobre a aplicação do controle de um robô acoplado em uma plataforma satelital, utilizando a técnica de “Servocontrole Visual” (*Visual Servoing*), especificamente o baseado em imagem (*IBVS – Image-Based Visual Servoing*). O trabalho mostra o desenvolvimento das equações de controle voltadas ao rastreamento de um objeto a partir de uma câmera instalada na extremidade do elo terminal do robô, configuração conhecida como “*eye-in-hand*”(ALEPUZ; EMAMI; POMARES, 2016).

Alepuz, Emami e Pomares (2016) alertaram em seu trabalho sobre a necessidade do cuidado no tratamento de distúrbios incidentes sobre a dinâmica dos motores e sobre a atitude do sistema robô-satélite como um todo. Tais distúrbios podem ocasionar uma trajetória indesejada do manipulador, de forma repetitiva, irregular e, por consequência, caótica.

3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são abordados os fundamentos teóricos para o desenvolvimento do modelo robótico, bem como para embasar a pesquisa desenvolvida neste trabalho. Através de simulação de *software* considerando os parâmetros obtidos na pesquisa deve-se extrair as características dinâmicas do modelo de robô, de forma a possibilitar a reprodução parcial da simulação em ambiente laboratorial.

3.1.1 ESPAÇO DE TRABALHO DO ROBÔ

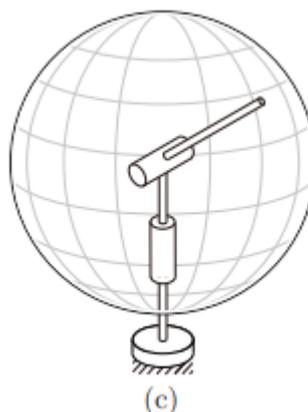
No estudo da aplicação de robôs a determinadas tarefas é apropriado estabelecer uma relação adequada entre o ambiente e os objetos a serem manipulados pelo robô com o alcance de atuação do robô para realizar tal tarefa. Esse alcance é denominado “espaço de trabalho” (“*workspace*”) do robô.

O espaço de trabalho de um robô deve compreender ao máximo o “espaço de tarefas” (“*task space*”) do mesmo robô (LYNCH; PARK, 2017). O espaço de tarefas é determinado pelos limites físicos do cenário em que o robô deve atuar. No caso deste

trabalho, entende-se como espaço de tarefas o espaço esférico com centro no centróide da base do robô e raio igual a 0,5 metro. O raio do espaço de tarefas foi determinado considerando a distância entre o robô e o objeto a ser capturado após procedimento de aproximação (“*Rendez-vous*”) (FONSECA et. al. 2016).

Diferentemente do espaço de tarefas, o espaço de trabalho do robô é limitado pelas restrições mecânicas da construção e operação do robô devido às limitações de juntas e computação. O espaço de trabalho é delimitado pelas distintas e possíveis posições alcançadas pela extremidade do manipulador robótico (excluindo-se qualquer ferramenta instalada). Na Figura 1 percebe-se um exemplo didático de robô com duas juntas rotativas que confere um espaço de tarefas esférico. Nesse caso, o espaço de trabalho é limitado à superfície da esfera, já que nenhum ponto interior à esfera é alcançável pela extremidade do manipulador.

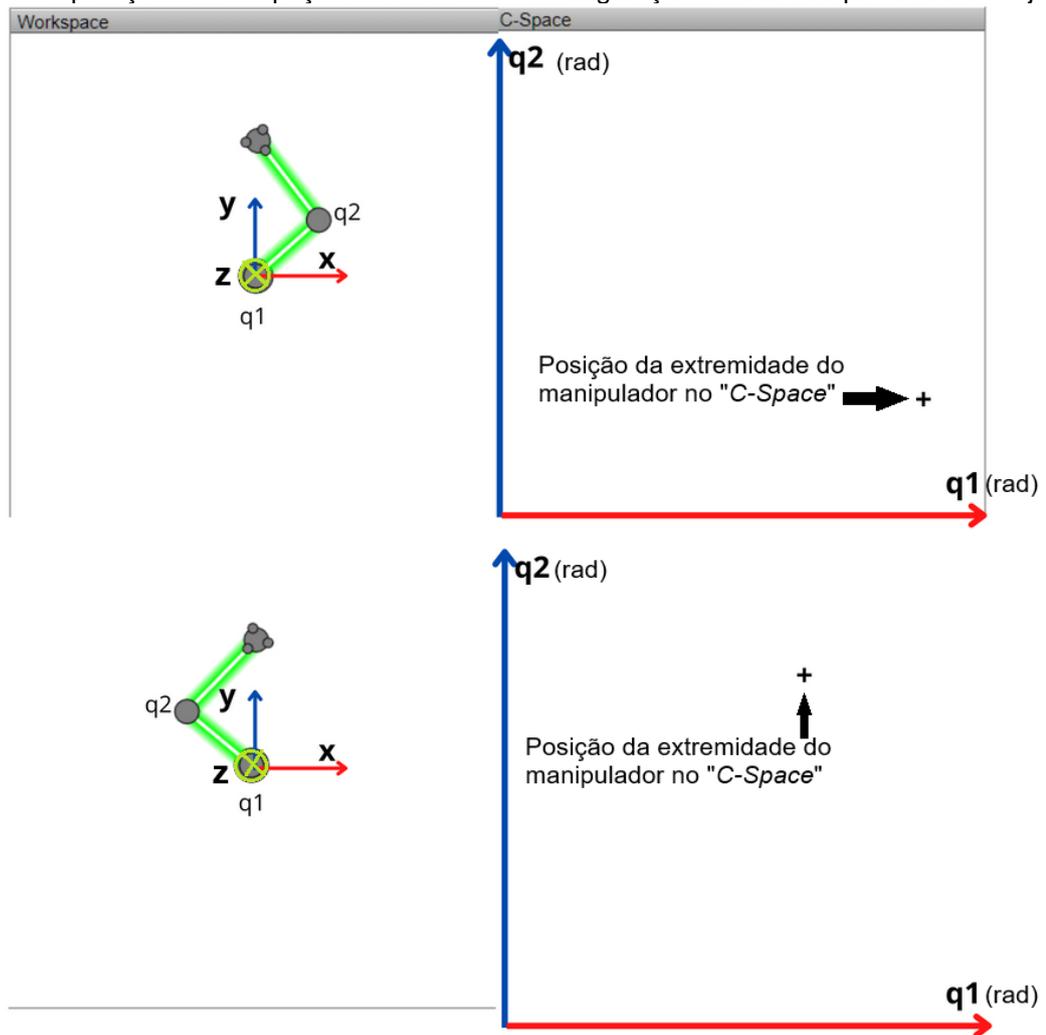
Figura 1 - Espaço de trabalho esférico



Fonte: Lynch, K. M.; Park, F. C. (2017, p. 33)

Entende-se ainda, por “espaço de configurações” (“*Configuration Space*” ou apenas “*C-Space*”) o conjunto de diferentes configurações que o robô pode assumir, respeitando suas restrições mecânicas. Vale perceber que cada ponto no espaço de tarefas ou no espaço de trabalho pode ser alcançado pelo robô através de diversas configurações diferentes. Na Figura 2 pode-se observar um robô planar de duas juntas (q_1 e q_2), que em configurações diferentes, posicionam a extremidade do manipulador na mesma posição do espaço de trabalho do robô (LYNCH; PARK, 2017).

Figura 2 - Comparação entre espaço de trabalho e de configuração de um robô planar de duas juntas.



Fonte: O Autor (2023).

Comparando-se então os espaços de trabalho e de configuração de um robô, pode-se perceber que, embora o espaço de trabalho esteja limitado às três dimensões espaciais, comumente endereçadas por coordenadas x , y e z , o espaço de configuração possui tantas dimensões quantas forem as juntas da cadeia cinemática que compõe o robô. Nesse caso, um robô com seis juntas teria um espaço de configuração de seis dimensões.

3.1.2 GRAUS DE LIBERDADE DO ROBÔ

Uma vez que o propósito da tarefa do robô alvo desta pesquisa é a captura de objetos sem aproveitamento em ambiente orbital, pode-se observar que o robô pode mover-se em direção ao objeto ou estender um manipulador com o intuito de trazer

este objeto para junto de si. Nesta pesquisa escolheu-se a proposta de utilizar um manipulador robótico acoplado à plataforma robótica, munida de uma ferramenta de captura a ser definida como um dos resultados desta pesquisa.

A partir da tarefa a ser desempenhada por um robô, deve-se determinar a ferramenta mais apropriada para seu cumprimento, e conseqüentemente, deve-se também observar as restrições de utilização de tal ferramenta, inclusive a de orientação da ferramenta no espaço. Como exemplo, há o caso de robôs industriais de pintura de automóveis, cuja orientação da pistola de tinta deve ser tal que direcione a saída da tinta ao encontro da superfície de pintura (Figura 3).

Figura 3 - Robôs de pintura na indústria automotiva



Fonte: KELLER-DRUCK (2023)

Os graus de liberdade de um robô são responsáveis por determinar o número de restrições ao seu movimento. Entende-se como robô “holonômico” aquele capaz de posicionar e orientar sua ferramenta (também chamada de “efetuador-final”) em quaisquer posição e orientação no espaço de trabalho, ou seja, quaisquer que sejam a posição e orientação necessárias para a ferramenta de um robô holonômico, será possível computar pelo menos uma configuração de juntas que permitirá que o robô alcance tais posição e orientação (LYNCH; PARK, 2017).

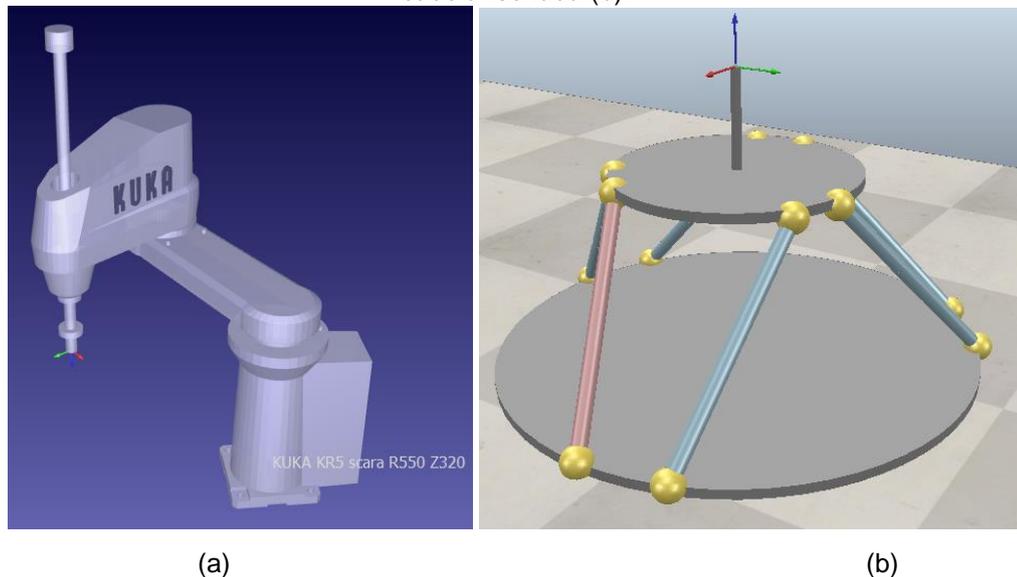
Para dimensionar um manipulador robótico holonômico deve-se garantir então seis graus de liberdade (DOF – “*Degrees Of Freedom*”), sendo três para posição e três para orientação do efetuador final.

3.1.3 MODELOS DE MANIPULADORES ROBÓTICOS

Manipuladores robóticos podem também ser classificados quanto à sua cadeia cinemática. Dessa característica derivam-se as classificações de manipuladores de cadeia aberta e fechada e a classificação em manipuladores seriais e paralelos.

Nos manipuladores de cadeia aberta, a posição e a orientação do efetuador final são unicamente determinadas pela posição das juntas. Nas cadeias fechadas, algumas juntas do manipulador não são atuadas, ou seja, se movem de forma passiva, conforme a posição de outras juntas, ativas (LYNCH; PARK, 2017).

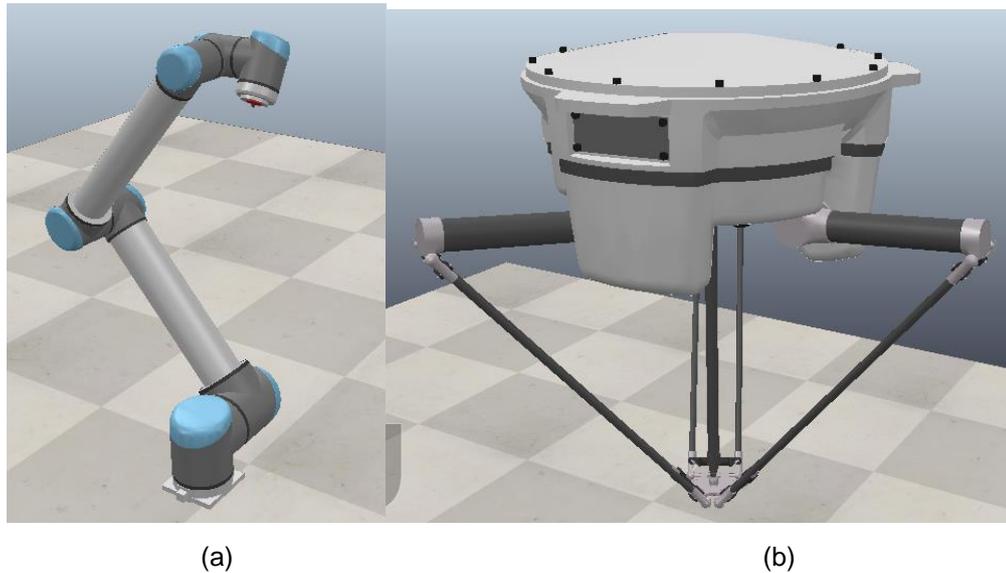
Figura 4 - Robô manipulador em cadeia aberta (a); Plataforma de Stewart-Gough de manipulação em cadeia fechada (b).



Fonte: O Autor (2023).

Com relação aos manipuladores seriais, pode-se defini-los por terem uma cadeia cinemática iniciando necessariamente na base do robô e terminando no efetuador final, além de que seus elos são conectados por juntas responsáveis por mover cada elo individualmente. Sistemas robóticos formados por duas ou mais cadeias cinemáticas seriais que suportam o mesmo efetuador-final são chamados manipuladores paralelos (SICILIANO; KHATIB, 2016).

Figura 5 - Robô serial (a); e robô paralelo (b)

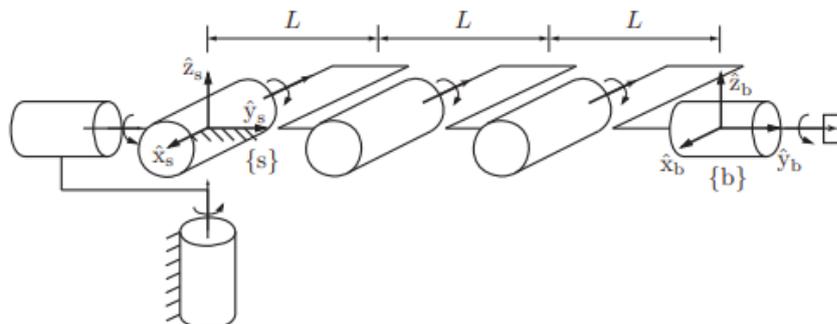


Fonte: O Autor (2023)

Dentre os diversos modelos de manipuladores, observa-se que o robô articulado de 6 DOF (seis graus de liberdade) é um dos mais comuns na indústria. Esse modelo de robô se destaca por minimizar a interferência da estrutura do manipulador no espaço de trabalho, dando assim a vantagem de alcançar espaços confinados, além de serem compostos por estruturas geralmente menores que as dos robôs cartesianos, tornando-os mais baratos para espaços de trabalhos menores (CRAIG, 2004).

O robô articulado antropomórfico é basicamente constituído por uma cadeia cinemática de seis juntas rotativas, sendo três ortogonais ao eixo do prolongamento do manipulador e três juntas com eixo paralelo ao mesmo prolongamento. Na Figura 6 é ilustrada uma representação da cadeia cinemática de um robô articulado de 6 DOF.

Figura 6 - Esquema cinemático de um robô articulado de 6 DOF em cadeia aberta.



Fonte: LYNCH; PARK (2017, p. 145)

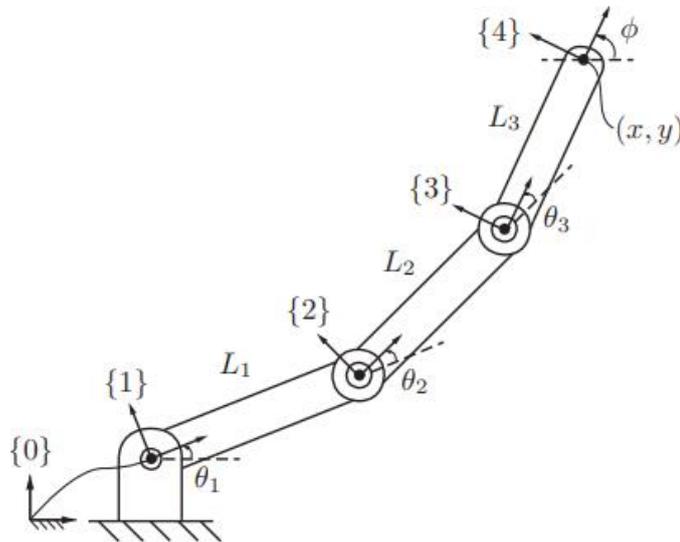
3.1.4 CINEMÁTICA

3.1.4.1 Cinemática Direta

Na Robótica, o estudo da cinemática é dividido, basicamente, em duas partes: Cinemática Direta e Cinemática Inversa. A Cinemática Direta é voltada a calcular a posição e orientação do efetuador final de um robô a partir dos valores de suas juntas. A cinemática inversa de um robô exerce, conforme se pode deduzir, a função contrária: calcular os valores das juntas do robô necessários a alcançar uma posição desejada para o efetuador final (LYNCH; PARK, 2017).

Observe-se a Cinemática Direta de um robô revoluto de três graus de liberdade (também chamado de “3R”), cujo esquema é exibido na Figura 7. Os comprimentos de cada elo são L_1 , L_2 e L_3 , enquanto $\{0\}$, ..., $\{4\}$ são os quadros de referência da base do robô, das três juntas e do efetuador final, respectivamente. Os valores θ_1 , θ_2 e θ_3 são as variáveis das juntas do manipulador (LYNCH; PARK, 2017).

Figura 7 - Cinemática Direta de um robô planar "3R" de cadeia aberta.



Fonte: LYNCH; PARK (2017, p. 138)

Para o caso ilustrado na Figura 7, as coordenadas cartesianas considerando que o robô é planar se restringem ao par (x, y) , e a orientação varia apenas no eixo "z", ortogonal ao plano de atuação do robô, e representada pela variável ϕ . Esses valores podem, matematicamente, ser calculados conforme as equações 3.1, 3.2 e 3.3:

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3.1)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3.2)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (3.3)$$

Para o caso de espaços de trabalho não planares, a cinemática direta de um robô vai além do uso de equações envolvendo trigonometria básica. Convém então o uso de recursos de álgebra linear. Mesmo assim, computar a cinemática direta de um robô através de matrizes abrange quaisquer espaços de trabalho, bem como quaisquer graus de liberdade, sendo assim uma das formas mais generalistas para obtenção da posição do efetuador final. Aproveitando-se o mesmo exemplo exposto na Figura 7, pode-se computar a cinemática direta do robô a partir do produto de quatro matrizes homogêneas de transformação aplicadas aos quadros de referência atrelados a cada elo do robô (Equação 3.4) (LYNCH; PARK, 2017).

$$T_{04} = T_{01} T_{12} T_{23} T_{34} , \quad (3.4)$$

onde:

$$T_{01} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{12} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{23} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{34} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Perceba-se que cada matriz homogênea T_{AB} é representada como uma transformação de posição do quadro de referência A para o quadro B (LYNCH; PARK, 2017).

Utilizando-se da mesma técnica, pode-se então definir a Equação de um robô articulado antropomórfico, para evitar quaisquer restrições de movimentos em um espaço de trabalho tridimensional. Tal Equação correlaciona então seis matrizes homogêneas de transformação entre quadros de referência em que se pode obter a posição do quadro de referência adjacente ao efetuador final (Equação 3.5).

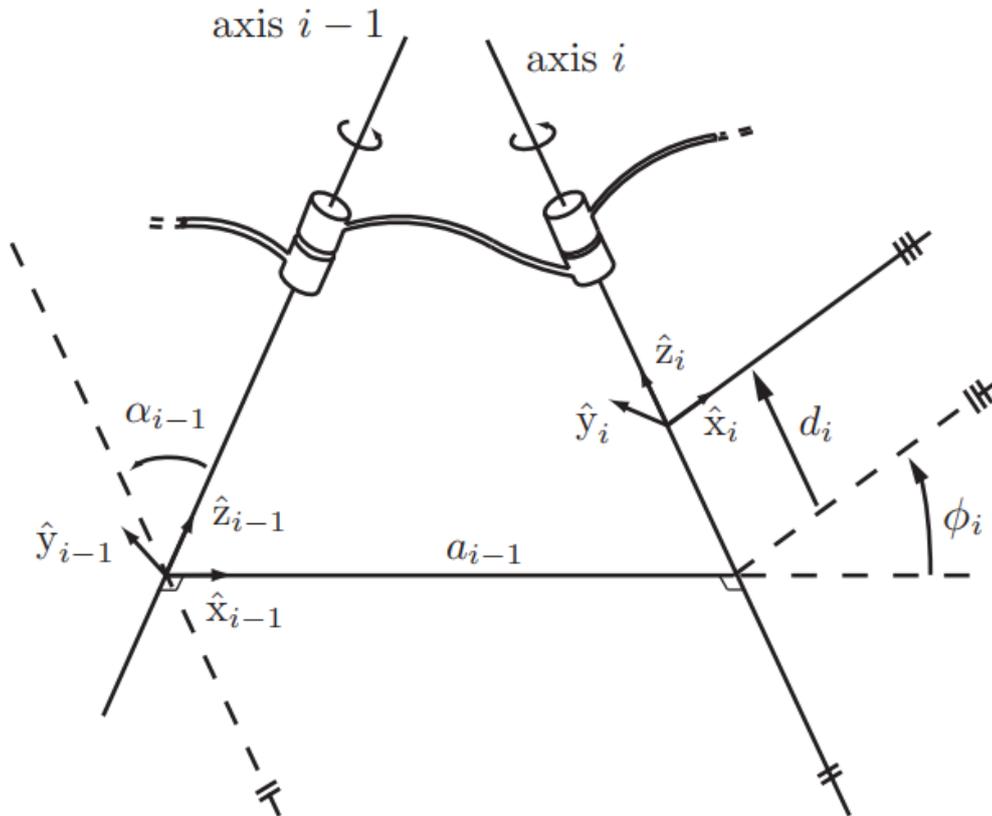
$$T_{06} = T_{01}T_{12}T_{23}T_{34}T_{45}T_{56}, \quad (3.5)$$

Para a análise da Cinemática Direta do manipulador pode-se então utilizar uma abordagem que correlaciona a Equação 3.4 com parâmetros da notação de *Denavit-Hartenberg* (ou, de forma reduzida, “notação” ou “parâmetros $D-H$ ”), conhecidos por trazerem uma representação da cadeia cinemática do robô em uma quantidade reduzida de valores em relação a outras notações como a notação de “produto de exponenciais”, que utiliza $6n$ números para descrever n eixos da cadeia, *versus* $4n$ números da notação *Denavit-Hartenberg* para descrever a estrutura do robô.

A propriedade básica da abordagem por *Denavit-Hartenberg* à Cinemática Direta consiste em instalar quadros de referência a cada elo de uma cadeia cinemática aberta e então derivar a Cinemática Direta a partir dos valores de deslocamento relativos entre quadros de referência de elos adjacentes. Sendo assim, de forma sequencial, se estabelecem relações entre os elos a partir da base do robô até a ferramenta acoplada ao efetuador final (LYNCH; PARK, 2017).

Ao utilizar a notação *D-H* deve-se obedecer a uma sequência de regras para posicionar os quadros de referência e obter os consequentes deslocamentos. Para tal, considere-se a ilustração da Figura 8:

Figura 8 - Ilustração dos parâmetros de Denavit-Hartenberg



Fonte: LYNCH; PARK (2017, p. 586)

- Cada eixo \hat{z}_i deve coincidir com o eixo i de uma junta e o eixo \hat{z}_{i-1} deve coincidir com o eixo $i-1$. A direção da rotação positiva em torno de cada eixo deve ser o determinado pela “regra da mão direita”;
- Uma vez que a direção do eixo \hat{z} foi estabelecida, a origem do quadro $\{i-1\}$ deve ser localizada no ponto onde o eixo da junta $i-1$ intercepta o segmento de reta ortogonal a os eixos \hat{z}_{i-1} e \hat{z}_i simultaneamente;
- Para determinar o eixo \hat{x} de cada quadro de referência deve-se então direcioná-lo conforme a orientação do segmento de reta mutuamente perpendicular aos eixos das juntas $i-1$ e i ;
- O eixo \hat{y} de cada quadro de referência é determinado unicamente a partir do produto matricial $\hat{x} \times \hat{y} = \hat{z}$.

Considerando o posicionamento dos quadros de referência a partir das regras mencionadas, deve-se então obter os parâmetros *D-H* conforme quatro definições adicionais:

- O **comprimento do elo** é igual ao comprimento do segmento de reta mutuamente perpendicular e recebe a denotação a_{i-1} para o elo $i - 1$. Apesar dessa definição, o comprimento do elo não necessariamente corresponde ao real comprimento físico do elo do robô;
- A **torção do elo** α_{i-1} é o ângulo entre \hat{z}_{i-1} e \hat{z}_i medidos sobre o eixo \hat{x}_{i-1} ;
- O **deslocamento do elo** d_i deve ser a distância da interseção entre \hat{x}_{i-1} e \hat{z}_i à origem do quadro do elo i (com a direção positiva no sentido do prolongamento do eixo \hat{z}_i);
- O **ângulo da junta**, comumente representado por φ_i ou θ_i , é o ângulo entre \hat{x}_{i-1} e \hat{x}_i em torno do eixo \hat{z}_i .

A partir dessas regras, pode-se descrever, neste caso, um robô de cadeia cinemática aberta com todas as juntas revolutas, onde os comprimentos, as torções e os deslocamentos dos elos (a_{i-1} , α_{i-1} , d_i) são todos constantes, enquanto os ângulos das juntas (φ_i ou θ_i) são variáveis.

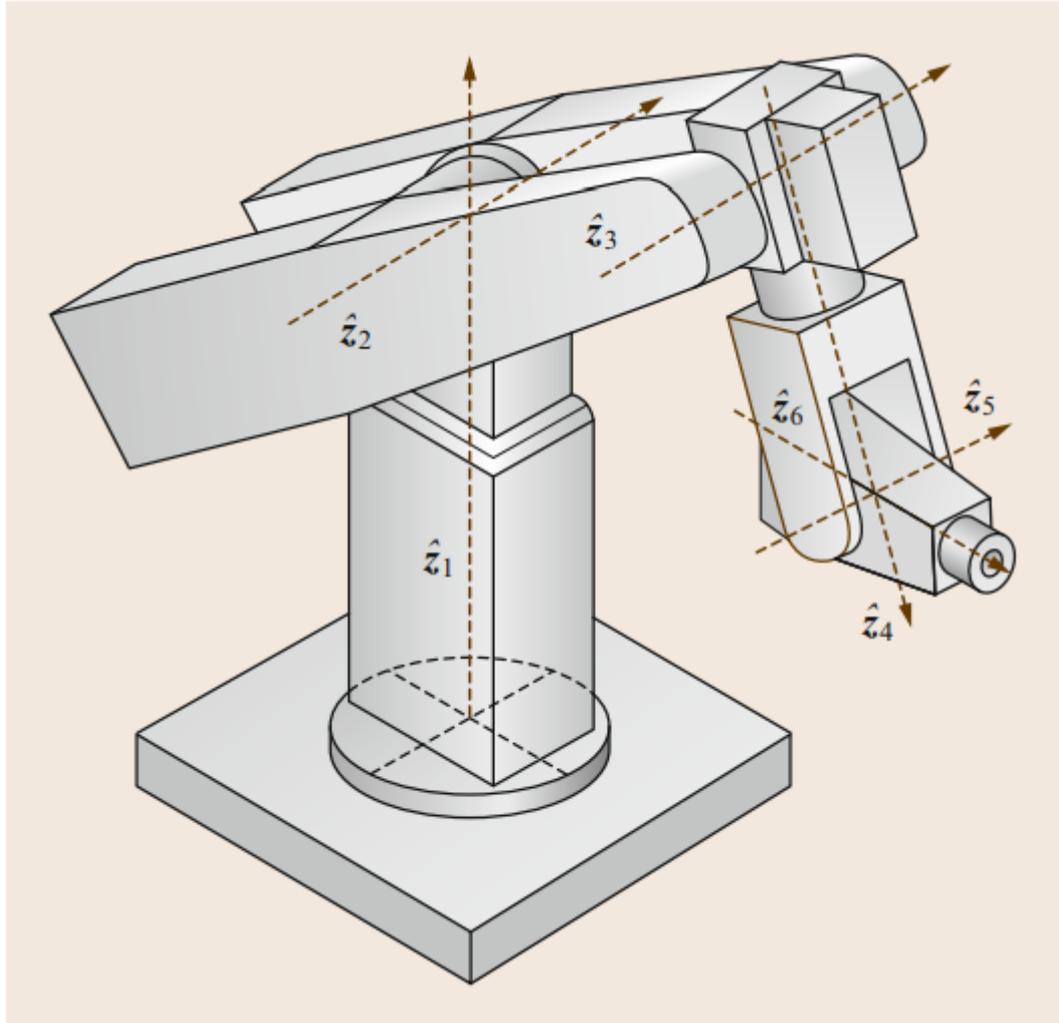
Uma vez obtidos os parâmetros *D-H*, a Cinemática Direta é obtida através da multiplicação das matrizes-rotação (*Rot*) e de matrizes-translação (*Trans*) dos elos do robô. A transformação de quadro $T_{i-1,i}$ de cada elo é descrita conforme as Equações 3.6 e 3.7:

$$T_{i-1,i} = Rot(\hat{x}, \alpha_{i-1})Trans(\hat{x}, a_{i-1})Trans(\hat{z}, d_i)Rot(\hat{z}, \theta_i) \quad (3.6)$$

$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Sendo assim, ao se retomar a Equação 3.5, multiplicam-se as transformações de quadro elo a elo, e no caso de um robô revoluto antropomórfico de 6 *DOF*, conforme ilustrado na Figura 9, e descrito pelos parâmetros *D-H* do quadro 1, pode-se representar a transformação de quadro que descreve a Cinemática Direta do robô através da matriz homogênea T_{06} da Equação (3.8):

Figura 9 - Exemplo de manipulador de seis graus de liberdade em cadeia cinemática serial, composto de um braço articulado sem deslocamento de juntas e um punho esférico.



Fonte: SICILIANO; KHATIB (2016)

Tabela 1 - Parâmetros D-H do manipulador serial da Figura 9.

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	$-\pi/2$	0	0	θ_2
3	0	a_3	0	θ_3
4	$-\pi/2$	0	d_4	θ_4
5	$\pi/2$	0	0	θ_5
6	$-\pi/2$	0	0	θ_6

Fonte: SICILIANO; KHATIB (2016)

$$T_{0,6} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_{0,6,x} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_{0,6,y} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_{0,6,z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

onde, usando as abreviações $c\theta_i$ para $\cos\theta_i$ e $s\theta_i$ para $\sin\theta_i$, pode-se detalhar os elementos de $T_{0,6}$:

$$\mathbf{r}_{11} = c\theta_1(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3)(s\theta_4s\theta_6 - c\theta_4c\theta_5c\theta_6) - c\theta_1s\theta_5c\theta_6(c\theta_2s\theta_3 + s\theta_2c\theta_3) + s\theta_1(s\theta_4c\theta_5c\theta_6 + c\theta_4s\theta_6);$$

$$\mathbf{r}_{21} = s\theta_1(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3)(s\theta_4s\theta_6 - c\theta_4c\theta_5c\theta_6) - s\theta_1s\theta_5c\theta_6(c\theta_2s\theta_3 + s\theta_2c\theta_3) + c\theta_1(s\theta_4c\theta_5c\theta_6 + c\theta_4s\theta_6);$$

$$\mathbf{r}_{31} = (c\theta_2s\theta_3 - s\theta_2c\theta_3)(s\theta_4s\theta_6 - c\theta_4c\theta_5c\theta_6) + s\theta_5c\theta_6(s\theta_2s\theta_3 + c\theta_2c\theta_3);$$

$$\mathbf{r}_{12} = c\theta_1(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3)(s\theta_4c\theta_6 + c\theta_4c\theta_5s\theta_6) + c\theta_1s\theta_5s\theta_6(c\theta_2s\theta_3 + s\theta_2c\theta_3) + s\theta_1(c\theta_4c\theta_6 - s\theta_4c\theta_5s\theta_6);$$

$$\mathbf{r}_{22} = s\theta_1(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3)(s\theta_4c\theta_6 + c\theta_4c\theta_5s\theta_6) + s\theta_1s\theta_5s\theta_6(c\theta_2s\theta_3 + s\theta_2c\theta_3) - c\theta_1(c\theta_4c\theta_6 - s\theta_4c\theta_5s\theta_6);$$

$$\mathbf{r}_{32} = (c\theta_2s\theta_3 + s\theta_2c\theta_3)(s\theta_4c\theta_6 + c\theta_4c\theta_5s\theta_6) - s\theta_5s\theta_6(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3);$$

$$\mathbf{r}_{13} = c\theta_1c\theta_4s\theta_5(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3) - c\theta_1c\theta_5(c\theta_2s\theta_3 + s\theta_2c\theta_3) - s\theta_1s\theta_4s\theta_5;$$

$$\mathbf{r}_{23} = s\theta_1c\theta_4s\theta_5(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3) - s\theta_1c\theta_5(c\theta_2s\theta_3 + s\theta_2c\theta_3) - c\theta_1s\theta_4s\theta_5;$$

$$\mathbf{r}_{33} = c\theta_4s\theta_5(c\theta_2s\theta_3 - s\theta_2c\theta_3) + c\theta_5(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3);$$

$$\mathbf{p}_{0,6,x} = a_3c\theta_1c\theta_2 - d_4c\theta_1(c\theta_2s\theta_3 + s\theta_2c\theta_3);$$

$$\mathbf{p}_{0,6,y} = a_3s\theta_1c\theta_2 - d_4s\theta_1(c\theta_2s\theta_3 + s\theta_2c\theta_3);$$

$$\mathbf{p}_{0,6,z} = a_3s\theta_2 + d_4(s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3).$$

Ao obter-se a matriz homogênea de transformação, percebe-se o conjunto posição ($\mathbf{p}_{0,6,x}, \mathbf{p}_{0,6,y}, \mathbf{p}_{0,6,z}$) e orientação ($\mathbf{r}_{11}, \dots, \mathbf{r}_{33}$) do efetuador final em relação ao quadro de referência da base, ou seja, a matriz homogênea responsável por converter as variáveis das juntas em posição e orientação relativa do efetuador final, sendo assim uma das formas de resolver o problema da Cinemática Direta.

3.1.4.2 Cinemática Inversa

Uma vez obtida a Equação homogênea de transformação para solução do problema da Cinemática Direta, pode-se computar a posição do efetuador-final do

robô em relação ao quadro de referência da base. No entanto, tão importante quanto solucionar a Cinemática Direta é encontrar uma forma de computar a Cinemática Inversa do robô em estudo.

A Cinemática Inversa consiste em, a partir de uma posição-objetivo para o efetuador-final, computar os valores das juntas da cadeia cinemática do robô, necessárias para mover o efetuador final do robô à posição-objetivo, preferencialmente definindo também a sua orientação.

Para tal, considere-se a solução a ser apresentada para um robô antropomórfico revoluto de seis graus de liberdade, de cadeia cinemática aberta, de forma análoga ao apresentado na seção 3.3.1.

Quando se observa a matriz homogênea de transformação, gerada como solução ao problema da Cinemática Direta, percebe-se que se trata de um conjunto de equações lineares, mas que o processo inverso encontra restrições que impedem o mesmo tratamento, ou seja, a Cinemática Inversa se inicia com um sistema de equações não lineares. Tais restrições consistem principalmente na relação das três equações de rotação (orientação) terem componentes dependentes da posição, para que sejam preservadas as relações trigonométricas entre tais elementos. Nesse sentido, é possível que existam múltiplas soluções ao sistema ou ainda nenhuma solução. Para que exista solução à Cinemática Inversa de uma matriz homogênea, a posição e a orientação desejadas para o efetuador-final devem pertencer ao espaço de trabalho do manipulador.

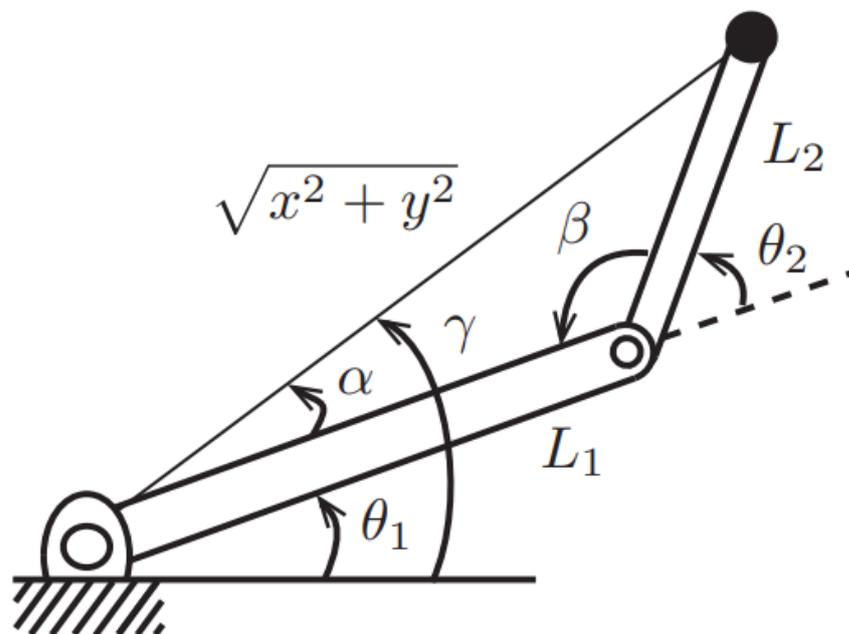
Para cálculo de soluções de Cinemática Inversa do robô manipulador, são conhecidas diversas convenções, divididas em dois grupos de métodos: “Soluções de Forma-Fechada” e “Métodos Numéricos”. Soluções de Forma-Fechada são desejáveis quando se procura um método mais rápido e direto de identificar todas as possíveis soluções. A vantagem dos Métodos Numéricos em detrimento das Soluções de Forma-Fechada consiste em soluções genéricas, independentes das características do robô (LYNCH; PARK, 2017).

A “Solução Geométrica” é um método de Solução de Forma-Fechada que consiste em identificar pontos no manipulador em relação aos quais se possa expressar posição e orientação em função de um conjunto reduzido de variáveis, ou seja, basicamente decompondo o problema em soluções planares separadas.

Sendo assim, vale observar a cinemática inversa de robôs planares e aplicar o método de solução a segmentos do robô não-planar de forma análoga (LYNCH; PARK, 2017).

Considere-se o robô planar de 2 graus de liberdade da Figura 10. Assumindo L_1 e L_2 constantes, representando os comprimentos dos elos do robô, e que $L_1 > L_2$, tem-se a Equação 3.9, que determina as coordenadas x e y em função dos ângulos das juntas θ_1 e θ_2 .

Figura 10 - Solução Geométrica de Cinemática Inversa do robô planar de 2 DOF



Fonte: LYNCH; PARK (2017, p. 220)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Para qualquer posição no espaço de trabalho do robô planar da Figura 10, podem existir uma ou duas soluções, ou seja, até duas configurações de cadeia cinemática que proporcionarão ao robô atingir o ponto no espaço desejado, isso significa que, para qualquer θ_1 , pode haver um θ_2 positivo ou negativo. Isso ocorre em virtude das variáveis trigonométricas no segundo termo da Equação 3.9 assumirem sempre dois resultados possíveis: $L_1 \cos(45^\circ)$ e $L_1 \cos(-45^\circ)$, por exemplo.

Sendo assim, um dos recursos matemáticos utilizados é a Lei dos Cossenos, que, conforme descrita pela Equação 3.10 e ilustrada na Figura 10, é usada para calcular os ângulos θ_1 e θ_2 :

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos(C) \quad (3.10)$$

Sendo C o ângulo oposto ao lado c do triângulo.

Substituindo pelos valores conhecidos, a Lei dos Cossenos pode ser escrita (3.11) por:

$$L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(\beta) = x^2 + y^2 \quad (3.11)$$

$$x^2 + y^2 + L_1^2 - 2L_1\sqrt{x^2 + y^2} \cos(\alpha) = L_2^2 \quad (3.12)$$

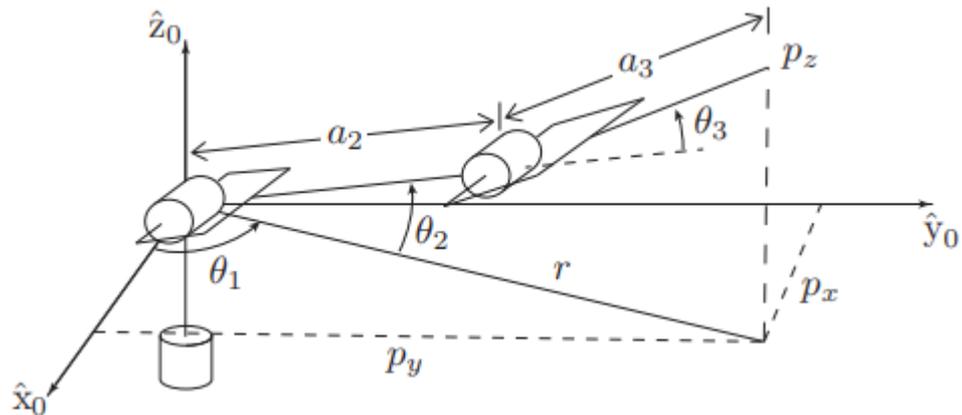
Sendo assim, após obter os valores de β e α , pode-se computar os valores de θ_1 e θ_2 a partir das equações em 3.13 e 3.14:

$$\theta_1 = \gamma \pm \alpha \quad (3.13)$$

$$\theta_2 = \pi - \beta \text{ ou } \theta_2 = \beta - \pi \quad (3.14)$$

Seguindo o raciocínio análogo, deve-se computar a cinemática inversa de um robô articulado antropomórfico com 6 DOF. Nesse caso, as últimas 3 juntas são responsáveis pela orientação da ferramenta, podendo ser estudada como uma única junta esférica, e para tanto, pode-se, analiticamente, computar a cinemática inversa das três primeiras juntas do manipulador, responsáveis pela posição.

Figura 11 - Cinemática Inversa da posição de um robô 6R.



Fonte: LYNCH; PARK (2017, p. 222)

Observe-se na Figura 11 a cadeia cinemática aberta responsável pelo posicionamento do ponto p , também conhecido como centro do punho do robô. O cálculo das projeções do ponto sobre os planos \hat{x}_0 e \hat{y}_0 é ilustrado nas equações 3.15, 3.17 e 3.18:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right). \quad (3.15)$$

O processo de determinar os ângulos θ_2 e θ_3 reduz o problema de cinemática inversa ao de uma cadeia aberta planar de dois elos, onde:

$$\cos\theta_3 = \frac{r^2 - d_1^2 + p_z^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - d_1^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} = D. \quad (3.16)$$

Pode-se então definir θ_3 de forma implícita a partir da definição de D :

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\pm\sqrt{1-D^2}}{D}\right). \quad (3.17)$$

E θ_2 pode ser escrita de forma similar conforme Equação 3.18:

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{p_z}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_1^2}}\right) - \arctan\left(\frac{a_3 \sin\theta_3}{a_2 + a_3 \sin\theta_3}\right). \quad (3.18)$$

Uma vez obtidos os valores das juntas θ_1 , θ_2 e θ_3 , responsáveis pela posição da ferramenta no espaço, deve-se então computar os ângulos θ_4 , θ_5 e θ_6 , ou seja, os valores de orientação da ferramenta sobre os eixos x , y e z do quadro de referência

da base do robô. Os valores de orientação do efetuador final correspondem então exatamente aos ângulos de Euler (Z, Y, X), determinados pela Equação matricial de rotações. A matriz solução R indica a orientação da ferramenta do robô:

$$Rot(\hat{z}, \theta_4)Rot(\hat{y}, \theta_5)Rot(\hat{x}, \theta_6) = R \quad . \quad (3.19)$$

3.1.4.3 Cinemática Diferencial

Quando se deseja realizar o controle de um robô de forma que este cumpra uma trajetória definida, uma solução é computar a cinemática inversa sobre intervalos discretizados de tempo k e então controlar as velocidades das juntas $\dot{\theta}$ durante o intervalo de tempo $[(k-1)\Delta t, k\Delta t]$ (LYNCH; PARK, 2017):

$$\dot{\theta} = \frac{\theta_d(k\Delta t) - \theta((k-1)\Delta t)}{\Delta t} \quad (3.20)$$

Isso equivale a um controlador de *feedback*, uma vez que os ângulos de junta desejados $\theta_d(k\Delta t)$ são comparados com os ângulos de junta reais medidos $\theta((k-1)\Delta t)$. Esse procedimento possibilita calcular as velocidades de junta necessárias.

Ao invés de atribuir pesos iguais às velocidades das juntas, é recorrente analisar a distribuição de massa da estrutura do robô e, conseqüentemente, calcular a energia cinética de um robô utilizando a “matriz de massa”, $M(\theta)$, responsável por atribuir diferentes pesos ao cálculo de movimentos de cada junta.

$$\frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} \quad (3.21)$$

A matriz de massa é uma matriz simétrica, positiva-definida, dependente da configuração do robô, e pode ser usada como uma função de atribuição de peso à cinemática de velocidade inversa do robô, de forma a encontrar o vetor velocidade das juntas $\dot{\theta}$ que minimize a energia cinética.

Uma forma de computar velocidades e forças estáticas de um robô se dá pela utilização de uma entidade matricial chamada de “Jacobiana” do manipulador. A Jacobiana de um robô relaciona a velocidade do efetuador final de um robô com a velocidade de suas juntas. A matriz Jacobiana é formada por componentes relacionados com a geometria do robô e permite relacionar ainda cada movimento descrito no espaço de juntas com qualquer movimento no espaço cartesiano.

A matriz Jacobiana pode ser derivada analiticamente ao se diferenciar as equações de cinemática direta, onde se consideram as variáveis do espaço de juntas. A matriz resultante dessa diferenciação representa a transformação linear das velocidades do efetuador final e pode ser usada para calcular as velocidades e acelerações lineares e angulares da ferramenta instalada na extremidade do manipulador.

Considera-se a matriz Jacobiana uma forma multidimensional de derivada, em que o número de linhas é igual ao número de graus de liberdade do robô no espaço cartesiano e o número de colunas é igual ao número de juntas do manipulador e, sendo o manipulador holonômico, com seis graus de liberdade, espera-se que se obtenha uma Jacobiana de 6×6 (LYNCH; PARK, 2017).

Da Cinemática Direta sabe-se que o efetuador final assume a posição determinada por $T_{0,6}$, que é a matriz de transformação da sexta junta em relação à base do robô. Pode-se representar a posição do efetuador final também como um vetor de valores das juntas onde (CRAIG, 2004):

$$q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6]. \quad (3.22)$$

Da Cinemática Inversa utiliza-se também a notação de vetor de seis variáveis, sendo três para as coordenadas do espaço cartesianos as três restantes para a orientação definida por rotações sobre os três eixos cartesianos (ângulos de Euler). Considere-se então tal vetor conforme descrito pela Equação 3.23.

$$x = [x \quad y \quad z \quad \alpha \quad \beta \quad \gamma]. \quad (3.23)$$

Para obter a matriz Jacobiana de um robô manipulador deve-se considerar uma função tal que $x = f(q)$. Ao derivar os vetores de posição no tempo, tanto no espaço cartesiano quanto no espaço de juntas percebe-se que:

$$\delta x = \frac{\partial f}{\partial q} \delta q \text{ ou } \dot{x} = \frac{\partial f}{\partial q} \dot{q}. \quad (3.24)$$

Sendo assim, $\frac{\partial f}{\partial q}$ é a relação entre deslocamento e configuração do robô, podendo ser compreendida de forma explícita conforme Equação (3.25) (CRAIG, 2004):

$$\frac{\partial f}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x_m}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial x_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

A matriz $m \times n$ da Equação (3.25) é chamada então de “matriz jacobiana” da função f , podendo ser representada também pela notação $J = \frac{\partial f}{\partial q}$. Uma vez que todo o sistema depende da configuração do robô (q), a Jacobiana é uma função de q . Substituindo-se então tais notações na Equação (3.24), obtêm-se:

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (3.26)$$

E ainda:

$$\dot{q} = J(q)^{-1}\dot{x}. \quad (3.27)$$

De posse das equações (3.26) e (3.27) pode-se então obter o deslocamento (velocidade) no espaço cartesiano a partir da variação de configuração do robô e ainda as velocidades das juntas a partir do deslocamento no espaço cartesiano, respectivamente. Tais procedimentos são conhecidos como soluções de Cinemática Diferencial Direta e Inversa, também respectivamente (CRAIG, 2004).

3.1.4.4 Cinemática da Plataforma Satelital

Uma vez que o manipulador robótico em estudo possui uma base flutuante ocupando ambiente orbital da Terra, deve-se reconhecer a unidade robótica também como uma plataforma satelital. Dessa forma, deve-se estudar a cinemática do robô considerando ainda os efeitos dos movimentos sobre a orientação do corpo satelital, conhecida como “atitude”.

A atitude do satélite robótico deve ser estudada em relação a um referencial inercial que, para este estudo, será posicionado sobre o objeto a ser capturado pelo robô, para que o objetivo seja atingido quando a origem do quadro de referência da ferramenta do manipulador e a origem do referencial inercial coincidam.

Ao analisar a cinemática da plataforma satelital considerando-a também uma plataforma robótica, devem-se estabelecer matrizes de transformação de coordenadas entre os elementos do robô e o referencial inercial. Uma vez que tais transformações consistem no produto entre matrizes de rotação de forma não-comutativa, há que se observar o aumento na possibilidade de eventuais singularidades durante diferentes sequências de configuração do robô.

As singularidades ocorrem sempre que a posição cartesiana, composta por três coordenadas (x, y, z) é convertida em seis coordenadas de juntas de um manipulador antropomórfico, por exemplo. Essa conversão reside na solução de um sistema de equações. A singularidade ocorre quando existem infinitas soluções ao sistema, o que, computacionalmente, incorre em comportamentos indesejados do robô. O problema das singularidades aumenta de forma proporcional ao número de graus de liberdade total do robô e, tendo uma base flutuante, adicionam-se mais seis graus de liberdade passivos (3 rotacionais e 3 lineares) (MACDONALD; BADESCU, 2014).

3.1.5 Dinâmica

O estudo da Dinâmica em robôs também se refere a computar os diferentes movimentos e configurações que o robô pode performar, mas, diferentemente da Cinemática, a Dinâmica deve levar em consideração as forças e torques que causam tais movimentos, e sendo assim, as equações da Dinâmica de Robôs são também conhecidas como “equações de movimento”, percebidas como um sistema de equações diferenciais de segunda ordem, conforme ilustra a Equação 3.22(LYNCH; PARK, 2017):

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}). \quad (3.28)$$

Em que θ é o vetor de variáveis das juntas do robô, τ é o vetor de forças e torques incidentes sobre as juntas, $M(\theta)$ é a matriz de massa, e $h(\theta, \dot{\theta})$ representa as forças que reúnem componentes centrípeta, Coriolis e gravidade, que dependem não só das variáveis de juntas, mas também do vetor velocidade de juntas $\dot{\theta}$.

De forma análoga à Cinemática que, no estudo de Robótica, se classifica em Direta e Inversa, costuma-se distinguir também a Dinâmica em problemas de Dinâmica Direta e Dinâmica Inversa. A Dinâmica Direta se desenvolve de modo a determinar o vetor de acelerações das juntas do robô $\ddot{\theta}$ a partir do estado de suas posições e velocidades de juntas $(\theta, \dot{\theta})$ e também dos valores de forças e torques nas juntas do robô. O problema de Dinâmica Inversa se traduz em calcular as forças e torques sobre as juntas do robô, dados o mesmo estado $(\theta, \dot{\theta})$ e seu vetor de acelerações $\ddot{\theta}$ (Equação 3.28).

As equações dinâmicas de robôs são normalmente desenvolvidas de duas formas: equações dinâmicas de Newton-Euler, ao aplicar equações dinâmicas de corpos rígidos, ou pela formulação dinâmica de Lagrange, derivada a partir das energias cinética e potencial do robô. Usar a formulação Lagrangeana costuma ser aconselhado para robô mais simples, com no máximo três graus de liberdade, tornando o processo de cálculo demasiadamente trabalhoso em comparação com o método de Newton-Euler. Já, para robôs de cadeia cinemática aberta em geral, convém o uso do método Newton-Euler também por levar a algoritmos recursivos úteis ao uso de soluções por expressões analíticas de forma-fechada (CRAIG, 2004).

3.1.5.1 Formulação de Newton-Euler

Deve-se desenvolver a formulação Newton-Euler a partir da ideia de que um corpo rígido é, na verdade, um grupo de pontos rígidos conectados, onde um ponto i tem massa m_i e a massa total do corpo é dada por $m = \sum_i m_i$. Seja $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ a localização da massa i no quadro de referência $\{b\}$ de um corpo, em que a origem do quadro é um único ponto, tal qual descrito pela Equação (3.29) (LYNCH; PARK, 2017):

$$\sum_i m_i r_i = 0. \quad (3.29)$$

O ponto único que obedece à Equação (3.29) é o centro de massa do corpo analisado.

Pode-se também deduzir as equações de velocidade e aceleração do centro de massa. Sendo assim, considere-se $p_i(t)$ a posição de m_i variante no tempo, inicialmente localizado em r_i , no quadro inercial $\{b\}$. Logo, as Equações (3.30) e (3.31) descrevem, respectivamente, as equações da velocidade \dot{p}_i e da aceleração \ddot{p}_i :

$$\dot{p}_i = v_b + \omega_b \times p_i, \quad (3.30)$$

$$\ddot{p}_i = \dot{v}_b + \dot{\omega}_b \times p_i + \omega_b \times (v_b + \omega_b \times p_i). \quad (3.31)$$

Uma vez que \ddot{p}_i representa a aceleração do centro de massa, pode-se escrever a Equação da força f_i , incidente sobre o ponto i conforme a Equação (3.32):

$$f_i = m_i \ddot{p}_i = m_i (\dot{v}_b + \dot{\omega}_b \times p_i + \omega_b \times (v_b + \omega_b \times p_i)) = m_i (\dot{v}_b + [\dot{\omega}_b] r_i + [\omega_b] v_b + [\omega_b]^2 r_i). \quad (3.32)$$

Sendo assim, pode-se deduzir a Equação (3.33), do momento M_i incidido sobre o centro de massa, também em sua forma matricial:

$$M_i = [r_i] f_i. \quad (3.33)$$

Segmentando então a dinâmica do centro de massa em relação ao um referencial inercial posicionado na base do robô, são obtidas as equações (3.34) para análise da dinâmica linear e (3.35) sobre a dinâmica rotacional, onde I_b se refere à matriz de inércia rotacional, surgida da Equação de Euler para um corpo rígido em rotação:

$$f_b = m(\dot{v}_b + [\omega_b] v_b), \quad (3.34)$$

$$M_b = I_b \dot{\omega}_b + [\omega_b] I_b \omega_b. \quad (3.35)$$

Uma vez que a matriz de inércia I_b é simétrica, positiva e constante, pode-se escrever tal matriz através da Equação (3.36):

$$I_b = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}, \quad (3.36)$$

Onde:

$$I_{xx} = \int_B (y^2 + z^2) \rho(x, y, z) dV;$$

$$I_{yy} = \int_B (x^2 + z^2) \rho(x, y, z) dV;$$

$$I_{zz} = \int_B (x^2 + y^2) \rho(x, y, z) dV;$$

$$I_{xy} = - \int_B xy \rho(x, y, z) dV;$$

$$I_{xz} = - \int_B xz \rho(x, y, z) dV;$$

$$I_{yz} = - \int_B yz \rho(x, y, z) dV.$$

Em que cada elemento é representado pelas integrais dos volumes ao longo do corpo B , e a função densidade $\rho(x, y, z)$.

A partir da formulação de Newton-Euler (também conhecida como “algoritmo iterativo de Newton-Euler”), computam-se os torques do manipulador em movimento, ao longo de sua trajetória e, para tanto, consideram-se dois estágios de cálculos de velocidade, aceleração, forças e torques: “para fora”, em que tais grandezas atuam no centro de massa de cada elo, da base para o último elo da cadeia; e “para dentro”, em que as mesmas grandezas são computadas a partir do último elo até o primeiro elo (base do robô) (LYNCH; PARK, 2017).

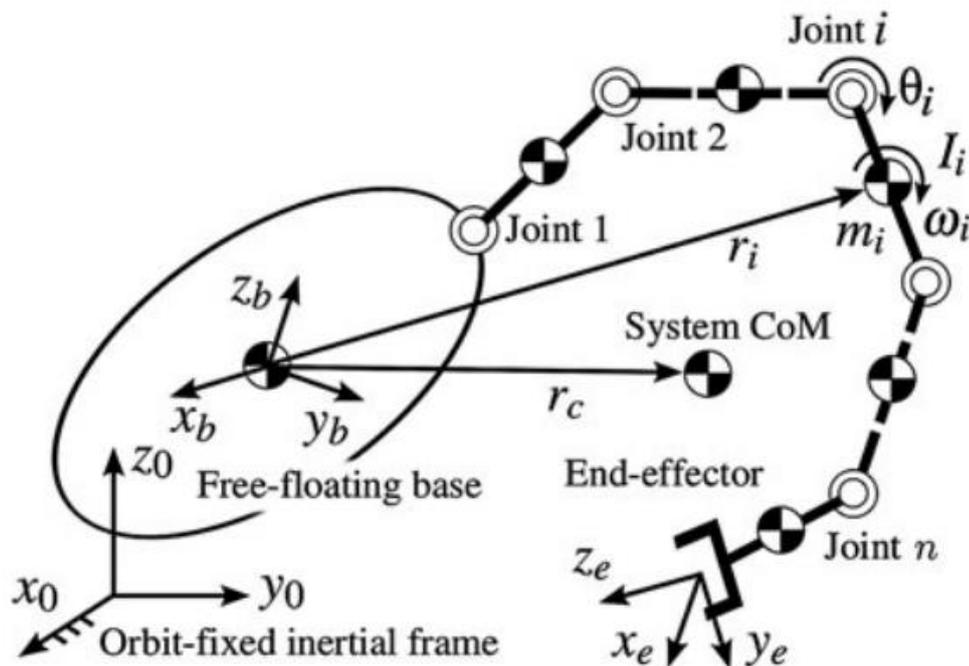
3.1.5.2 Dinâmica da Plataforma Satelital

O estudo da dinâmica de um robô de base flutuante, como é o caso de um robô-satélite, requer atenção sobre os efeitos dos torques e momentos angulares das juntas do manipulador sobre a atitude. Deve-se observar que, cada torque, diferentemente dos robôs manipuladores de base fixa, resulta em acelerações ao

longo dos dois elos conectados por cada junta, que se propagam não só até o efetuador-final, mas também até a base, ou seja, o torque gerado por uma junta move tanto a ferramenta acoplada ao robô quanto a base flutuante da plataforma robótica. Nesse sentido, entende-se que a posição do efetuador-final de um manipulador instalado em uma plataforma satelital de flutuação livre não Figura mais como função dos ângulos das juntas em cada combinação estudada, mas uma função que inclui todo o histórico de movimentos executados pelo robô e, por isso, utilizam-se termos como “Cinética Direta” e “Cinética Inversa”.

Observe-se então a Figura 12, em que se ilustra a relação dos quadros de referência da base flutuante do robô $\{b\}$ e do efetuador-final $\{e\}$ com o quadro de referência inercial fixo $\{0\}$, além da visualização dos centros de massa de cada elo m_i (MACDONALD; BADESCU, 2014).

Figura 12 - Modelo de robô em espaço orbital de livre-flutuação



Fonte: MACDONALD; BADESCU (2014, p. 550)

Considerando que o robô é constituído de elos rígidos conectados por juntas com grau de liberdade único (com movimento em apenas uma direção), e que as variáveis de juntas são representadas por $\theta \in R^n$, pode-se escrever então a Equação do movimento para um robô de flutuação-livre formado por um manipulador serial

instalado sobre uma base satelital na forma da Equação (3.37) (MACDONALD; BADESCU, 2014):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_{bm} \\ \mathbf{M}_{bm}^T & \mathbf{M}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_b \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^bT_e^T \\ J_m^T \end{bmatrix} F_e. \quad (3.37)$$

Entenda-se a partir da Equação 3.31 que os caracteres maiúsculos em negrito se referem a termos matriciais, os minúsculos por vetores e os caracteres maiúsculos sem formatação diferencial representam forças “espaciais”, no sentido de se propagarem em múltiplas direções no espaço tridimensional, ou seja, que possuem componentes nos eixos \hat{x} , \hat{y} e \hat{z} .

Entende-se então que tal Equação se descreve por pelo menos três referenciais diferentes, e por isso, considera-se a dinâmica do sistema como um todo, nomeado neste trabalho como “corpo articulado”. Vale considerar também a dinâmica do manipulador em relação à referência da própria base, que ocorre de forma similar à de manipuladores de base fixa.

As matrizes representadas por \mathbf{M} se referem às matrizes de inércia: dos elos do manipulador em relação à base \mathbf{M}_m ; do corpo articulado \mathbf{M}_b ; e do acoplamento entre a base e os demais elos do manipulador \mathbf{M}_{bm} , resultante do deslocamento relativo do centro de massa do manipulador para o centro de massa da plataforma satelital. A variável vetorial c_m se refere às forças centrífuga e de Coriolis do manipulador em relação à base, enquanto C_b representa as mesmas forças, mas incidentes sobre o corpo do sistema articulado do manipulador. O vetor τ continua se referindo aos torques de cada junta do manipulador e V_b é a velocidade da base no espaço tridimensional. As forças atuantes no espaço tridimensional sobre a base e o elo do efetuador-final são, respectivamente, F_b e F_e . Finalmente, bT_e se refere à matriz de transformação de coordenadas no espaço tridimensional e J_m é a matriz jacobiana do manipulador em relação à base (MACDONALD; BADESCU, 2014).

Os momentos linear e angular de um robô de flutuação livre compõem um vetor de momento espacial tridimensional, sendo o momento angular descrito em relação ao centro de massa do corpo articulado. Sendo assim, obtém-se o vetor momento espacial descrito pela Equação (3.38):

$$L_c \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{l}_c \end{bmatrix} = \mathbf{M}_c V_c. \quad (3.38)$$

Na Equação 3.32, observe-se que o elemento linear do momento é representado por \mathbf{p} e o elemento angular é \mathbf{l}_c . As equações (3.39) e (3.40), por sua vez descrevem os elementos \mathbf{p} e \mathbf{l}_c . Considere-se então \mathbf{I}_i , m_i , \mathbf{r}_i e ω_i : matriz de inércia, massa, posição do centro de massa e velocidade angular do centro de massa do i -ésimo elo, respectivamente.

$$\mathbf{p} = \sum_{i=0}^n m_i \dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{m}_t \dot{\mathbf{r}}_c, \quad (3.39)$$

$$\mathbf{l}_c = \sum_{i=0}^n \mathbf{I}_i \omega_i + m_i \mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{r}}_i. \quad (3.40)$$

Observem-se ainda os termos \mathbf{m}_t , \mathbf{r}_c e V_c , representantes da massa do sistema do corpo articulado, posição e velocidade espacial do centro de massa, respectivamente.

Para um manipulador robótico cuja base não é atuada, ou seja, se move apenas passivamente, e no caso de não haverem forças externas atuando no elo final, a Equação dinâmica do corpo articulado (3.41), relacionada à Equação do movimento (3.37), pode ser integrada (3.42) e, seus dois componentes do primeiro membro da nova Equação desempenham papel importante no controle e planejamento de trajetórias do manipulador, uma vez que $\mathbf{M}_b V_b$ se refere ao momento do corpo articulado devido ao movimento da base e $\mathbf{M}_{bm} \dot{\theta}$ é chamado de momento de acoplamento, devido ao movimento do manipulador, também podendo ser representado por L_{bm} .

$$\mathbf{M}_b \dot{V}_b + \mathbf{M}_{bm} \ddot{\theta} + C_b = F_{qs}, \quad (3.41)$$

$$\mathbf{M}_b V_b + \mathbf{M}_{bm} \dot{\theta} = L_b^-. \quad (3.42)$$

O componente F_{qs} nada representa além do conjunto de forças espaciais semi-estáticas e é obtido por $F_{qs} = F_b + \mathbf{T}_{eb}^T F_e$. O elemento L_b^- na Equação (3.42) representa a constante de integração obtida.

O movimento resultante da base flutuante do manipulador robótico em decorrência dos movimentos das juntas acaba sofrendo então a ação de uma “força

imposta" F_{bm} , podendo ser calculada a partir do momento de acoplamento $\mathbf{M}_{bm}\dot{\theta}$ conforme Equação (3.43) ou (3.44), adaptada para a forma da Mecânica Newtoniana, partindo do pressuposto $C_b \approx \dot{\mathbf{M}}_{bm}\dot{\theta}$:

$$F_{bm} \equiv \mathbf{M}_{bm}\ddot{\theta} + \dot{\mathbf{M}}_{bm}\dot{\theta}, \quad (3.43)$$

$$\mathbf{M}_b\dot{V}_b = -F_{bm}. \quad (3.44)$$

A lei de conservação de momento impera sobre robôs de flutuação livre no espaço e, em respeito a isso, manipuladores espaciais são um caso particular em que a dinâmica do robô é simplificada e a velocidade desempenha uma função predominante e, em compensação, uma vez que a base do robô não é atuada, as relações de inércia interferem em tais relações de forma particular. Nesse sentido, estudam-se dois modelos convenientes de velocidade: Manipulador Virtual e Jacobiana Generalizada. Neste trabalho desenvolve-se o estudo do robô através da Jacobiana Generalizada, uma vez que a formulação do sistema de controle de trajetória do manipulador será desenvolvida com base em Jacobiana Generalizada.

A conservação de momento espacial, conforme descrita pela Equação (3.42) pode ser entendida como uma restrição com relação ao movimento do manipulador. A partir da Equação (3.42) pode-se deduzir a Equação (3.45), que descreve a velocidade da base do robô:

$$V_b = V_b^- - \mathbf{M}_b^{-1}\mathbf{M}_{bm}\dot{\theta}. \quad (3.45)$$

Uma vez que $V_b^- = \mathbf{M}_b^{-1}L_b^-$ é obtido a partir do momento espacial inicial e o segundo componente se refere ao momento de acoplamento, induzido pelo movimento do manipulador, a velocidade do efetuador final do manipulador é descrita pela Equação (3.46):

$$V_e = V_e^- + \hat{\mathbf{J}}\dot{\theta}, \quad (3.46)$$

onde

$$V_e^- = \mathbf{T}_{eb}V_b^-. \quad (3.47)$$

E a matriz $\hat{\mathbf{J}}$:

$$\hat{\mathbf{J}} \equiv \mathbf{J}_m - \mathbf{T}_{eb} \mathbf{M}_b^{-1} \mathbf{M}_{bm}, \quad (3.48)$$

é a “Jacobiana Generalizada”.

Controle baseado em velocidade é um recurso utilizado para tele operação de robôs, no entanto, para o caso de operação autônoma da plataforma robótica, pode-se recorrer a um recurso semelhante, chamado de “Rastreamento de Trajetória Baseado na Velocidade do Elo Final”.

A trajetória do elo final de um robô pode ser planejada para diversas finalidades, como evitar colisão entre diferentes partes do robô, por exemplo. Sendo assim, o controle por retroalimentação atua por coordenadas do espaço de trabalho do robô, baseado na Jacobiana inversa do manipulador.

Robôs orbitais devem ser controlados por tais recursos, considerando referenciais inerciais e levando em conta o efeito das forças de reação sobre a base não-atuada do robô. A Equação de controle por retroalimentação pode ser escrita usando a formulação de Jacobiana Generalizada. As velocidades das juntas, que servem de valores de entrada do controle são expressas por $\dot{\theta}$ na Equação (3.49):

$$\dot{\theta} = \hat{\mathbf{J}}^{-1} (\mathbf{K}_p (\mathcal{X}_e^d - \mathcal{X}_e) + \mathbf{V}_e^d), \quad (3.49)$$

onde \mathcal{X}_e^d e \mathbf{V}_e^d são a posição e velocidade espaciais desejadas, respectivamente, através da trajetória inercial dada e \mathbf{K}_p representa a matriz de ganho para a retroalimentação do controle. A posição real do elo final \mathcal{X}_e é obtida ao somar dois componentes: a posição inercial da base, obtida a partir de medições realizadas e a posição do elo final em relação à base, obtida a partir das relações de cinemática direta para robôs de base fixa (MACDONALD; BADESCU, 2014).

3.1.6 Controle Baseado em Visão

Uma vez que robôs flutuantes em cenário orbital estão sujeitos à ação de características particulares de influências como a do vácuo e campo magnético da Terra, além da ausência de recursos como tecnologias de geolocalização e de redes terrestres de telecomunicações, missões espaciais envolvendo tais robôs precisam se

basear em um arcabouço reduzido de grandezas físicas e infraestrutura disponível para cumprir tarefas como navegação e rastreamento de trajetória.

No entanto, uma das técnicas disponíveis tanto em cenários da superfície quanto da órbita planetária é o de usar Visão Computacional a favor de tais tarefas de navegação, rastreamento e, de forma geral, de controle. A técnica de controle de servomecanismos baseada em visão computacional é nomeada “Servocontrole Visual”, em tradução adaptada (*Visual Servoing*).

O Servocontrole Visual se manifesta pelo uso de dados de visão do computador para controlar o movimento de um robô. Esse movimento pode induzir um movimento conjunto da câmera observadora ou pode significar que a câmera, ou conjunto de câmeras pode ser instalado em um local fixo do espaço de trabalho, de modo a acompanhar o movimento do robô e assim retroalimentar o sistema de controle.

O desenvolvimento matemático do Servocontrole Visual depende de técnicas de processamento de imagem, visão computacional e teoria de controle. Neste trabalho é apresentado o estudo do caso de um robô manipulador de base flutuante dotado de câmera alocada no elo final, ou seja, uma câmera cujo deslocamento seja condicionado à variação de posição do efetuador final (SICILIANO; KHATIB, 2016).

3.1.6.1 Componentes Básicos do Servocontrole Visual

Pode-se considerar que o objetivo de sistemas de controle baseados em visão é o de minimizar o sinal de erro $e(t)$, definido pela Equação (3.50):

$$e(t) = s(\mathbf{m}(t), \mathbf{a}) - \mathbf{s}^*. \quad (3.50)$$

O vetor $\mathbf{m}(t)$ representa o conjunto de medições realizadas em imagens obtidas, como: coordenadas de pontos de interesse, por exemplo. Essas medições em imagens são usadas para computar o vetor $s(\mathbf{m}(t), \mathbf{a})$ de k recursos visuais, onde \mathbf{a} é o vetor de parâmetros que representa um conhecimento adicional em potencial sobre o sistema, como parâmetros intrínsecos da câmera ou um modelo do objeto a ser rastreado. O vetor \mathbf{s}^* é composto pelos valores desejados de tais recursos.

Das diferentes técnicas de Servocontrole Visual, como a baseada em imagem (*Image-Based Visual Servocontrol – IBVS*) ou a baseada em pose do robô (*Pose-*

Based Visual Servocontrol – PBVS), devem-se estabelecer inicialmente os parâmetros que definem s para que seja desenvolvido o controlador. Comumente, o controlador desenvolvido é baseado em velocidade, dependendo das variações de s e da velocidade da câmera no tempo, onde a velocidade espacial da câmera pode ser denotada pela Equação (3.51):

$$\boldsymbol{v}_c = (\boldsymbol{v}_c, \boldsymbol{\omega}_c) \quad , \quad (3.51)$$

em que \boldsymbol{v}_c é a velocidade instantânea da origem do quadro de referência da câmera e $\boldsymbol{\omega}_c$ é a velocidade angular instantânea do quadro de referência da câmera. A relação entre \dot{s} e \boldsymbol{v}_c é dada pela Equação (3.52):

$$\dot{s} = \boldsymbol{L}_s \boldsymbol{v}_c, \quad (3.52)$$

sendo $\boldsymbol{L}_s \in \mathcal{R}^{k \times 6}$ conhecido como “matriz de interação” relativa a s .

A partir das Equações (3.51) e (3.52) se obtém a Equação (3.53), cujos elementos são descritos pelas Equações (3.54) e (3.55) a saber:

$$\dot{\boldsymbol{e}} = \boldsymbol{L}_e \boldsymbol{v}_c, \quad (3.53)$$

onde:

$$\boldsymbol{v}_c = -\lambda \boldsymbol{L}_e^+ \boldsymbol{e}, \quad (3.54)$$

$$\boldsymbol{L}_e^+ = \boldsymbol{L}_e^T (\boldsymbol{L}_e \boldsymbol{L}_e^T)^{-1}. \quad (3.55)$$

Na prática, ao trabalhar com sistemas de servo controle visual, é impossível saber perfeitamente os valores de \boldsymbol{L}_e e \boldsymbol{L}_e^+ , sendo assim, convencionou-se a representação de ambos pelo símbolo $\widehat{\boldsymbol{L}}_e^+$ como sendo a aproximação da matriz de interação pseudo-inversa.

Para aplicação das técnicas de servo controle visual e utilização das equações (3.50) a (3.55) descritas, determinar métodos de obtenção de elementos tais como o vetor de recursos visuais s , a forma da matriz \boldsymbol{L}_s , como estimar o valor de $\widehat{\boldsymbol{L}}_e^+$, etc.

3.1.6.2 Servocontrole Visual Baseado em Imagem

Tradicionalmente, esquemas de controle baseados em imagem usam as coordenadas normalizadas do plano da imagem formadas por um conjunto de pontos para determinar o vetor s . as medidas da imagem m são geralmente as coordenadas dos pixels do conjunto de pontos da imagem. O parâmetro a , na Equação (3.50) é determinado pelos parâmetros intrínsecos da câmera.

Considere-se um ponto no mundo tridimensional com coordenadas $X = (X, Y, Z)$. Tal ponto é projetado no plano de imagem pela perspectiva da câmera sendo formado por coordenadas $x = (x, y)$. Sendo assim, a relação entre as coordenadas X e x pode ser descrita pelo sistema de equações (3.56) (SICILIANO; KHATIB, 2016):

$$\begin{cases} x = \frac{X}{Z} = \frac{u - c_u}{f\alpha}, \\ y = \frac{Y}{Z} = \frac{v - c_v}{f}. \end{cases} \quad (3.56)$$

Observe-se na Equação 3.50 que o elemento m é desmembrado em seus componentes, as coordenadas $m = (u, v)$, e $a = (c_u, c_v, f, \alpha)$ representa o conjunto de parâmetros intrínsecos à câmera, onde c_u e c_v são as coordenadas do ponto principal, f é a distância focal, e α é a relação dimensional entre altura e largura de cada pixel da imagem (1:1 ou 2:1, por exemplo). Na Equação (3.56) é considerado ainda que $s = x = (x, y)$ se refere às coordenadas do ponto no plano da imagem.

Ao relacionar a velocidade do ponto no espaço tridimensional com sua correspondente velocidade no plano da imagem, pode-se obter ainda a Equação (3.57) (SICILIANO; KHATIB, 2016):

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{-v_x}{Z} + \frac{xv_z}{Z} + xy\omega_x - (1 + x^2)\omega_y + y\omega_z, \\ \dot{y} = \frac{v_y}{Z} + \frac{yv_z}{Z} + (1 + y^2)\omega_x - xy\omega_y - x\omega_z. \end{cases} \quad (3.57)$$

Os elementos da Equação 3.51 são tais que: \dot{x} e \dot{y} são as variações de posição (x, y) em função do tempo, $v_c = (v_x, v_y, v_z)$ e $\omega_c = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ são as velocidades espaciais e angulares do ponto sob a perspectiva da câmera.

A Equação (3.57), pode ser facilmente escrita na forma da Equação (3.58), uma vez que correlaciona a matriz de interação L_x com a velocidade espacial do ponto em relação à câmera v_c .

$$\dot{x} = L_x v_c. \quad (3.58)$$

A matriz de interação L_x pode ser descrita conforme Equação (3.59), onde Z representa a profundidade do ponto em relação ao quadro da câmera. De qualquer forma, qualquer esquema de controle que use de tal modelo de matriz de interação deve estimar ou aproximar o valor de Z .

$$L_x = \begin{pmatrix} \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & \frac{-1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -xy & -x \end{pmatrix}. \quad (3.59)$$

Para o controle de seis graus de liberdade, deve-se considerar o uso de pelo menos três pontos e, ao usar o vetor $x = (x_1, x_2, x_3)$, por reunir as matrizes de interação para cada ponto, pode-se escrever a Equação (3.60):

$$L_x = \begin{pmatrix} L_{x1} \\ L_{x2} \\ L_{x3} \end{pmatrix}. \quad (3.60)$$

Para o referido L_x podem existir algumas configurações do robô suscetíveis a singularidades e, para contrapor tal problema, convém a utilização de um ou mais pontos adicionais que restrinjam o conjunto de soluções de cinemática inversa do robô.

O processo de aproximação da matriz de interação, voltado a reduzir erros de projeção do ponto tridimensional capturado por uma câmera, encontra duas abordagens possíveis. A primeira surge da conveniência de se igualar os valores da matriz de interação do erro de posição estimado e real, caso seja possível medir a posição real do ponto ($\widehat{L}_e^+ = L_e^+$).

A segunda abordagem advém da igualdade $\widehat{L}_e^+ = L_{e^*}^+$, em que L_{e^*} é o valor de L_e desejado para a posição desejada, quando $e = e^* = 0$. Nesse caso, \widehat{L}_e^+ é constante, e apenas a profundidade de cada ponto deve ser ajustada. Sendo assim, a partir das duas abordagens, convencionou-se a escolha de um cálculo, descrito pela Equação (3.61), que utilize dos recursos das duas abordagens ao mesmo tempo (SICILIANO; KHATIB, 2016):

$$\widehat{L}_e^+ = \left(\frac{L_e}{2} + \frac{L_{e^*}}{2} \right)^+ \quad (3.61)$$

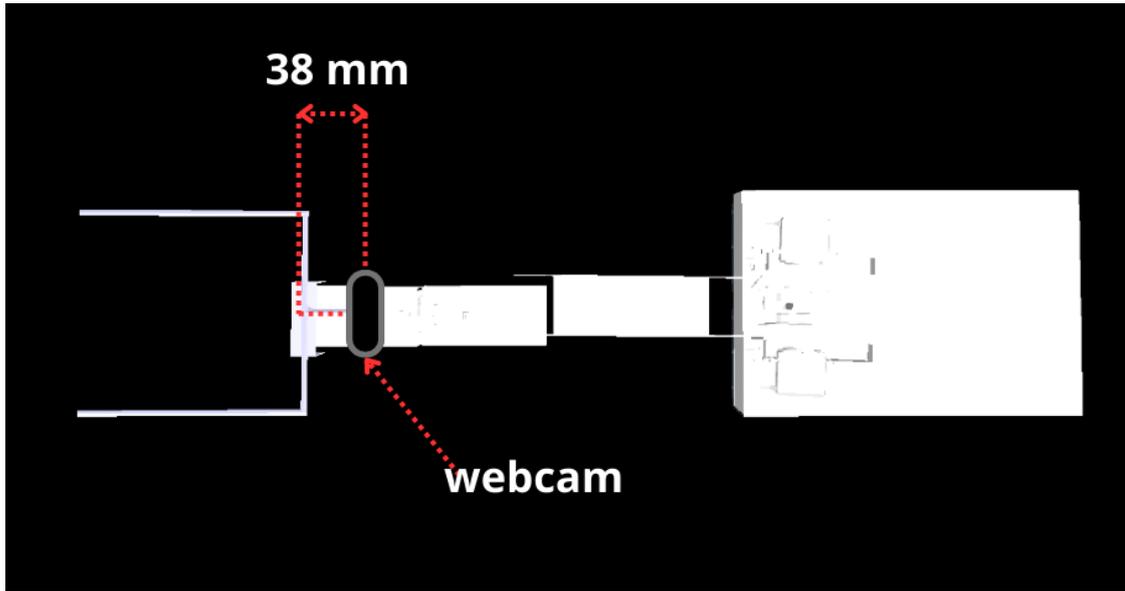
O efetuador final foi modelado para instalação de uma rede de contenção flexível, de forma a possibilitar a captura do objeto. O sistema é controlado por *hardware* composto por um computador de bordo *Raspberry Pi* modelo 3B, com 1GB de *RAM* e processador *quadcore* de 1,2 GHz conectado a uma câmera modelo “Logitech c930e”, com 90° de abertura e 94 mm de distância focal. A câmera foi posicionada a 38 mm do eixo da junta J6, visível na Figura 14, a fim de aumentar o campo de visão da câmera na direção da ferramenta de captura. A alimentação do robô é feita por conjunto de baterias modelo 18650 de Lítio conectado a um circuito regulador de tensão para alimentação tanto do computador quanto dos motores. Dessa forma, o controle do robô é feito de forma autônoma e com tecnologia totalmente embarcada.

Os aspectos estruturais do robô foram definidos para construção utilizando chapas de alumínio de 1,5 mm de espessura, de forma simular ao que é usado na fabricação de *CubeSats*. A escolha do padrão *CubeSat* foi feita visando o aproveitamento da infraestrutura utilizada para lançamento de *CubeSats*. Perceba-se que as estruturas laterais foram projetadas para instalação de painéis solares para manutenção da carga das baterias a bordo do robô.

A modelagem estrutural do PROCaN foi realizada utilizando o programa “CAD” “*Solid Edge*” (*Computer Aided Design* – Desenho Assistido por Computador). A simulação do robô no ambiente de microgravidade foi realizada no programa “CoppeliaSim Edu” aproveitando os arquivos 3D de modelagem do robô criado no programa CAD.

O recurso de software responsável pela identificação do *CubeSat* na imagem capturada pela câmera foi a plataforma “YOLO” (*You Only Look Once*) que, a partir de um modelo de rede neural, criada por *Machine Learning*, detecta e localiza o objeto desejado no quadro da imagem de uma câmera ou arquivo de imagem ou vídeo. A partir de então, pôde-se, por geometria espacial simples, determinar a distância do *CubeSat* em função de seu tamanho aparente exibido no quadro do vídeo.

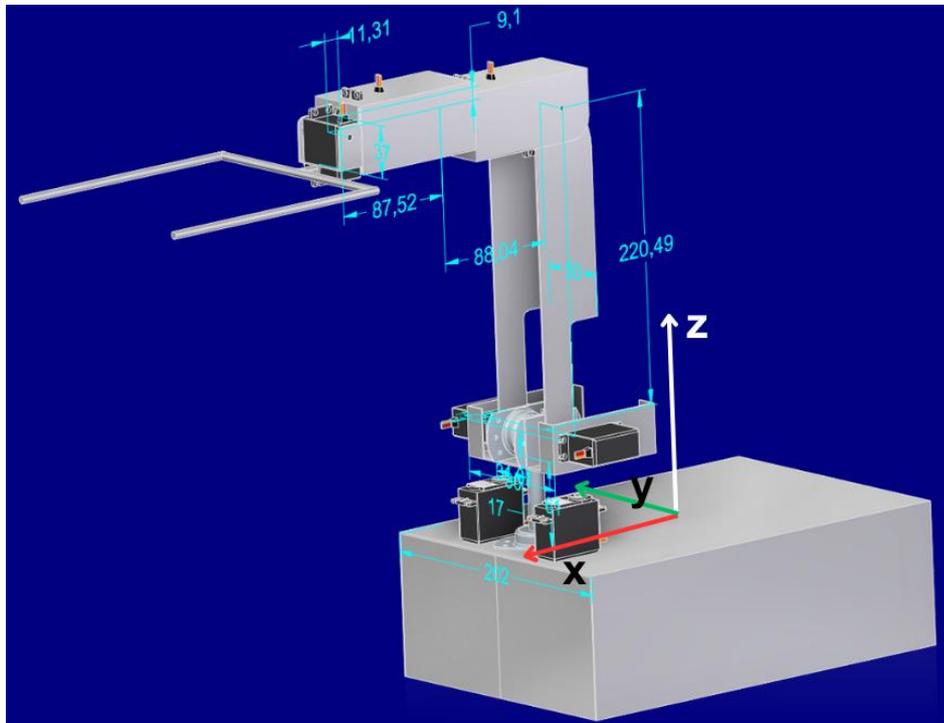
Figura 14 - Vista superior do robô PROCaN completamente estendido.



Fonte: O Autor (2023)

A modelagem dinâmica do robô orbital objeto deste trabalho toma por base os elementos de *hardware* e estruturais comumente utilizados em projetos de prototipação de *CubeSats* e robô universitários. Sendo assim, pôde-se atribuir os valores constantes na Tabela 3 com os parâmetros estruturais do robô (Figura 15):

Figura 15 - Cotas notáveis dos elos do manipulador robótico



Fonte: O Autor (2023)

Tabela 2 - Parâmetros estruturais do robô.

Elo	m (kg)	L (m)
Base	0,942	0,116
L1	0,33	0
L2	0,201	0,230
L3	0,279	0,082
L4	0,222	0,09
L5	0,099	0,044
Efetuator Final	0,150	0,072

Fonte: O Autor (2023)

Convencionam-se, o “Ponto Central da Ferramenta” (TCP – *Tool Center Point*) como o ponto central da estrutura da rede de contenção, tendo em vista que o satélite-alvo deve transpassar o TCP ao final da tarefa de captura.

4.2 CINEMÁTICA DIRETA

Naturalmente, a partir dos valores geométricos estruturais, pode-se desenvolver o cálculo da cinemática direta do manipulador espacial. Para tanto, adota-se a notação de Denavit-Hartenberg como ponto de partida, a ser computada conforme a Tabela 4:

Tabela 3 - Parâmetros de Denavit-Hartenberg do robô.

Junta	d (m)	θ	a (m)	α
Base a J1	0	Q1	0,1160	0°
J1 a J2	0,0294	Q2	0	90°
J2 a J3	0	Q3	0,2300	180°
J3 a J4	-0,0048	Q4	0,1721	90°
J4 a J5	0	Q5	0,0205	-90°
J5 a J6	0	Q6	-0,0019	90°
J6 ao EF	0	0°	0,0884	0°

Fonte: O Autor (2023)

A partir dos parâmetros D-H pode-se obter a matriz homogênea de transformação:

$$T_{0,6} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_{0,6,x} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_{0,6,y} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_{0,6,z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

em que:

$$\mathbf{r}_{11} = -(\sin(\theta_3)\cos(\theta_5) + \sin(\theta_4)\sin(\theta_5)\cos(\theta_3))\sin(\theta_0) -$$

$$(-\sin(\theta_3)\sin(\theta_4)\sin(\theta_5)\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(\theta_5)\cos(\theta_4)\cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_3)\cos(\theta_5))\cos(\theta_0);$$

$$\mathbf{r}_{21} = (\sin(\theta_3)\cos(\theta_5) + \sin(\theta_4)\sin(\theta_5)\cos(\theta_3))\cos(\theta_0) -$$

$$(-\sin(\theta_3)\sin(\theta_4)\sin(\theta_5)\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(\theta_5)\cos(\theta_4)\cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_3)\cos(\theta_5))\sin(\theta_0);$$

$$\mathbf{r}_{31} = -\sin(\theta_3)\sin(\theta_4)\sin(\theta_5)\cos(\theta_1 + \theta_2) - \sin(\theta_5)\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_4) + \cos(\theta_3)\cos(\theta_5)\cos(\theta_1 + \theta_2);$$

$$\mathbf{r}_{12} = (\sin(\theta_3)\sin(\theta_5) - \sin(\theta_4)\cos(\theta_3)\cos(\theta_5))\sin(\theta_0) - (-\sin(\theta_3)\sin(\theta_4)\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_5) - \sin(\theta_5)\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_3) + \cos(\theta_4)\cos(\theta_5)\cos(\theta_1 + \theta_2))\cos(\theta_0);$$

$$\mathbf{r}_{22} = -(\sin(\theta_3)\sin(\theta_5) - \sin(\theta_4)\cos(\theta_3)\cos(\theta_5))\cos(\theta_0) - (-\sin(\theta_3)\sin(\theta_4)\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_5) - \sin(\theta_5)\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_3) + \cos(\theta_4)\cos(\theta_5)\cos(\theta_1 + \theta_2))\sin(\theta_0);$$

$$\mathbf{r}_{32} = -\sin(\theta_3)\sin(\theta_4)\cos(\theta_5)\cos(\theta_1 + \theta_2) - \sin(\theta_5)\cos(\theta_3)\cos(\theta_1 + \theta_2) - \sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_4)\cos(\theta_5);$$

$$\mathbf{r}_{13} = -(\sin(\theta_3)\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_4) + \sin(\theta_4)\cos(\theta_1 + \theta_2))\cos(\theta_0) + \sin(\theta_0)\cos(\theta_3)\cos(\theta_4);$$

$$\mathbf{r}_{23} = -(\sin(\theta_3)\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_4) + \sin(\theta_4)\cos(\theta_1 + \theta_2))\sin(\theta_0) - \cos(\theta_0)\cos(\theta_3)\cos(\theta_4);-$$

$$\mathbf{r}_{33} = \sin(\theta_3)\cos(\theta_4)\cos(\theta_1 + \theta_2) - \sin(\theta_4)\sin(\theta_1 + \theta_2);$$

$$\mathbf{p}_{0,6,x} = -(-0,0438\cos(\theta_3)\cos(\theta_4) + 0,0019\cos(\theta_3))\sin(\theta_0) - (0,0438\sin(\theta_3)\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_4) - 0,0019\sin(\theta_3)\sin(\theta_1 + \theta_2) + 0,0438\sin(\theta_4)\cos(\theta_1 + \theta_2) - 0,23\cos(\theta_1) - 0,1721\cos(\theta_1 + \theta_2))\cos(\theta_0);$$

$$\mathbf{p}_{0,6,y} = (-0,0438\cos(\theta_3)\cos(\theta_4) + 0,0019\cos(\theta_3))\cos(\theta_0) - (0,0438\sin(\theta_3)\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_4) - 0,0019\sin(\theta_3)\sin(\theta_1 + \theta_2) + 0,0438\sin(\theta_4)\cos(\theta_1 + \theta_2) - 0,23\cos(\theta_1) - 0,1721\cos(\theta_1 + \theta_2))\sin(\theta_0);$$

$$\mathbf{p}_{0,6,z} = \mathbf{0,23}\sin(\theta_1) + \mathbf{0,0438}\sin(\theta_3)\cos(\theta_4)\cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$- \mathbf{0,0019}\sin(\theta_3)\cos(\theta_1 + \theta_2) - \mathbf{0,0438}\sin(\theta_4)\sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$+ \mathbf{0,1721}\sin(\theta_1 + \theta_2) + \mathbf{0,0294}.$$

4.3 CINEMÁTICA INVERSA

De posse da matriz homogênea de transformação, deve-se então computar a Equação que descreve a posição do efetuador-final em relação a um referencial escolhido. Neste trabalho, convencionou-se obter a posição em relação à base do robô para posteriormente considerá-la para computar as demais equações de movimento do robô em ambiente orbital.

Para a cinemática inversa, pode-se recorrer à solução geométrica, que é uma das soluções de forma fechada. Tal solução pode ser desenvolvida observando as relações geométricas entre diferentes pontos ao longo do manipulador a fim de desenvolver um sistema de equações de onde se extraem as equações dos ângulos θ_i de cada junta.

Sendo assim, pôde-se deduzir as seguintes igualdades que descrevem o vetor θ de ângulos das juntas do robô em função:

$$\theta_1 = \arctan2(p_{0,6,y}/p_{0,6,x}) \text{ ou } \arctan2(p_{0,6,y}/p_{0,6,x})$$

$$\theta_3 = \arctan2(0,1721/0,0048) - \arctan2\left(K/\pm\sqrt{0,1721^2 + 0,0048^2 - K^2}\right),$$

onde:

$$K = \frac{(p_{0,6,x})^2 + (p_{0,6,y})^2 + (p_{0,6,z})^2 - 0,23^2 - 0,1721^2 - 0,0048^2}{2 \times 0,23},$$

$$\theta_3 = \arctan2(0,1721/0,0048) - \arctan2\left(K/\pm\sqrt{0,1721^2 + 0,0048^2 - K^2}\right),$$

$$\theta_2 = \operatorname{atan2}\left[\frac{(0,1721+0,23\cos(\theta_3))p_{0,6,z} - (\cos(\theta_1)p_{0,6,x} + \sin(\theta_1)p_{0,6,y})(0,0048 - 0,23\sin(\theta_3))}{(0,23\sin(\theta_3) - 0,0048)p_{0,6,z} - (0,1721+0,23\cos(\theta_3))(\cos(\theta_1)p_{0,6,x} + \sin(\theta_1)p_{0,6,y})}\right] - \theta_3,$$

$$\theta_4 = \arctan2\left(\frac{-r_{13}\sin(\theta_1) + r_{23}\cos(\theta_1)}{-r_{13}\cos(\theta_1)\cos(\theta_{23}) - r_{23}\cos(\theta_1)\cos(\theta_{23})r_{33}\sin(\theta_{23})}\right),$$

$$\theta_5 = \arctan2\left(\frac{\sin(\theta_5)}{\cos(\theta_5)}\right),$$

$$\theta_6 = \arctan2\left(\frac{\sin(\theta_6)}{\cos(\theta_6)}\right).$$

Entenda-se $\arctan2$ como a função matemática arco-tangente que calcula o ângulo entre um ponto e a origem de um sistema de coordenadas a partir das coordenadas (x, y) desse ponto. Tal função se diferencia da função convencional

\arctan por lidar de forma a indicar a direção em relação ao eixo \hat{x} positivo, resolvendo assim a ambiguidade dos resultados da função \arctan .

4.4 DINÂMICA

Inicialmente, no estudo da dinâmica do manipulador, deve-se computar a Matriz de Massa, dependente da configuração da cadeia cinemática do robô e responsável por revelar os efeitos da distribuição de massa dos elos e tal configuração sobre os torques necessários a serem aplicados nas juntas do robô.

A partir do simulador “CoppeliaSim” é possível obter os tensores de inércia para cada elo. Basta que os sólidos que compõem o robô na simulação recebam corretamente as informações sobre a geometria e densidade do material que, no caso da estrutura do robô, se dá pela densidade do alumínio utilizado (liga 7076-T6), valendo aproximadamente 2800 kg/m^3 . Os demais elementos como motores, baterias e demais componentes massivos são listados na Tabela 4. O quadro de referência de cada tensor de inércia deve ainda ser posicionado no centro de massa de cada elo.

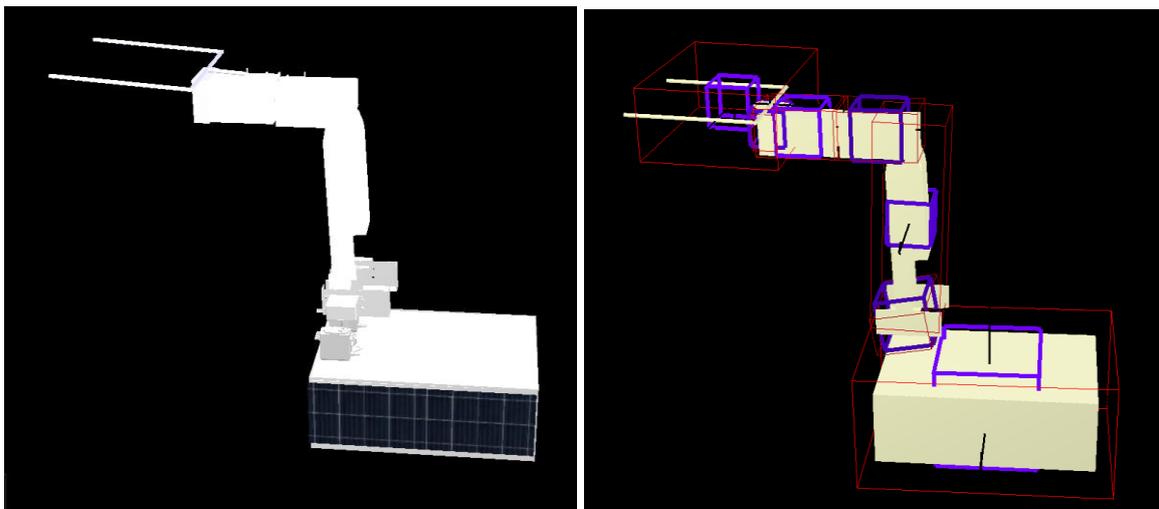
Tabela 4 - componentes (Hardware) do robô

Componente	Massa (kg)	Quantidade	Massa total (kg)
Carenagem	1,874	1	1,874
Painel solar	0,05	8	0,4
Bateria Ni-MH 18650	0,037	8	0,296
Computador Raspberry Pi	0,05	1	0,05
Rolamento 6001 ZZ	0,03	2	0,06

Fonte: O Autor (2023)

Pode-se observar na Figura 16 as posições e intensidades dos tensores de inércia de cada elo do robô, representados respectivamente pela localização na cadeia cinemática e pelo volume dos cubos roxos na Figura.

Figura 16 - Representação dos tensores de inércia distribuídos ao longo do robô



Fonte: O Autor (2023)

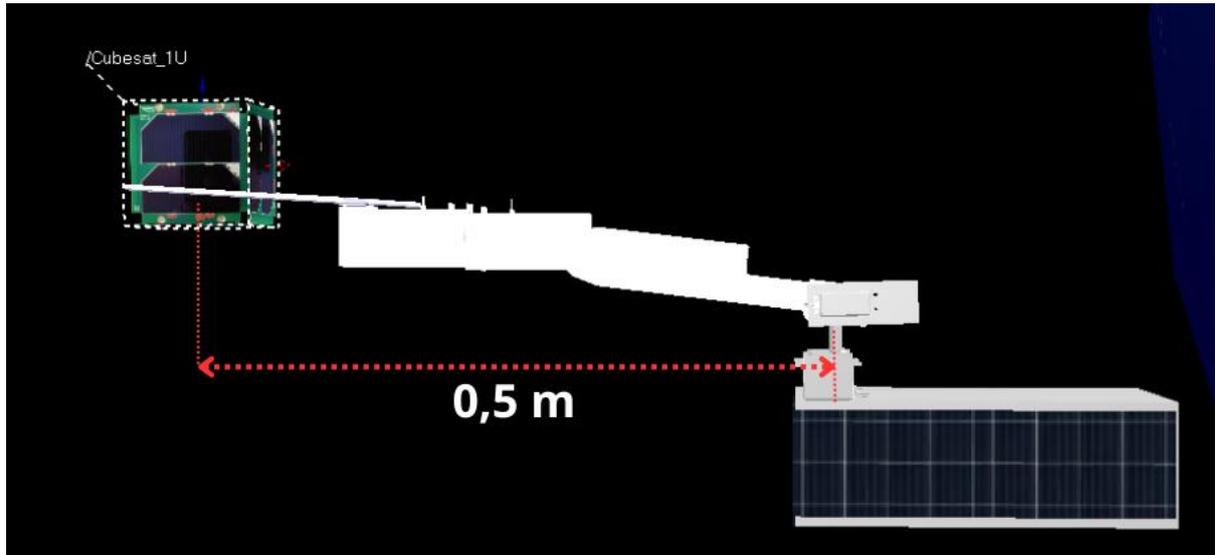
Conforme ilustrado na Figura 16, a plataforma robótica sofre também com as ações de inércia da base flutuante e, sendo assim, deve-se utilizar a Equação (3.31) para calcular as grandezas físicas envolvidas na dinâmica da plataforma robótica. A Equação (3.31) é uma aplicação da Equação dinâmica de Newton-Euler usada para obtenção dos torques e acelerações incidentes sobre cada junta. Vale considerar que tais valores sofrem efeito dos componentes de inércia do corpo composto, que variam com as diferentes configurações do robô.

Sabe-se então que, como o torque exigido sobre cada junta é diretamente proporcional ao produto entre massa, distância e aceleração, esta última grandeza deve ser aproveitada em seu maior valor para que a tarefa de captura seja cumprida no menor tempo possível, e conseqüentemente reduzindo seu custo energético.

Uma vez que a aceleração é controlável no uso de servomotores, resta delimitar a aceleração dos motores do robô avaliando os torques máximos (*stall*) de cada um dos motores conectados às juntas.

Os torques máximos exercidos ocorrerão, por sua vez, no cenário em que a carga, ou seja, o CubeSat a ser capturado, esteja na extremidade da ferramenta de captura, com o manipulador robótico completamente estendido, conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 - Posição de máxima extensão do manipulador robótico.



Fonte: O Autor (2023)

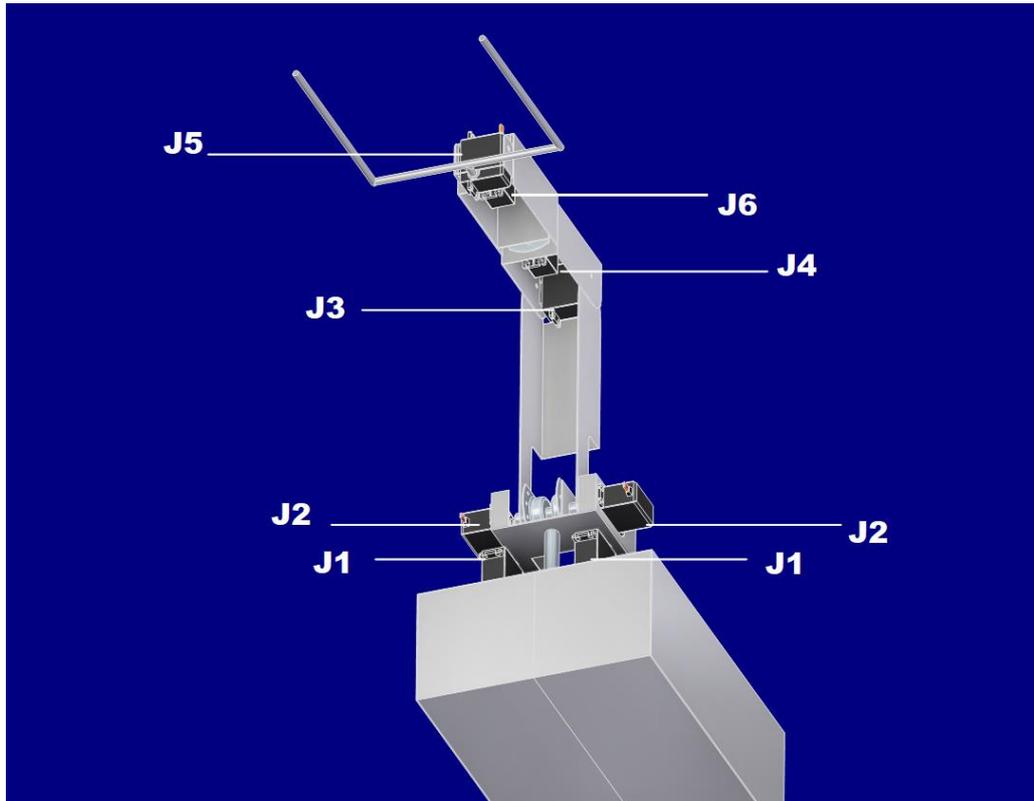
Para inserção de torque em cada junta, o autor selecionou três modelos de servomotores, de modo a combinar, progressivamente redução de massa e de torque do motor, à medida que sua posição se afasta da base do manipulador. Os motores utilizados seguem as especificações dinâmicas da Tabela 5 e foram posicionados conforme ilustração da Figura 18:

Tabela 5 - Especificações dinâmicas dos servomotores.

Modelo	TD-8135MG	MG996R	MG90S
Torque máximo (N.m)	3,43	1,088	0,216
Velocidade angular máxima (rad/s)	4,76	7,47	13,08
Massa (kg)	0,075	0,055	0,014

Fonte: O Autor (2023)

Figura 18 - Posição dos servomotores do robô.



Fonte: O Autor (2023)

Para movimentar as juntas J_1 e J_2 são instalados dois servomotores paralelos aos eixos para que, ao trabalharem de forma sincronizada, forneçam à junta o torque igual às somas dos torques dos dois motores combinados. Sendo assim, ao combinar um motor TD-8135MG com um MG996R é obtido o torque de 4,52 N.m nas juntas J_1 e J_2 . As demais juntas são movimentadas por motores individuais, conforme Tabela 6:

Tabela 6 - Combinação de motores para as juntas do robô.

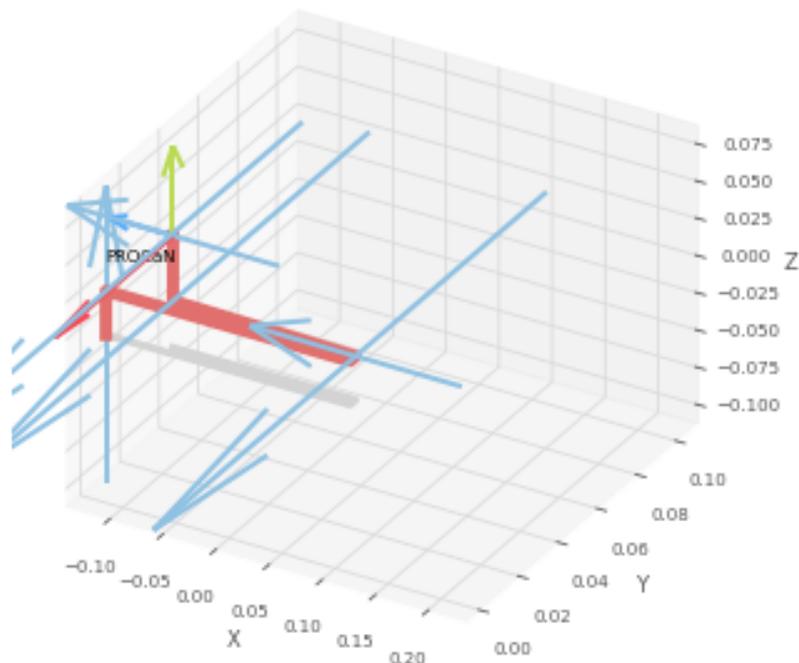
Junta	J1	J2	J3	J4	J5	J6
Motor(es)	TD-8135MG e MG996R	TD-8135MG e MG996R	TD-8135MG	TD-8135MG	MG90S	MG90S
Torque total limite (N.m)	4,52	4,52	3,43	3,43	0,216	0,216

Fonte: O Autor (2023)

O vetor de limites de esforços aplicados em cada junta do robô pode ser definido a partir da Tabela 5, tal que: $\tau = [4,52 \ 4,52 \ 3,43 \ 3,43 \ 0,22 \ 0,22]$. Sendo assim, define-se um vetor de velocidades angulares, com valores fixados na menor das velocidades angulares máximas entre os motores, tal que: $\dot{\theta}_{max} = [4,74 \ 4,74 \ 4,74 \ 4,74 \ 4,74 \ 4,74] \text{ rad/s}$. A partir de τ e $\dot{\theta}_{max}$ pode-se obter, através da dinâmica inversa descrita pelo algoritmo recursivo de Newton-Euler, os valores de torque aplicados às juntas para cada configuração exercida pelo manipulador. Os valores de torque são calculados ao longo da trajetória escolhida com velocidade máxima no espaço de juntas. Uma vez que o maior momento angular é obtido com a maior extensão possível do braço em relação ao seu centro de rotação, foi escolhido o movimento de extensão do braço robótico a partir da sua configuração recolhida, como forma de avaliar os torques aplicados a cada junta do robô.

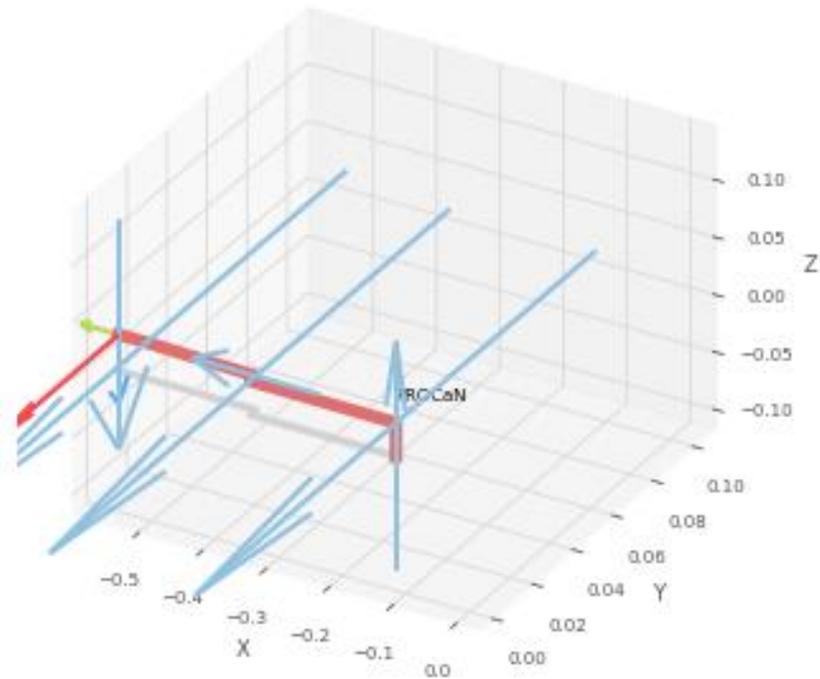
Partindo da configuração definida pelo vetor $q_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \text{ rad}$, Figura 19, até a configuração $q_f = [0 \ \pi \ \pi \ 0 \ \pi/2 \ 0] \text{ rad}$, Figura 20, calculam-se os torques, conforme visto no gráfico da Figura 21:

Figura 19 - Configuração do braço recolhido



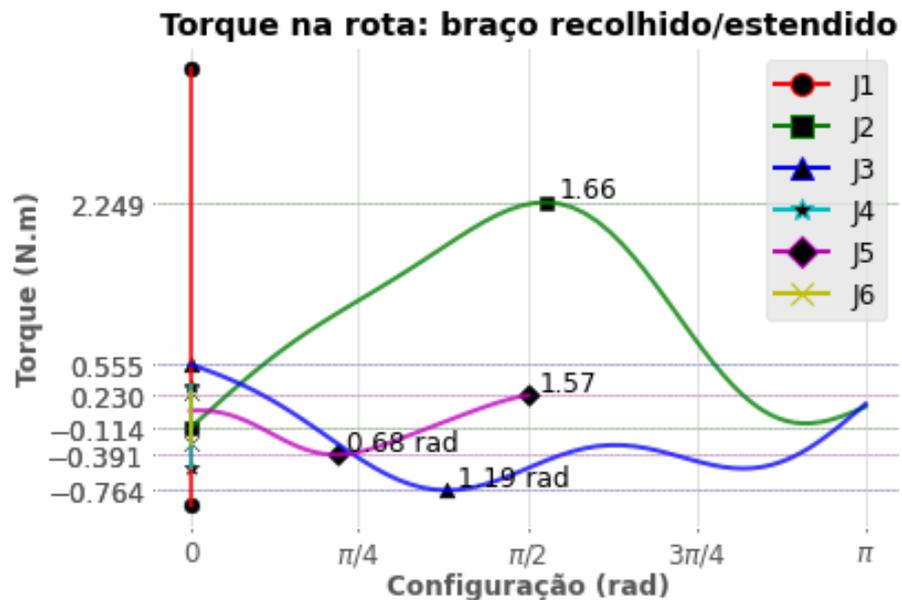
Fonte: O Autor (2023)

Figura 20 - Configuração do braço estendido



Fonte: O Autor, 2023

Figura 21 - Variação do torque em cada junta durante a trajetória "recolhido/estendido" com velocidade máxima em cada junta



Fonte: O Autor (2023)

Uma vez que, para atender ao torque solicitado, o desempenho do servomotor seja independente do sinal da aplicação do torque, ou seja, os limites do motor são estabelecidos de forma escalar, observa-se pelo gráfico da Figura 21 que, a

configuração de torque máximo do robô na trajetória recolhido-estendido é descrita pelo vetor $q_{max} = [0 \ 1,60 \ 1,19 \ 0 \ 1,52 \ 0] \text{ rad}$ e que, inclusive, os torques exigidos para o movimento com a referida velocidade angular excede os torques suportados pelos motores instalados em j_5 e j_6 .

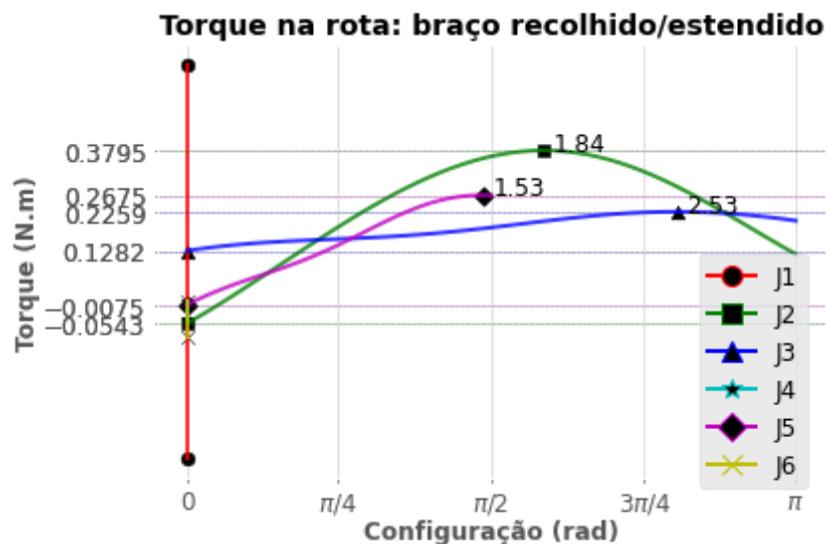
Percebe-se então que, a configuração de torque máximo difere da configuração final, em que o manipulador se encontra completamente estendido. Isso ocorre porque mesmo ao aplicar velocidades iguais, o momento de inércia deslocado por cada uma das juntas é diferente, demandando energias cinéticas rotacionais diferentes entre si, proporção demonstrada na Equação (4.1):

$$K = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad (4.1)$$

A partir da Equação (4.1), pôde-se obter o vetor de velocidades, condicionado à geração de mesma energia cinética por cada junta, fixada pela energia cinética obtida do motor com menor torque máximo: 0,22 N.m.

Percebe-se pelo gráfico da Figura 22 que, apesar do valor de torque fixado, o torque necessário para atender as condições selecionadas ainda ultrapassam o torque limite do motor instalado na junta j_5 , atingindo 0,267 N.m quando q_5 for igual a 1,46 rad.

Figura 22 - Torque exigido na trajetória braço recolhido/braço estendido.



Fonte: O Autor (2023)

Sabe-se ainda que, conforme descrito por Craig (2013), as relações de velocidades entre as juntas e entre de forças e momentos exercidos pelas juntas são semelhantes entre si e semelhantes a jacobianas, de forma que se apresentam por matrizes de transformação ${}^A T_f = {}^A T_V^T$, ou seja, para correlacionar qualquer velocidade em um referencial B, com um referencial A pode-se usar a mesma matriz de transformação obtida para a transformação de força-momento entre os mesmos referenciais. A Equação 4.2 descreve a utilização da matriz de transformação de forças:

$$\begin{bmatrix} {}^A F_A \\ {}^A N_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R & 0 \\ {}^A P_{BORG} \times {}^A R & {}^A R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B F_B \\ {}^B N_B \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Sabendo que as juntas possuem torques definidos pelas características dos motores utilizados, e que tais limitações se resumem aos valores angulares sobre os eixos de cada junta, pode-se aproveitar apenas a linha inferior da Equação que resulta na expressão da Equação (4.3).

$${}^A N_A = [{}^A P_{BORG} \times {}^A R] \times {}^B F_B + {}^A R \times {}^B N_B. \quad (4.3)$$

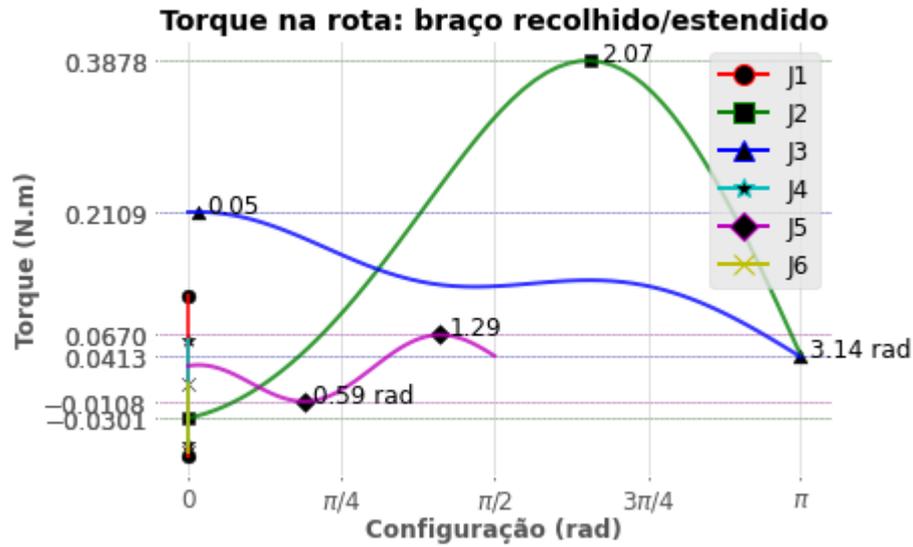
Ou ainda:

$${}^A N_A = {}^A t_f \times {}^B N_B. \quad (4.4)$$

Em que o vetor ${}^A t_f$ representa a parte rotacional da transformação força-momento. Obedecendo a mesma relação exposta na Equação (4.4), pode-se fixar os valores de torque máximo e obter o cada coeficiente ${}^i t_f$ em que i representa a junta da qual se deseja saber a relação com a junta j_6 , que possui o menor valor de torque. O vetor $t_f = [0,044 \quad 0,044 \quad 0,059 \quad 0,059 \quad 1 \quad 1]$ resulta das iterações com cada junta.

A partir do vetor de transformação, pôde-se obter o vetor de velocidades $\omega = [0,581 \quad 0,581 \quad 0,769 \quad 0,769 \quad 13,08 \quad 13,08]$ rad/s, no espaço de juntas, que resulta nos torques descritos pelo gráfico da Figura 23, dessa vez, respeitando os limites de torque de todas as juntas do robô.

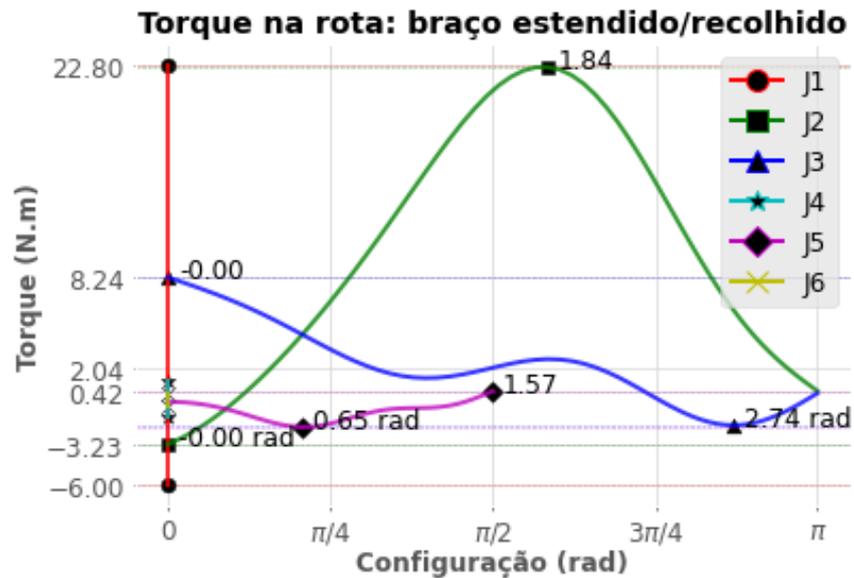
Figura 23 -Torque na trajetória braço recolhido/braço estendido dentro dos limites dos motores acoplados às juntas do robô



Fonte: O Autor (2023)

Uma vez capturado o objeto, de 2 kg de massa, deve-se ainda considerar a captura no cenário de maior esforço dinâmico para a plataforma robótica: na trajetória entre o braço completamente estendido até o seu recolhimento junto à base da plataforma. Sobre essa trajetória, percebe-se que, partindo do repouso, onde velocidades, e acelerações de junta são nulas, o torque necessário e a consequente aceleração desempenhada pelo manipulador ficam restritos a valores inferiores aos obtidos considerando o manipulador sem carga. Observa-se pelo gráfico da Figura 24 que o torque necessário para mover o manipulador em sua velocidade máxima, portando a carga de 2 kg, extrapola os limites de torque de quase todas as juntas (exceto pela junta j_4), que não exercem esforços durante a trajetória, apontando assim a necessidade de um controle de velocidade ideal para o deslocamento do objeto após sua interceptação pelo efetuator final.

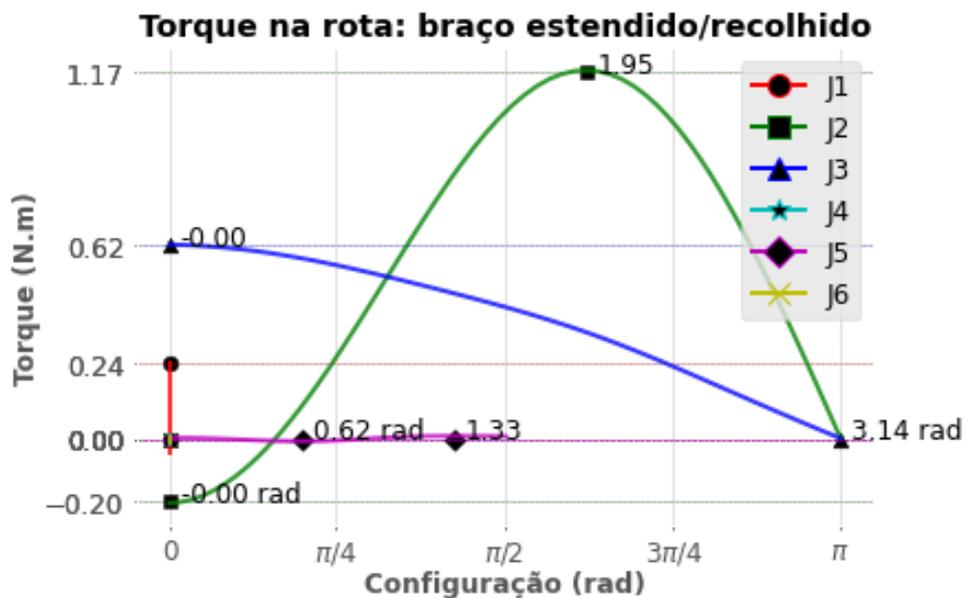
Figura 24 - Torques necessários para deslocamento do objeto em velocidade máxima.



Fonte: O Autor (2023)

Sendo assim, observou-se que, com velocidades abaixo de 40% das velocidades definidas no vetor ω , o robô, dessa vez com uma carga de 2 kg em seu TCP, é capaz de mover-se até a configuração “recolhido”, desenvolvendo a velocidade $\omega_{40} = [0,25 \ 0,25 \ 0,331 \ 0,331 \ 5,624 \ 5,624]$ rad/s, conforme pode-se observar no gráfico da Figura 25:

Figura 25 - Torque durante recolhimento do braço robótico com 40% do torque limite dos motores.



Fonte: O Autor (2023)

4.4.1 Formulação de Newton-Euler

Uma vez obtidos os limites dinâmicos da plataforma robótica, vinculados ao desempenho dos motores escolhidos e da estrutura projetada, referenciada no padrão *CubeSat*, deve-se então modelar a operação do robô como uma plataforma satelital, de modo a adequar os efeitos da inércia gerada pela operação do grupo de motores sobre o corpo duplo formado por manipulador-base satelital.

Sabe-se então, a partir da Equação dinâmica de Newton-Euler (3.31) que, uma vez que a base do manipulador não possui fixação em uma estrutura estática (livre flutuação), como reação aos momentos angular e linear gerados pelo deslocamento de massa do manipulador sobre a base, esta também aplica momentos angular e linear na mesma direção do vetor deslocamento resultante do manipulador, mas em sentido contrário.

Esse comportamento interfere diretamente no sistema de controle de posição do efetuador final, com conseqüente operação de captura do objeto pelo efetuador final. Neste trabalho, o controle realizado pelo robô se dá como forma de correção da trajetória entre o efetuador final e o objeto a ser capturado que, a partir da combinação dos sensores de visão (câmera de vídeo) e de distância (laser), obtém-se as coordenadas cartesianas do objeto no espaço em relação ao referencial fixado na base flutuante. Vale compreender que, uma vez que há deslocamento da base durante o movimento do manipulador, este deve ser computado a fim de compor a Equação de controle para evitar propagação do erro.

4.4.2 Dinâmica da plataforma satelital

A partir da posição p_{ef} do efetuador final em relação a um referencial inercial, descrita pela Equação (4.5), pode-se perceber uma relação entre as velocidades linear e angular do punho do robô, desenvolvida na Equação (4.6), em que r_0 representa a posição do centro de massa da base do manipulador (elo 0), b_0 representa a posição do centro de massa da base satelital e l_i é o comprimento do i -ésimo elo do manipulador.

$$p_{ef} = r_0 + b_0 + \sum_{i=1}^n l_i. \quad (4.5)$$

Bem como a velocidade do efetuador final $v = \begin{bmatrix} v_{ef} \\ \omega_{ef} \end{bmatrix}$:

$$v = \begin{bmatrix} v_{ef} \\ \omega_{ef} \end{bmatrix} = J_B \begin{bmatrix} v_b \\ \omega_B \end{bmatrix} + J_m \dot{\theta}. \quad (4.6)$$

Em que os termos ef , m e B subscritos referem-se ao efetuador-final, manipulador e base satelital, respectivamente.

Seja r_i o vetor-posição do centro de massa do elo i , define-se o operador \tilde{r} para um vetor $r = [x \ y \ z]^T$, definido como:

$$\tilde{r} \equiv \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

A partir de \tilde{r} pode-se então computar as Jacobianas da base satelital do robô J_B e do manipulador J_m :

$$J_B = \begin{bmatrix} I & -\tilde{p}_{ef-B} \\ 0 & I \end{bmatrix}, p_{ef-B} \equiv p_{ef} - p_B, \quad (4.8)$$

$$J_m = \begin{bmatrix} k_1 \times (p_{ef} - p_1) & \dots & k_n \times (p_{ef} - p_n) \\ k_1 & \dots & k_n \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

em que k_i Representa o vetor unitário indicativo do eixo de rotação atrelado à junta i .

Para a dinâmica do sistema satélite-robô, adaptam-se equações da energia cinética e do movimento utilizadas em robótica. A energia cinética total do sistema T pode ser representada conforme Equação (4.10):

$$T \equiv \frac{1}{2} \begin{bmatrix} v_0^T & \omega_0^T & \dot{\theta}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mI & m\tilde{r}_{0g}^T & J_{Tm} \\ m\tilde{r}_{0g} & H_\omega & H_{\omega\theta} \\ J_{Tm}^T & H_{\omega\theta}^T & H_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad (4.10)$$

em que:

$$H_\omega \equiv \sum_{i=1}^n (I_i + m_i \tilde{r}_{0i}^T \tilde{r}_{0i}) + I_0, \quad (4.11)$$

$$H_{\omega\theta} \equiv \sum_{i=1}^n (I_i J_{Ri} + m_i \tilde{r}_{0i}^T J_{Ti}), \quad (4.12)$$

$$H_\theta \equiv \sum_{i=1}^n (J_{Ri}^T I_i J_{Ri} + m_i J_{Ti}^T J_{Ti}), \quad (4.13)$$

$$J_{Ti} \equiv [k_1 \times (r_i - p_1), k_2 \times (r_i - p_2), \dots, k_i \times (r_i - p_i), 0, \dots, 0], \quad (4.14)$$

$$J_{Ri} \equiv [k_1, k_2, \dots, k_i, 0, \dots, 0], \quad (4.15)$$

$$J_{Tm} \equiv \sum_{i=1}^n m_i J_{Ti}, \quad (4.16)$$

$$r_{0g} \equiv r_g - r_0, \quad r_{0i} \equiv r_i - r_0. \quad (4.17)$$

Onde r_0 é o vetor-posição do centro de massa da base satelital, r_g se refere ao centro de massa do sistema inteiro do robô com sua base satelital, e H_θ é o tensor de inércia comum, utilizado em manipuladores com base fixa no solo.

A base do robô, descrita com uma geometria simples e relativamente uniforme em comparação ao manipulador atrelado, movimentada-se conforme resposta ao momento gerado pelo movimento das juntas no manipulador robótico, observados pela Equação (4.18) que relaciona os momentos linear P e angular L resultantes das forças espaciais e angulares geradas pelas juntas sobre o centro de massa do robô.

$$\begin{bmatrix} P \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \cdot I & m \tilde{r}_{0g}^T \\ m \tilde{r}_{0g} & In_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_T \\ In_\theta \end{bmatrix} \dot{\theta}. \quad (4.18)$$

Perceba-se que, na Equação (4.18) se expressam, de forma matricial, as equações descritas em (3.33) e (3.34), sendo I uma matriz-identidade 3×3 , In e In_q as matrizes de inércia do sistema e das juntas, respectivamente descritos pelas equações (4.19) e (4.20):

$$In_\omega = \sum_{i=1}^n (In_i - m_i \tilde{r}_i \tilde{r}_{0i}) + In_0, \quad (4.19)$$

$$In_\theta = \sum_{i=1}^n (In_i J_{Ri} + m_i \tilde{r}_i J_{Ti}). \quad (4.20)$$

Uma vez que o movimento do efetuador final será computado em relação ao referencial fixado na base satelital do robô, pode-se estabelecer a relação do momento angular L do sistema satélite-manipulador em relação ao centro de massa da base satelital L_0 :

$$L = L_0 + r_B \times P. \quad (4.21)$$

Sendo assim, pode-se reescrever a Equação (4.21) na forma da Equação (4.22):

$$\begin{bmatrix} P \\ L_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \cdot I & m\tilde{r}_{0g}^T \\ m\tilde{r}_{0g} & H_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_T \\ H_{\omega\theta} \end{bmatrix} \dot{\theta} = 0. \quad (4.22)$$

A Equação (4.22) demonstra as relações de restrição de movimento do sistema, estabelecidas pela conservação de momento, que descreve a relação entre as velocidades linear, angular (variação da atitude) e de juntas (v, ω, θ).

A Equação do movimento é derivada de uma função Lagrangeana que relaciona energia cinética e potencial. Uma vez que a energia potencial não é considerada no contexto do sistema robô-satélite, a função Lagrangeana exprime somente a energia cinética T . A partir das equações (4.10) e (4.22), pode-se escrever a Equação do movimento em função de $\theta, \dot{\theta}$ e $\ddot{\theta}$ (4.23):

$$\mathbf{H}^* \ddot{\theta} + \dot{\mathbf{H}}^* \dot{\theta} - \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \mathbf{H}^* \dot{\theta} \right\} = \tau, \quad (4.23)$$

$$\mathbf{H}^* \equiv H_\theta - \begin{bmatrix} J_T^T & H_{\omega\theta}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \cdot I & m\tilde{r}_{0g}^T \\ m\tilde{r}_{0g} & H_\omega \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} J_T \\ H_{\omega\theta} \end{bmatrix}, \quad (4.24)$$

em que \mathbf{H}^* é definido como o “Tensor de Inércia para Manipuladores Espaciais em Voo Livre”, uma versão específica do mesmo tensor utilizado em manipuladores fixos no solo, H_θ (XU; KANADE, 1993).

4.4.3 Matriz Jacobiana Generalizada (MJG)

Para o caso específico de manipuladores espaciais em voo livre, utiliza-se uma versão também específica de matriz jacobiana, que considera a dinâmica das forças de reação ocorrentes no contexto de sistemas em voo livre. Essa matriz é chamada de “Matriz Jacobiana Generalizada (MJG)”.

A MJG surge a partir das equações básicas de cinemática para manipuladores espaciais, sobre as quais são aplicados os elementos da Equação 4.22 e exprime a relação entre as matrizes jacobianas do manipulador e da base satelital individualmente (4.25):

$$v = J_B \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + J_m \dot{\theta} \equiv \mathbf{J}^* \dot{\theta}, \quad (4.25)$$

sendo J^* a MJG. Observe-se que quanto mais massiva for a base satelital e maior for a diferença de massa com a massa do manipulador, mais a MJG tende à jacobiana utilizada em manipuladores de base fixa no solo.

A principal vantagem em se computar a MJG é a possibilidade de aplicação de métodos convencionais de controle, os mesmos que podem ser utilizados para manipuladores de base fixa no solo, apenas substituindo a matriz jacobiana convencional pela MJG.

4.5 CONTROLE

Como técnica de controle, optou-se pelo controle Proporcional Integral Derivativo (PID) aplicado ao controle do efetuador final baseado na matriz inversa da jacobiana. Essa técnica, conhecida como RMRC (*Resolved Motion Rate Control – Controle de Taxa de Movimento Resolvido*) é utilizada para controlar continuamente a trajetória do efetuador final e, no caso de manipuladores espaciais, deve obedecer às condições que determinam que a operação do efetuador final, em termos de velocidade relativa a um referencial inercial $v_d(t) = [v_{rd}(t)^T, \omega_{nd}(t)^T]^T$, deve ser dada a cada instante e, a atitude da base satelital Ω_B , bem como os ângulos das juntas θ podem ser medidos em tempo real.

Nesse contexto, o comando de velocidade a ser enviado às juntas do robô pode ser computado a partir da Equação (4.26):

$$\dot{\theta}_c = [J^*(\Omega_B, \theta)]^{-1} v_d. \quad (4.26)$$

Uma vez que o RMRC se mostra como solução ao controle de trajetória do robô, deve-se perceber que, ao considerar apenas os valores de velocidade, a dinâmica do sistema é excluída, causando uma propagação de erro na taxa de variação de movimento. Como solução mitigadora desse erro deve-se aplicar o RAC (*Resolved Acceleration Control – Controle de Aceleração Resolvido*).

O RAC resulta em um vetor comando de aceleração $\ddot{\theta}_c$, obtido pela diferenciação da Equação (4.27):

$$\ddot{\theta}_c = [J^*]^{-1}(\dot{v}_d - j^* \dot{\theta}). \quad (4.27)$$

A partir da qual, aplicam-se as matrizes de ganho K_1 e K_2 na forma da Equação (4.28):

$$\ddot{\theta}_c = [J^*]^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \dot{v}_{rd} \\ \dot{\omega}_{nd} \end{bmatrix} + K_1 \begin{bmatrix} v_{rd} - v_r \\ \omega_{nd} - \omega_n \end{bmatrix} + K_2 \begin{bmatrix} p_{rd} - p_r \\ d\Omega_n \end{bmatrix} - j^* \dot{\theta} \right\}. \quad (4.28)$$

Sendo \dot{v}_{rd} , $\dot{\omega}_{nd}$, v_{rd} , ω_{nd} e p_{rd} os valores desejados de aceleração linear, angular, velocidade linear, angular e posição; e v_r , ω_n e p_r os valores atuais, medidos por sensores. O termo $d\Omega_n$ representa o erro de orientação do efetuador final, medido por um sensor de visão e é descrito pela Equação (4.29):

$$d\Omega_n \equiv \frac{1}{2} (i_n \times i_{nd} + j_n \times j_{nd} + k_n \times k_{nd}). \quad (4.29)$$

Para este projeto, optou-se por aplicar a técnica RMRC combinado com o Servocontrole Visual, através da Matriz Jacobiana Generalizada.

A velocidade linear do efetuador final v_d é determinada pelo vetor erro de posição $p_t - p_{ef}$, descrita pela Equação (4.30):

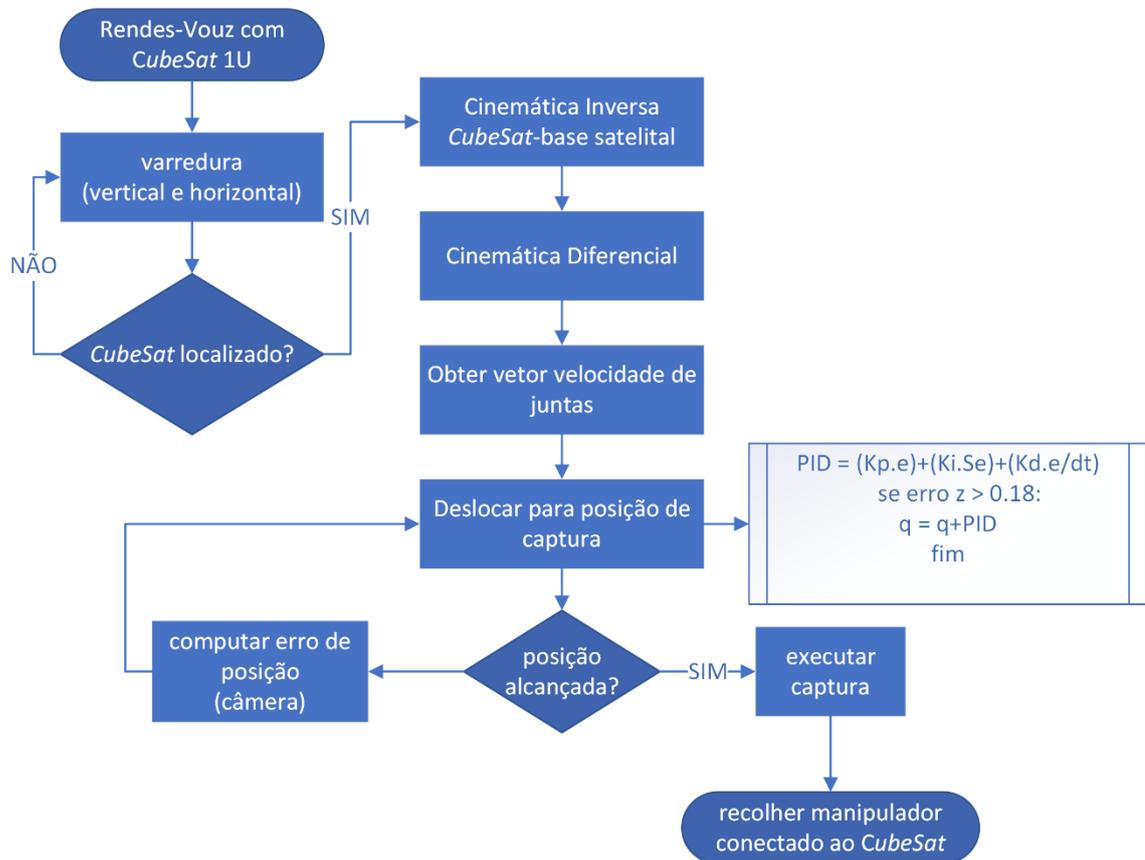
$$v_d = \frac{p_t - p_{ef}}{\delta t}, \quad (4.30)$$

em que δt é o intervalo de amostragem de tempo. Os comandos de velocidade são obtidos conforme descritos na Equação (4.26).

O sistema de controle se baseia em uma combinação de controle “reativo” e “deliberativo”. No controle reativo, o sistema se adapta às condições momentâneas do cenário, ou seja, deve haver um constante monitoramento dos sinais dos sensores utilizados. No controle deliberativo uma condição inicial é avaliada, o robô então entra numa fase de planejamento de movimento e, logo em seguida, executa a trajetória planejada, independente de alterações no cenário por quaisquer distúrbios ou dinamicidade do sistema. A junção desses dois tipos de controle é chamada de controle “híbrido” que, embora também assuma uma fase de planejamento,

permanece monitorando os sinais dos sensores para se adaptar às mudanças do cenário. O fluxo de controle do robô obedece ao diagrama de blocos exibido na Figura 26 (MATARIĆ, 2014).

Figura 26 - Diagrama de controle da tarefa de captura



Fonte: O Autor (2023)

O ciclo de controle pode ser descrito da seguinte forma:

- Um simulacro de *CubeSat* é posicionado na vizinhança do PROCaN, dentro do espaço de trabalho do robô;
- O robô executa um padrão de varredura, movendo dois elos ortogonais entre si, com os menores momentos de inércia possíveis para obter a posição do *CubeSat* a partir da câmera a bordo do efetuador final e de um sensor de distância a laser;
- Concluído o padrão de varredura, se localizado o *CubeSat*, computar a cinemática inversa da posição do *CubeSat* em relação à base do manipulador;

- Computar cinemática diferencial e obter vetor velocidade de juntas a partir do produto matricial com a MJG;
- Deslocar manipulador à posição de captura;
- Computar vetor erro de posição a partir da câmera de vídeo e do sensor de laser e aplicar ao RAC;
- Uma vez atingida a posição desejada com vetor de erro estacionário, executar movimento de captura;
- Recolher manipulador à posição inicial, reduzindo momento de inércia do sistema total.

Perceba-se então que a fase deliberativa é assumida pelos quatro blocos centrais do diagrama, iniciando com a computação da cinemática inversa entre *CubeSat* e base satelital do robô e encerrando com o início do deslocamento para a posição de captura.

A fase posterior à deliberativa é a fase reativa do controle, em que se aplica controle Proporcional Integral-Derivativo (PID) para monitorar o sinal de erro ao longo da trajetória do robô. No algoritmo de controle, entenda-se “Kp”, “Ki” e “Kd” como as constantes proporcional, integral e derivativa e “e”, “Se” e “PID” como as variáveis de erro, somatório do erro ao longo do tempo decorrido e de saída da função de controle PID aplicado ao vetor “q” de posições das juntas do robô.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para simular as características dinâmicas do cenário de atuação da plataforma robótica, partiu-se do instante pós *Rendez-vous*, ou seja, logo depois da aproximação da plataforma robótica ao objeto a ser capturado.

No contexto orbital, de micro gravidade, torna-se suficiente configurar um cenário no simulador “CoppeliaSim” com o detector de colisões em tempo real e simulador de grandezas físicas “*Bullet V2.83*”, frequentemente utilizado no desenvolvimento de projetos de Realidade Virtual, jogos, efeitos visuais e Robótica. Configurou-se o simulador *Bullet* com o vetor de gravidade em zero para todas as direções e com o valor de discretização do tempo a cada 5 *ms*.

O programa CoppeliaSim possui, dentre seus diversos recursos, uma Interface de Programação de Aplicação (*Application Programming Interface – API*), utilizada para controle do robô simulado no cenário virtual através de *software* externo ao programa. Para esta pesquisa, foi adotada utilização da API através de códigos desenvolvidos em linguagem “*Python*”, utilizando o kit de ferramentas “*robotics toolbox*” como módulo componente desses códigos.

O objeto a ser capturado pela plataforma robótica foi modelado a partir dos parâmetros máximos de um *CubeSat* 1U, ou seja, um nanossatélite modular, cúbico, de 10 cm de aresta, com 2 kg de massa, centralizada coincidentemente ao centro geométrico do sólido.

Uma vez que a variável de entrada do sistema de controle de captura é a imagem da câmera que, através de algoritmo de reconhecimento de objeto, resultará no cálculo da posição do objeto em relação ao efetuador final. Uma vez sabida a posição do objeto em relação ao efetuador final, faz-se uso da Equação de transformação harmônica para computar a posição do objeto em relação à base do manipulador. Esse procedimento é necessário para que se obtenha o sinal de erro de posição do objeto em relação ao TCP (Ponto Central da Ferramenta - *Tool Center Point*) e a partir desse erro, o sistema de controle opere, reduzindo o erro obtido em *z*, no referencial da câmera, inferior a 18 cm, equivalente a 0 cm em relação ao TCP.

Para avaliar o desempenho da plataforma robótica “PROCaN” na tarefa de capturar o *CubeSat* em ambiente de micro gravidade, foram simuladas situações em que o *CubeSat* estaria em diferentes posições em relação ao robô, de forma a verificar

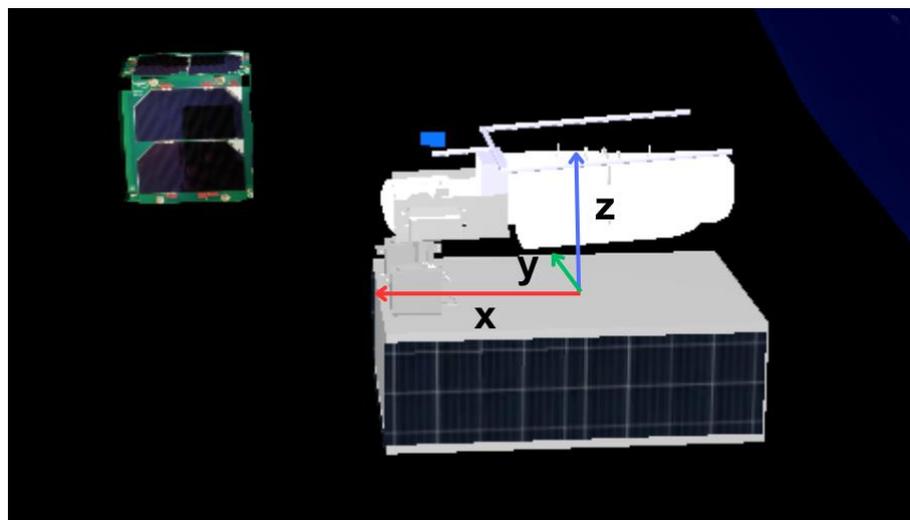
o tempo decorrido e a trajetória necessária para que o efetador final esteja em posição de captura, bem como a oscilação do torque e o deslocamento da base em relação a seu referencial inercial. O referencial inercial da base corresponde à sua posição inicial, antes da tarefa de captura ser iniciada.

Os valores dinâmicos fixados foram limitados pelo vetor de velocidade $\omega = [0,581 \ 0,581 \ 0,769 \ 0,769 \ 13,08 \ 13,08] \text{ rad/s}$ e, pelos valores de constante proporcional, de integração e de derivação $K_p = 0,1; K_i = 0,01, K_d = 0,01$ para controle lateral e em profundidade, e $K_p = 0,15; K_i = 0,0, K_d = 0,01$ para o controle vertical. Tais constantes são usados no modelo de controle Proporcional Integrativo Derivativo (PID).

5.1 EXPERIMENTO 1

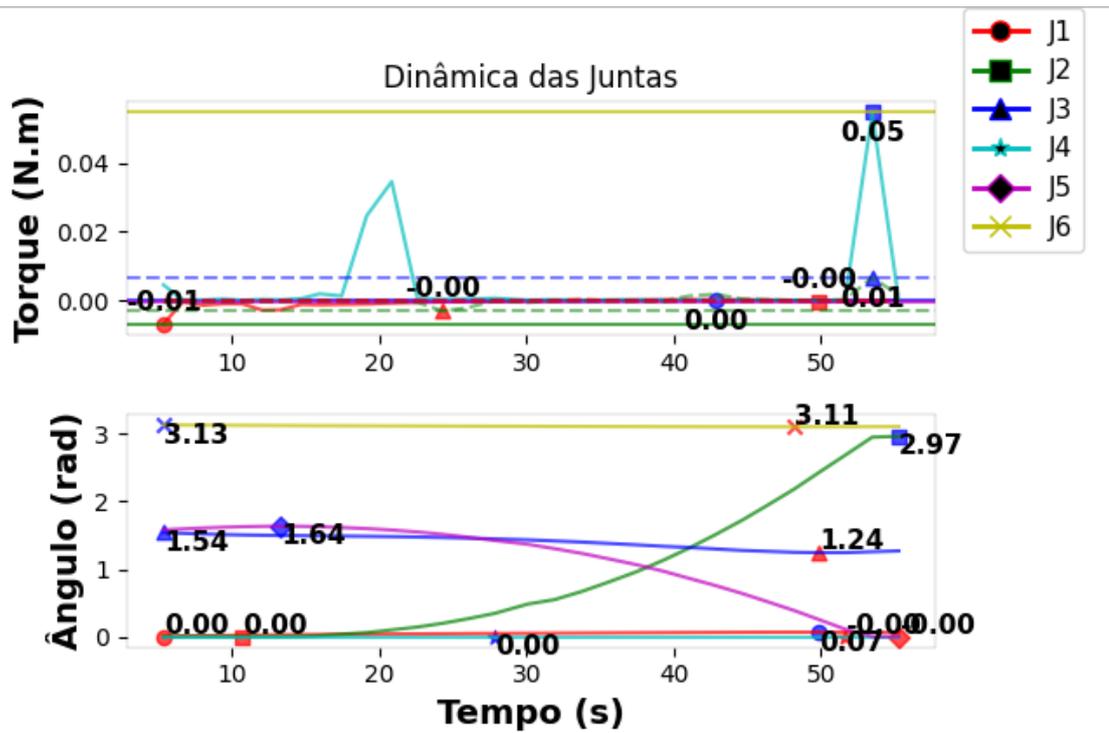
No primeiro experimento, a plataforma robótica detectou o *CubeSat* frontalmente, localizado na posição $[x, y, z] = [30; 0; 20]$ cm em relação à base satelital (Figura 27), apresentando-se como posição simétrica aproximada em relação à base do manipulador. Como pode ser visto no gráfico da Figura 28, os torques exercidos se mostraram baixos em relação ao torque máximo de todos os motores do robô.

Figura 27 - Posição inicial relativa entre CubeSat e PROCaN para o experimento 1.



Fonte: O Autor (2023)

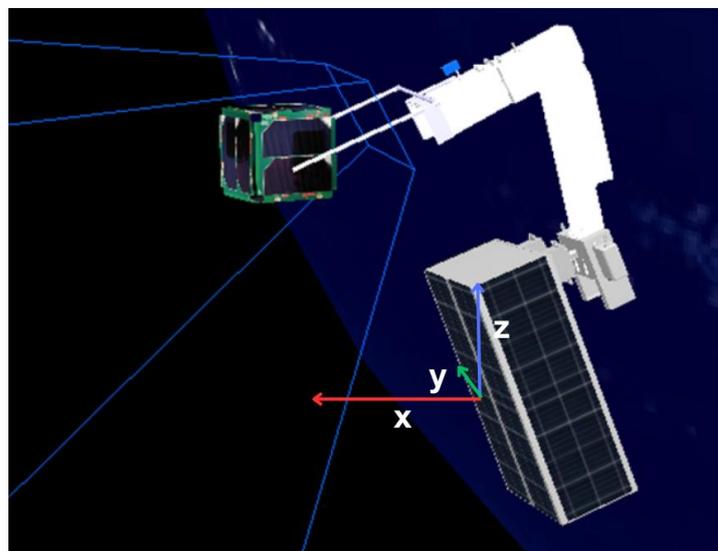
Figura 28 - Torques e ângulos das juntas do robô durante o experimento 1.



Fonte: O Autor (2023)

As juntas J1 e J2 são as suscetíveis ao maior torque, uma vez que estão sujeitas a mover ao final do experimento, o PROCaN atingiu a posição de captura em 55,3 segundos. A posição de captura é observada na Figura 29.

Figura 29 - Posição de captura do CubeSat exercida pelo robô PROCaN.

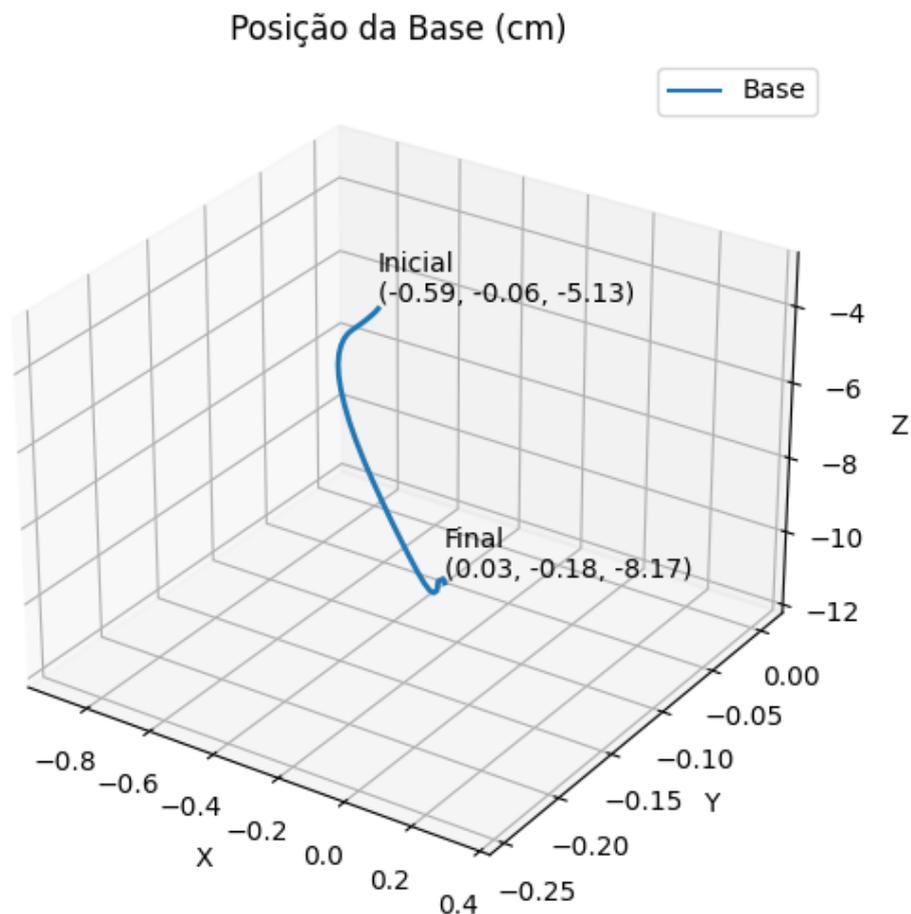


Fonte: O Autor (2023)

Apesar de visualmente, na simulação, o CubeSat estar dentro da área de contato da ferramenta de captura, o Ponto Central da Ferramenta (TCP) não foi ocupado pelo CubeSat, cuja face mais perto se posicionou a 23,83 cm da câmera (11,03 cm de distância do TCP), uma vez que a junta J2 atingiu seu limite de rotação (3,14 radianos).

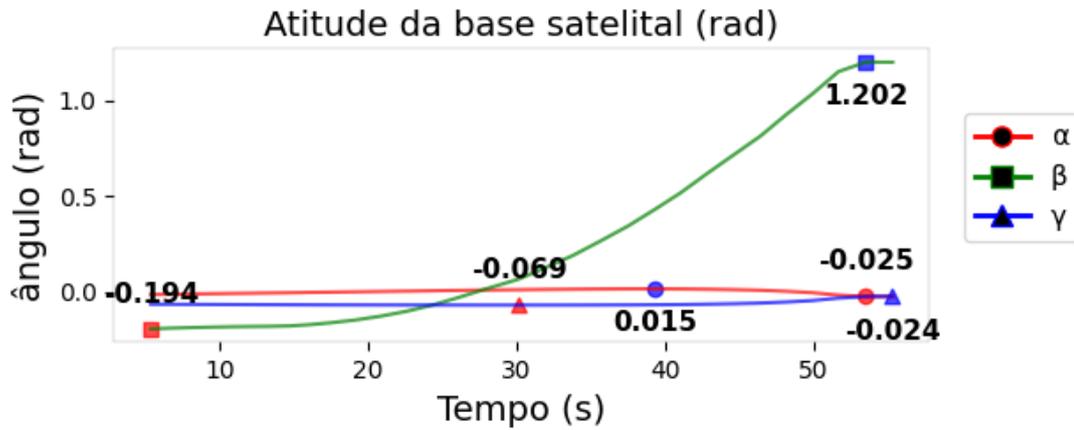
No mesmo experimento, pôde-se observar o deslocamento inercial da base satelital do robô que, ao representar 59,37% da massa total do robô, se desloca conforme o gráfico tridimensional da Figura 30, comprometendo o alcance do manipulador. Além do deslocamento espacial, observa-se ainda a variação sensível na atitude da base satelital, conforme demonstrado no gráfico da Figura 31, sendo α, β, γ os ângulos de Euler, que representam as rotações em torno dos eixos $\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}$.

Figura 30 - Deslocamento da base satelital no experimento 1.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 31 - Variação da atitude da base satelital durante o experimento 1.



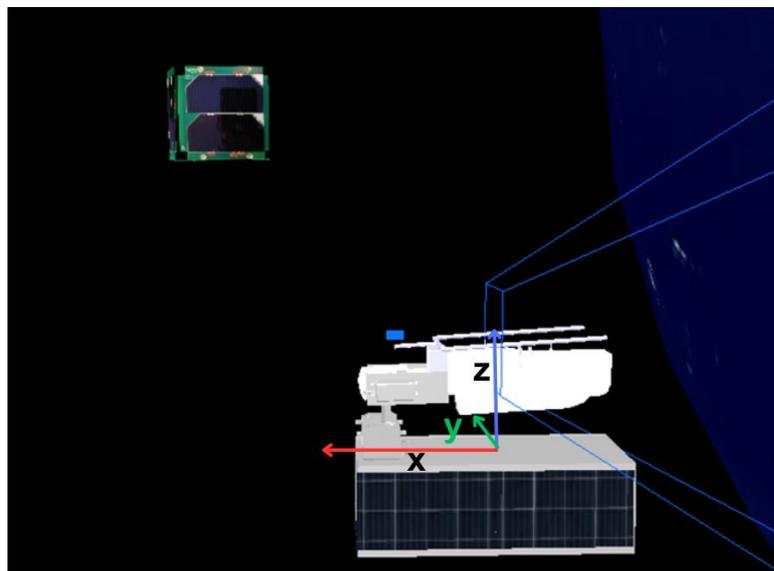
Fonte: O Autor (2023)

Apesar da distância para o TCP, caso a ferramenta de captura seja uma garra ou algum mecanismo que dependa de circunscrever o objeto capturado, a configuração poderia ser suficiente para a captura.

5.2 EXPERIMENTO 2

No experimento 2, o CubeSat foi deslocado 20cm ao longo do eixo \hat{z} , ficando então na posição $[x, y, z] = [30; 0; 40]$ cm em relação à base satelital, conforme ilustra a Figura 32:

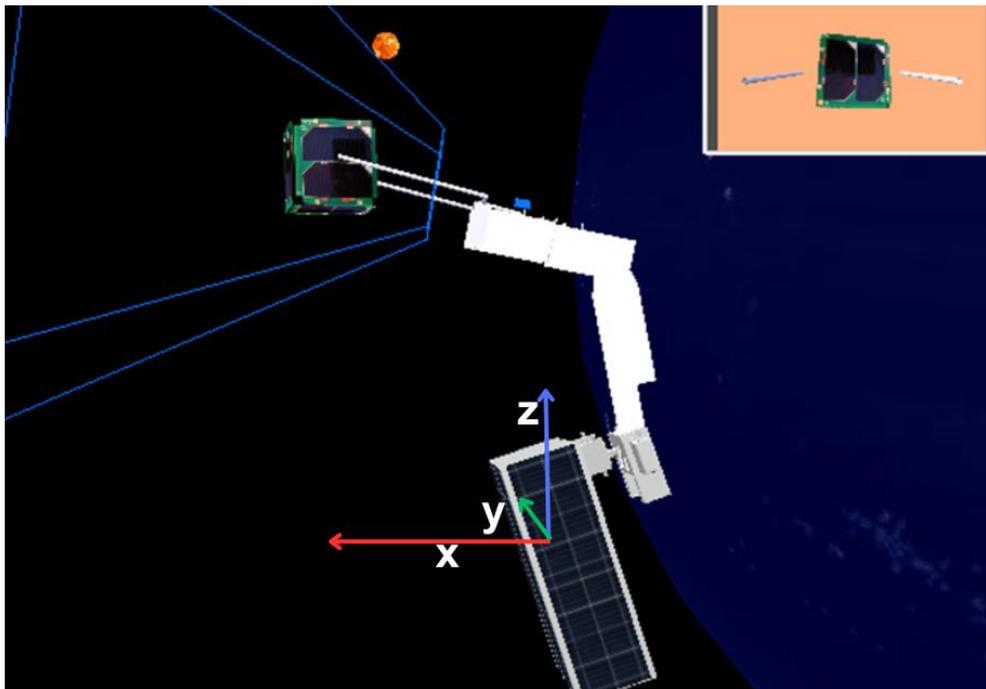
Figura 32 - Posição do CubeSat para o experimento 2.



Fonte: O Autor (2023)

Observou-se, ao final do experimento que, novamente, o rastreamento do CubeSat ocorreu com sucesso, mas o deslocamento da base satelital, mais uma vez teria prejudicado o alcance do braço robótico, chegando à sua aproximação máxima a 14,95 cm do TCP (27,75 cm da câmera) após 61,15s. A posição final obtida pode ser vista na Figura 33, onde foi ilustrada no canto superior direito a imagem gerada pela câmera durante o experimento.

Figura 33 - Posição final de captura no experimento 2.



Fonte: O Autor (2023)

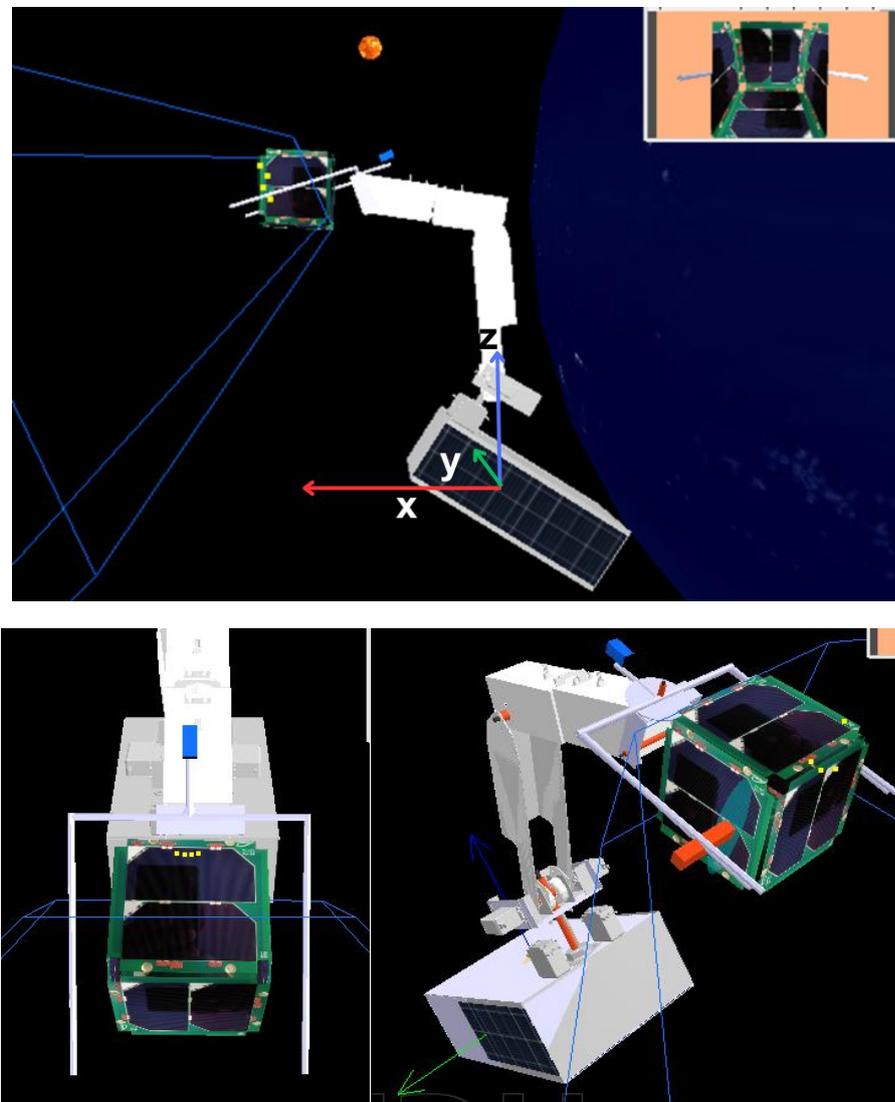
A partir do cenário observado, propõe-se a hipótese de que, ao se aumentar a massa da base satelital para que, ao representar um percentual maior da massa total do robô, seu deslocamento e variação de atitude sejam minimizados e, conseqüentemente, haja a conservação dos momentos linear e angular.

5.2.1 Experimento 2.1

Para verificar a hipótese, manteve-se a posição inicial do CubeSat em $[x, y, z] = [30; 0; 40]$ cm e convencionou-se o aumento da massa do robô para o máximo permitido para um CubeSat 6U: 12kg (máximo de 2kg por módulo) (“CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers”, [s.d.]).

Na Figura 34 percebe-se que o impacto do movimento do manipulador foi visivelmente menor em comparação aos experimentos anteriores, nesse experimento a massa da base satelital passou a representar 87,53% da massa total do robô, ou seja, 10,5kg dos 12kg totais do robô. Verifique-se ainda o posicionamento completo do *CubeSat* no interior da ferramenta, ocupando o TCP. Foi inserido, como sugestão de mecanismo de captura, uma estrutura na ferramenta de captura, (cores vermelha e azul-claro) capaz de pressionar as laterais do *CubeSat* capturado a fim de fixá-lo ao robô. A tarefa levou 43,55 segundos para ser executada, encerrando com o *CubeSat* ocupando o TCP.

Figura 34 – Posição final de captura do experimento 2.1.

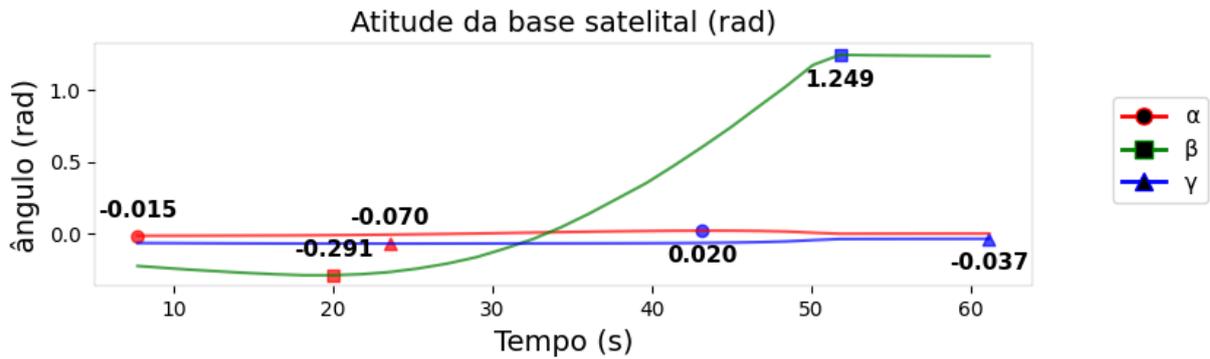


Fonte: O Autor (2023)

Com relação ao deslocamento e variação de atitude da base, pode-se comparar os experimentos 2 e 2.1 através dos gráficos das Figuras 35 e 36,

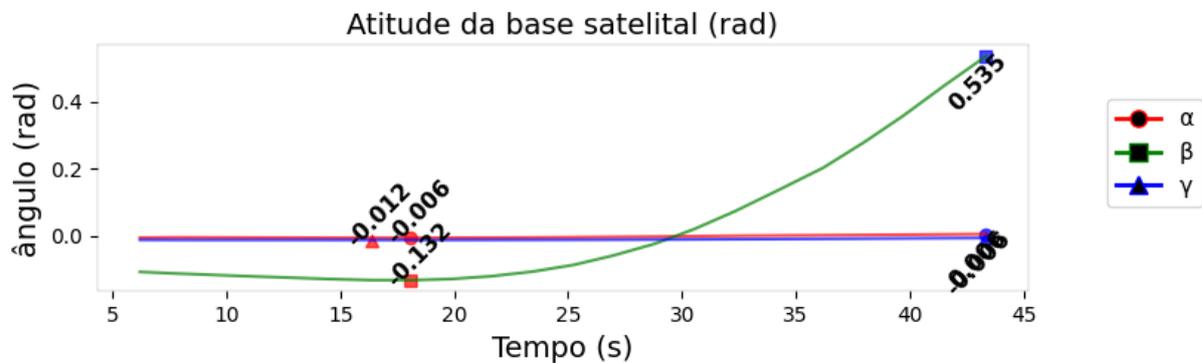
respectivamente, que demonstram uma redução de 0,714 radianos em β . Na Figura 37 percebe-se a redução no deslocamento da base satelital de 3,08 centímetros em \hat{Z} de do experimento 2 para o experimento 2.1. Além das referidas reduções, percebe-se que a trajetória descrita pela base satelital tem um comportamento mais estável no experimento 2.1.

Figura 35 - Variação de atitude da base satelital no experimento 2



Fonte: O Autor (2023)

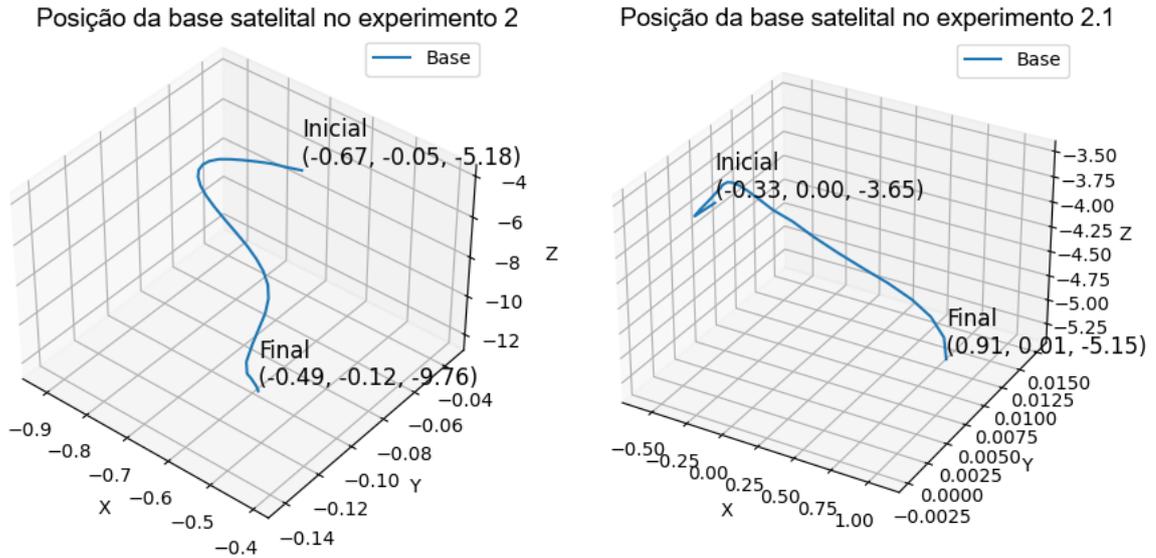
Figura 36 - Variação de atitude da base satelital no experimento 2.1



Fonte: O Autor (2023)

A variação de β se mostra superior a α e a γ devido ao fato que, na maior parte do tempo, o movimento do braço robótico se dá por rotações nos eixos J2, J3 e J5, paralelos a β .

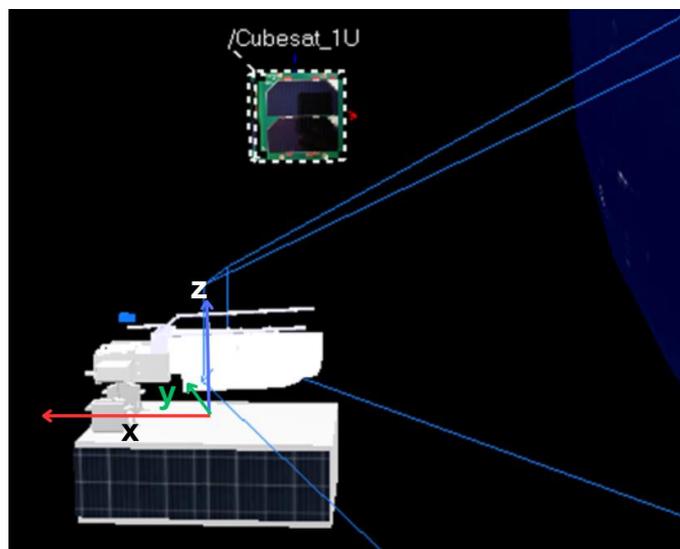
Figura 37 - Deslocamento da base satelital nos experimentos 2 e 2.1



5.3 EXPERIMENTO 3

Para o experimento 3, foi preservada a relação de massa entre base satelital e a massa total do robô assumida no experimento 2.1 (10,5kg para 12kg totais da plataforma), sendo modificada a posição do CubeSat para $[x, y, z] = [-10; 0; 40]cm$, conforme ilustrado pela Figura 38:

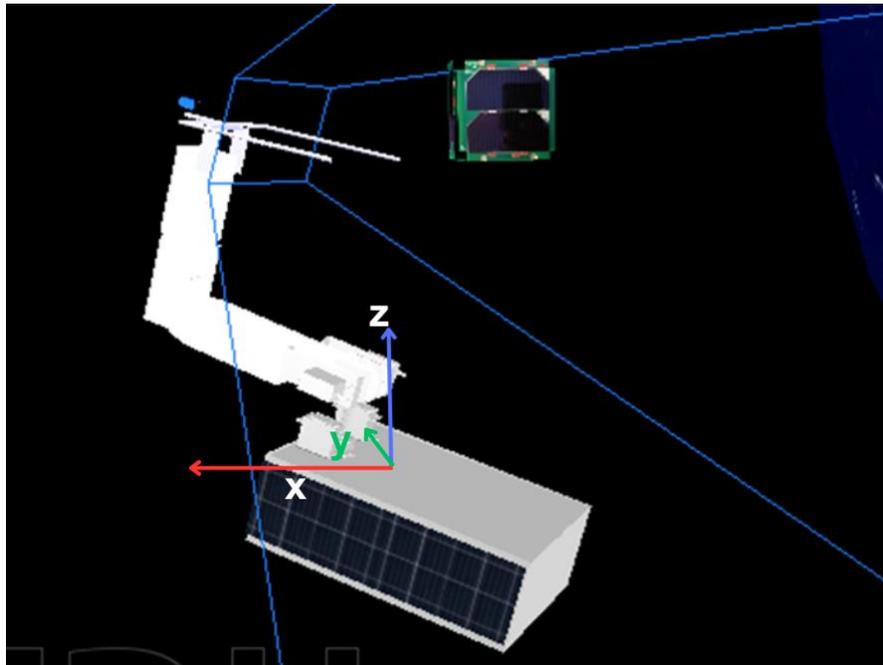
Figura 38 - Posição inicial do experimento 3.



Fonte: O Autor (2023)

Nessas condições, o robô precisa iniciar seu movimento a partir de uma nova posição inicial, em que a junta J1 inicia com valor de 3,14 rad. Tal posição intermediária é ilustrada na Figura 39:

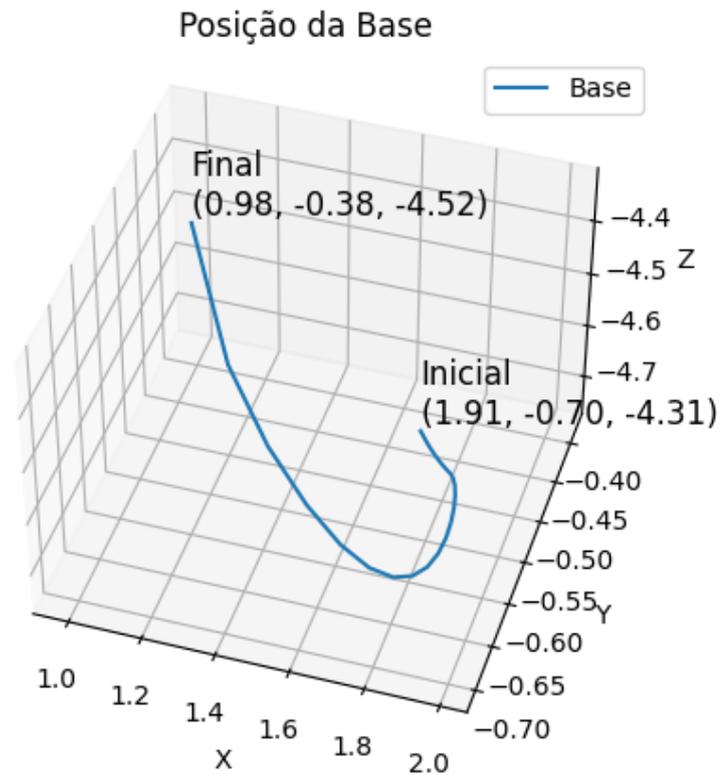
Figura 39 - Posição intermediária do experimento 3



Fonte: O Autor (2023)

A tarefa de captura, iniciando-se a partir da referida posição intermediária, com a captura resulta em uma trajetória contrária da base satelital em relação aos experimentos anteriores. O deslocamento da base no espaço em relação ao seu referencial inercial pode ser visto no gráfico da Figura 40:

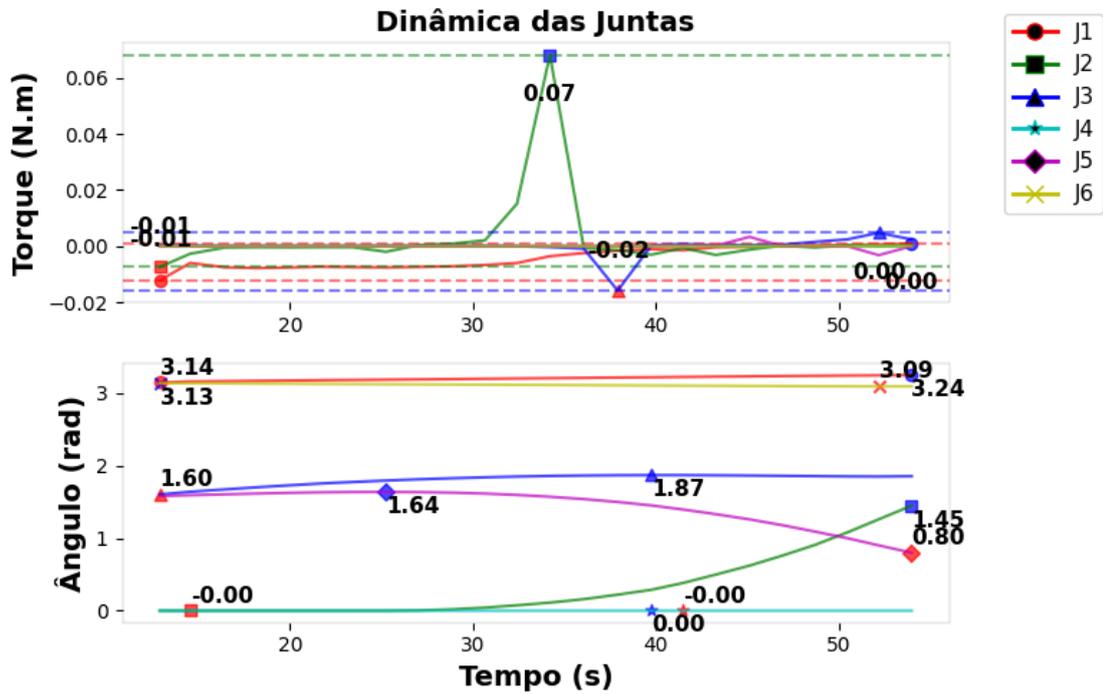
Figura 40 - Deslocamento da base satelital durante o experimento 3



Fonte: O Autor (2023)

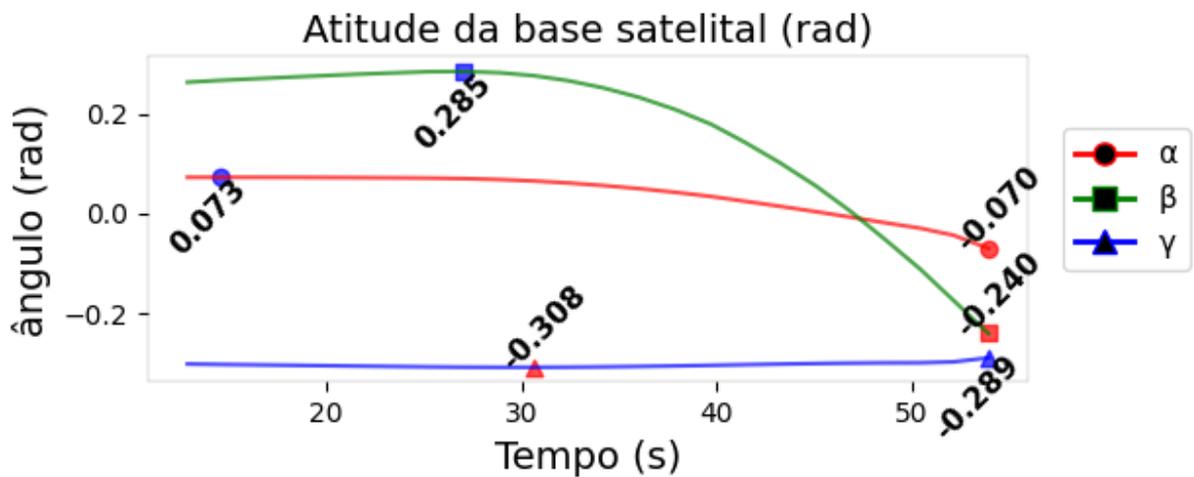
A partir da posição intermediária, deve-se notar que o torque de maior efeito na atitude da base satelital surge a partir da junta J2 (Figura 41) que, na posição intermediária, tem seu sentido invertido em relação à referência da base satelital do robô. O efeito dessa configuração se manifesta conforme pode ser observado no gráfico da Figura 42, em que o ângulo β em torno do eixo lateral \hat{Y} diminui de valor, ou seja, rotaciona no sentido contrário ao dos experimentos anteriores. Percebe-se ainda que, a variação de β foi de 0.525 rad, inferior à do experimento 2.1.

Figura 41 - Valores de torque e ângulo das juntas durante o experimento 3.



Fonte: O Autor (2023)

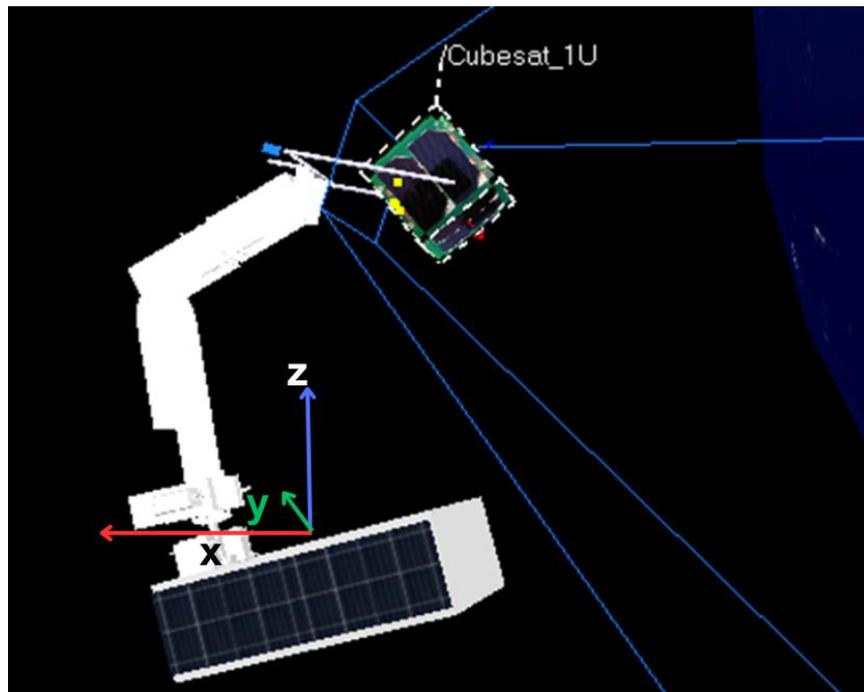
Figura 42 - Variação de atitude da base satelital durante o experimento 3.



Fonte: O Autor (2023)

O experimento 3 teve duração de 53,95 segundos e teve sucesso na captura do CubeSat que, ocupou a TCP (Figura 43).

Figura 43 - Posição final de captura do CubeSat no experimento 3.

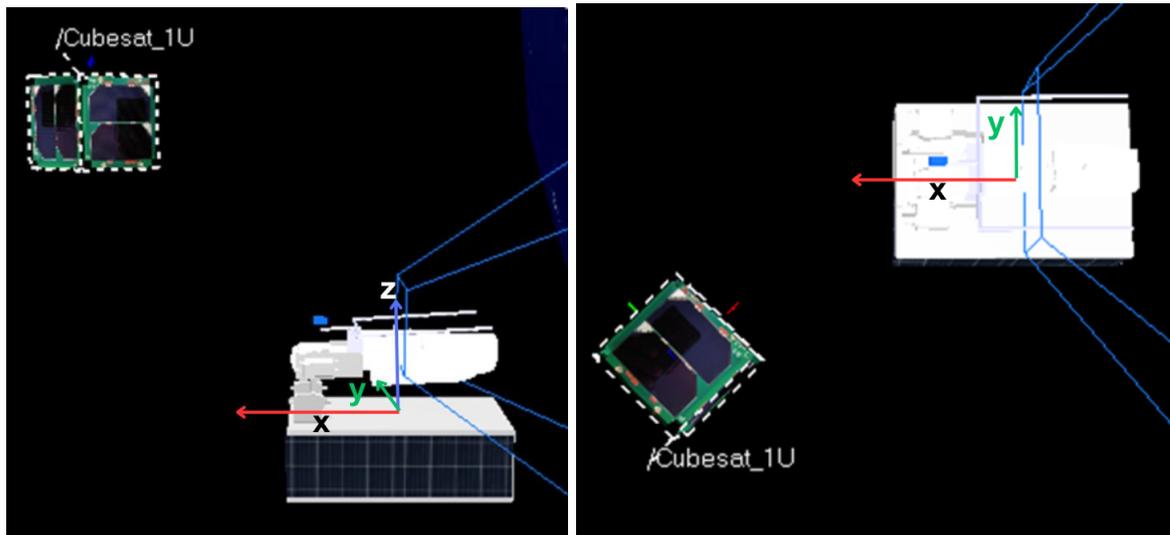


Fonte: O Autor (2023)

5.4 EXPERIMENTO 4

No experimento 4, com o intuito de simular uma condição de detecção inicial do *CubeSat* com maior complexidade (em que o satélite estaria deslocado em relação aos três eixos cartesianos do referencial inercial da base satelital do robô), decidiu-se posicioná-lo a 50 cm de distância, 45° de azimute e 45° de elevação em relação à junta J1 (Figura 44), para que ocupe a região limítrofe do alcance do manipulador. A posição escolhida foi $[x, y, z] = [36,7; -24,8; 42,3]cm$. Além da posição, foi escolhida uma orientação-problema para o *CubeSat*, definida em 45° em torno do eixo \hat{Z} do referencial inercial.

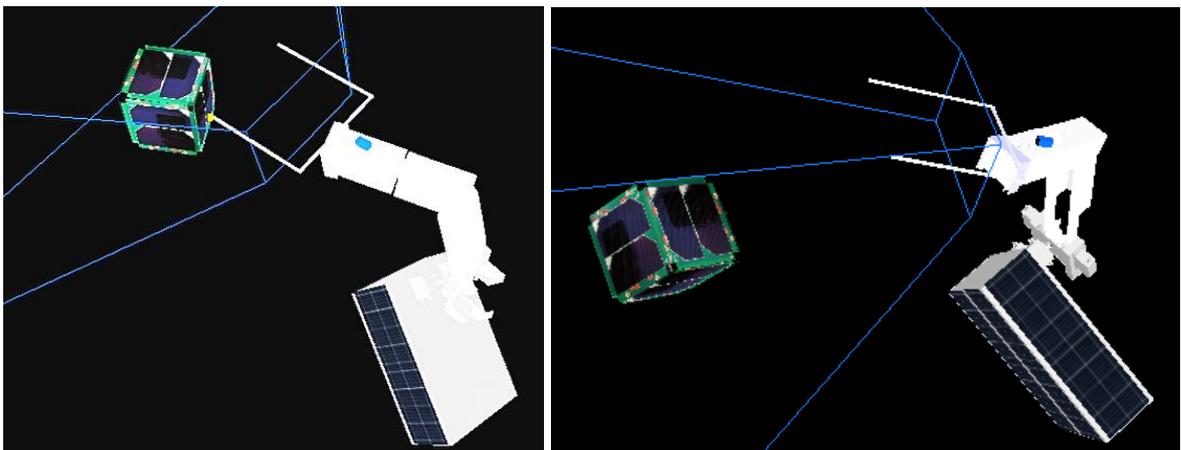
Figura 44 - Vistas ortogonais da posição do CubeSat em relação à base do robô.



Fonte: O Autor (2023)

Na primeira tentativa do experimento 4, no final da aproximação da ferramenta de captura, uma das extremidades da ferramenta colidiu com o *CubeSat* (Figura 45) ao ajustar sua posição lateralmente. A colisão resultou no afastamento dos dois corpos que, em condição de micro gravidade e atrito quase nulo, se propagou de forma constante, impossibilitando a conclusão da captura sem um novo procedimento de *Rendes Vouz*.

Figura 45 - Instante da colisão da ferramenta de captura com o CubeSat no experimento 4.



Fonte: O Autor (2023)

A colisão ocorre, durante a simulação, devido à diferença de intensidade da resposta do algoritmo de controle PID do robô. Essa diferença faz com que o *CubeSat* seja alinhado com o centro da imagem da câmera primeiro verticalmente e depois horizontalmente. A geometria da ferramenta de captura favorece colisões por movimentos laterais.

Uma das soluções possíveis é modificar as constantes de controle aplicadas ao controle lateral. Os testes e os respectivos resultados foram executados conforme ilustrado na Tabela 7.

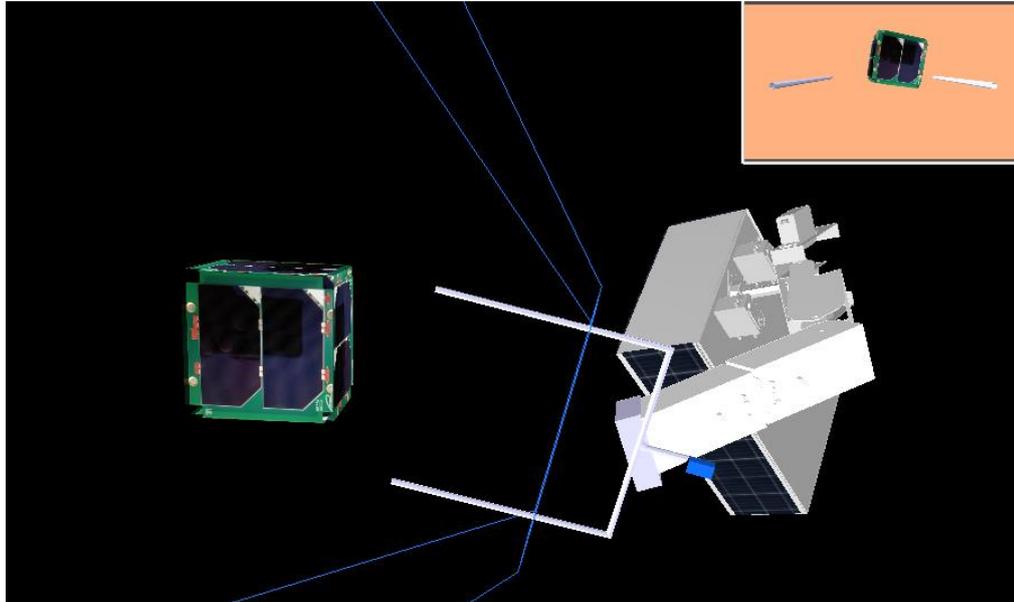
Tabela 7 - Testes de ajuste de constantes de controle PID no experimento 4.

K_p	K_i	K_d	Resultado
0,15	0,0	0,02	Colisão
0,15	0,0	0,05	Colisão
0,2	0,0	0,01	Colisão
0,15	0,01	0,01	Alinhado fora do alcance

Fonte: O Autor (2023)

A quarta condição proposta, implementando $K_i = 0,01$ foi a que apresentou o resultado mais próximo do desejado, em que foi possível alinhar o *CubeSat* no centro da imagem da câmera, mas o alcance fora novamente comprometido. Observe-se na Figura 46 a configuração obtida após a última mudança de constantes PID.

Figura 46 - Tarefa de captura limitada pelo alcance do robô após mudança de constantes PID.



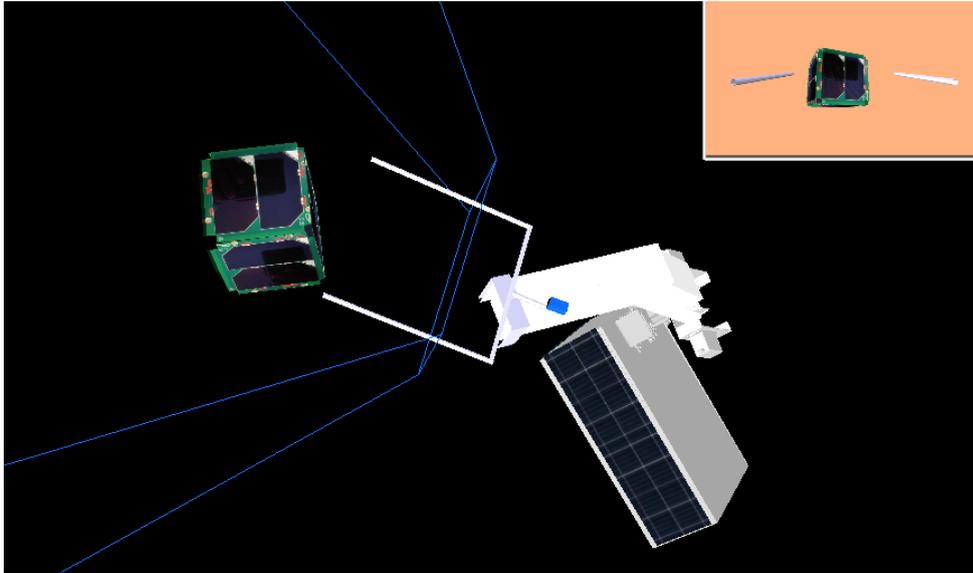
Fonte: O Autor (2023)

Uma possível estratégia para contornar o problema encontrado poderia ser o de modificar a rotina de *software* que movimenta todas as juntas simultaneamente para, de forma sequencial, primeiro alinhar o centro da câmera com o *CubeSat* horizontalmente, e em seguida o alinhamento simultâneo vertical e longitudinalmente (y, z). Tal estratégia poderia reduzir a propagação de erros de uma variável de posição sobre a outra, uma vez que com o deslocamento do manipulador, os quadros de referência da câmera e da base satelital assumem orientações diferentes.

Foi executada uma nova alteração, em que o valor de K_i horizontal voltou ao valor anterior igual a zero e foi aplicada a estrutura condicional mencionada, limitando a Região de Interesse (“ROI” – *Region Of Interest*) da imagem em posições afastadas do centro em até 20% da largura total da imagem, ou seja, entre os pixels 256 e 596 de uma imagem de 853 pixels de largura.

Como resultado, pode-se observar o instante de maior aproximação, em que o braço chega ao seu limite de alcance, em que o *CubeSat* se posiciona a 31,03 cm de distância da câmera (18,23 cm do TCP) *versus* 36,54 cm de distância à câmera (23,74 cm em relação ao TCP) referente à não aplicação da estratégia implementada na rotina de *software*. A posição mencionada pode ser observada na Figura 47.

Figura 47 - Aproximação máxima após implementação de estratégia de controle condicional.

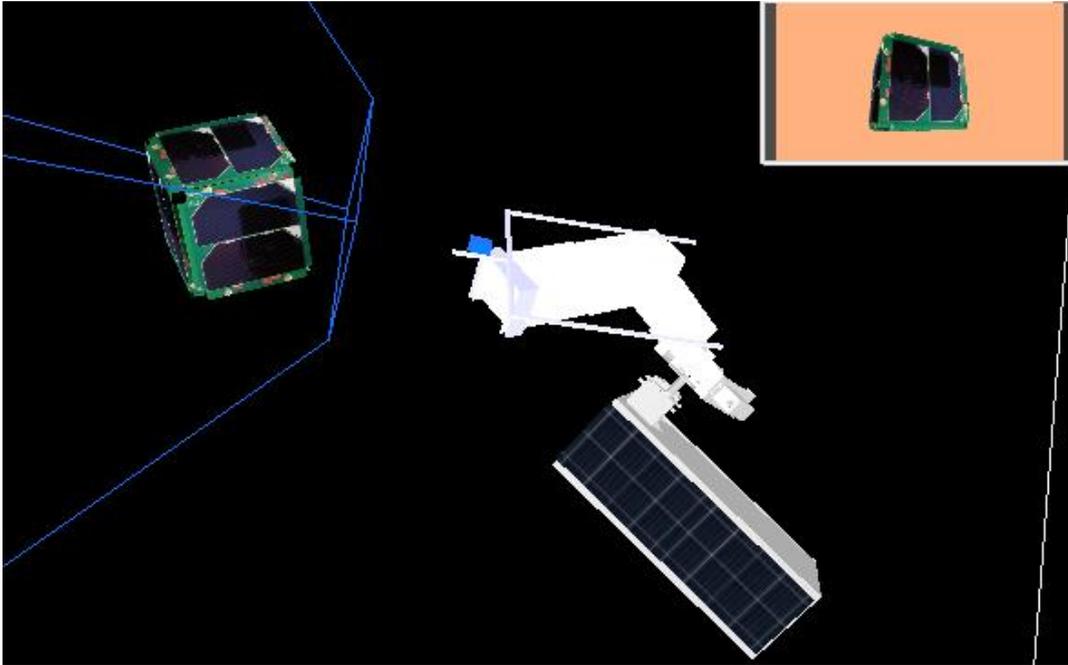


Fonte: O Autor (2023)

Outra possível forma de mitigar a variação de atitude durante a aproximação da câmera ao *CubeSat* pode ser a de manter a ferramenta “recolhida” até o momento da captura. Essa estratégia visa reduzir o momento de inércia do manipulador em relação à base satelital e, conseqüentemente, reduzir a força de reação que causa sua variação de atitude.

Na sexta tentativa, ao implementar o deslocamento com a ferramenta recolhida, o manipulador obteve um melhor desempenho em relação à distância final alcançada em relação ao *CubeSat*: 17,42 cm do que seria o TCP caso a ferramenta estivesse estendida (Figura 48). Perceba-se que, uma vez que a câmera foi posicionada a 3,8 cm de distância do eixo \hat{Z} da junta J6, foi necessário rotacioná-la em 180° em seu eixo vertical para que o rastreamento ocorresse corretamente. Após essa última alteração, deve-se saber que a posição do *CubeSat* em relação à câmera representa agora uma distância inferior em comparação à que ocorreria usando a configuração anterior. A distância calculada de 17,42 cm já foi computada considerando a referida configuração.

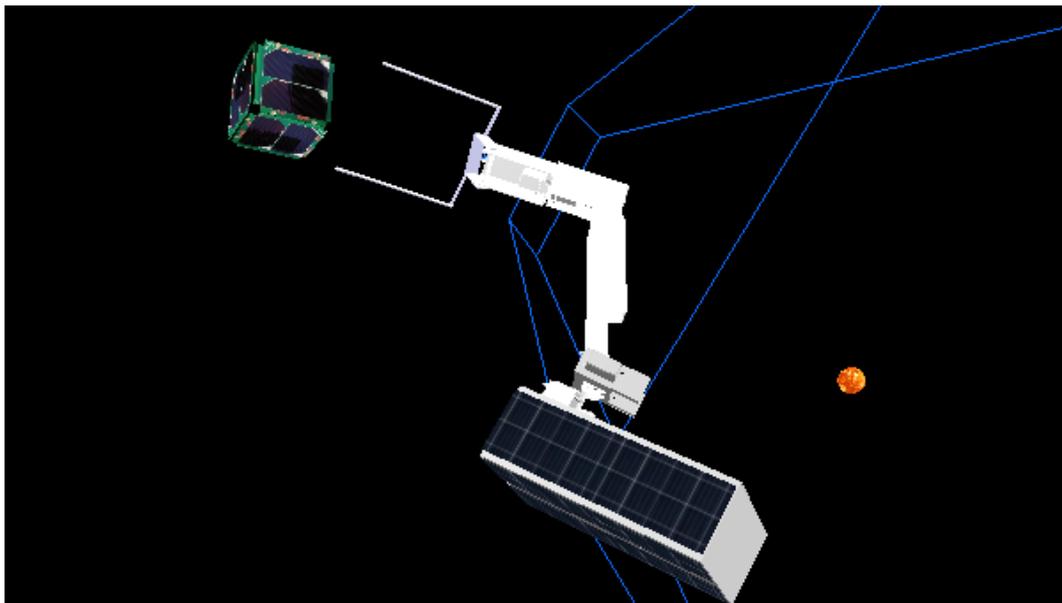
Figura 48 - Instante de maior aproximação com a ferramenta de captura recolhida.



Fonte: O Autor (2023)

Após a ferramenta ser estendida, percebe-se então que o *CubeSat* se encontra fora do alcance do manipulador (Figura 49).

Figura 49 - Posição do manipulador após aproximação máxima e ferramenta de captura estendida.

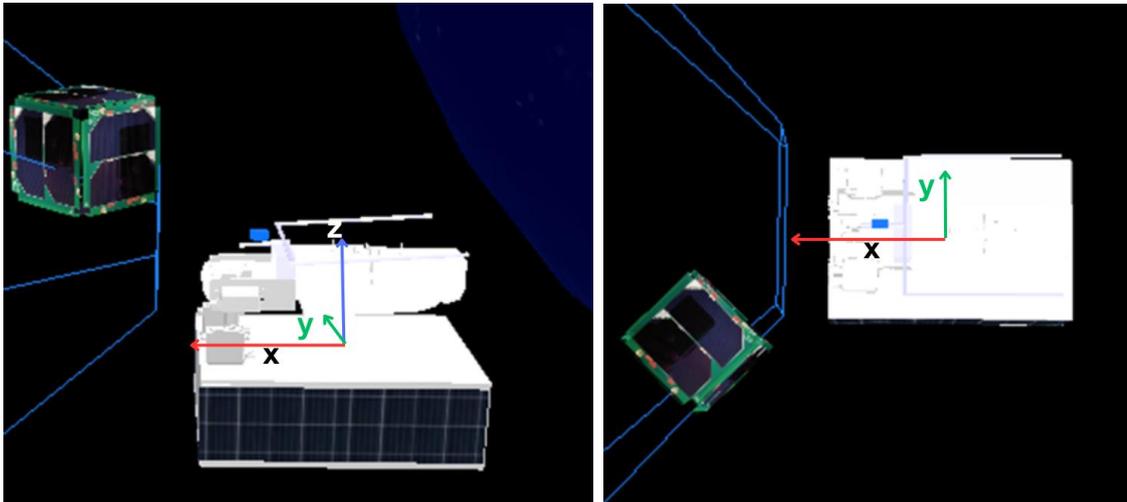


Fonte: O Autor (2023)

5.5 EXPERIMENTO 5

Ainda no intuito de simular uma condição de detecção inicial do *CubeSat* em que o satélite estaria deslocado em relação aos três eixos cartesianos do referencial inercial da base satelital do robô), decidiu-se posicioná-lo, no quinto experimento a 30 cm de distância, 45° de azimuth e 45° de elevação em relação à junta J1, para inseri-lo na provável região de alcance do robô (Figura 50). Nessas condições, a posição do *CubeSat* em relação ao referencial inercial da base satelital é $[x, y, z] = [26,5; -14,9; 31,4]$ cm.

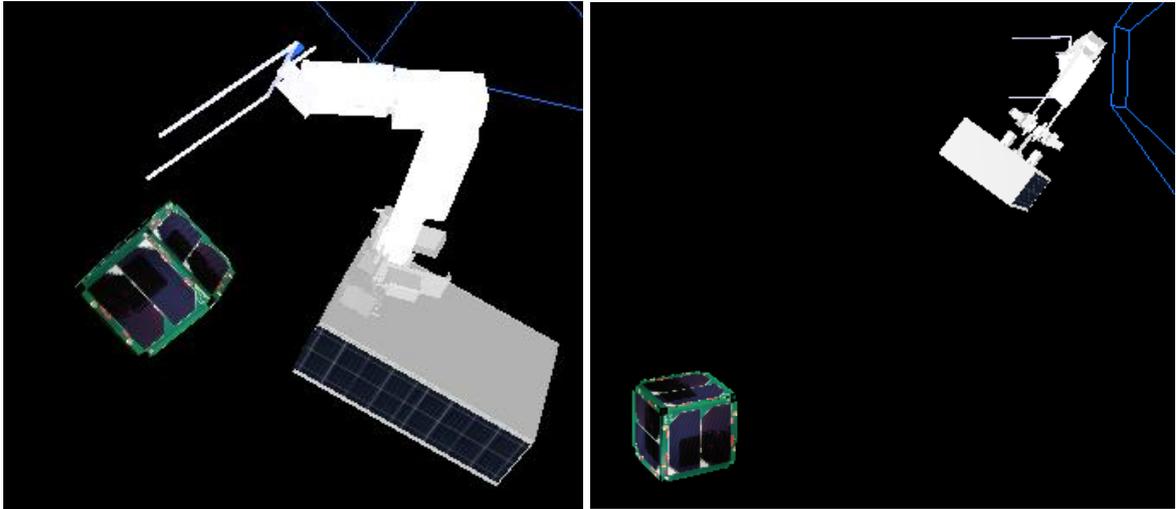
Figura 50 - Posição do CubeSat em relação ao robô.



Fonte: O Autor (2023)

Ao manter a última estratégia do experimento 4, percebeu-se que o movimento de captura aumentou de forma crítica a chance de colisão da ferramenta com o *CubeSat* (Figura 51), uma vez que o movimento é feito sem uso de servocontrole visual tendo em vista a orientação da câmera no sentido oposto da ferramenta. Por esse motivo, decidiu-se retornar à configuração da câmera, bem como a técnica de captura para a definida no experimento 3.

Figura 51 - Colisão entre ferramenta de captura e CubeSat ao aproveitar estratégia de captura do experimento 4 no experimento 5.



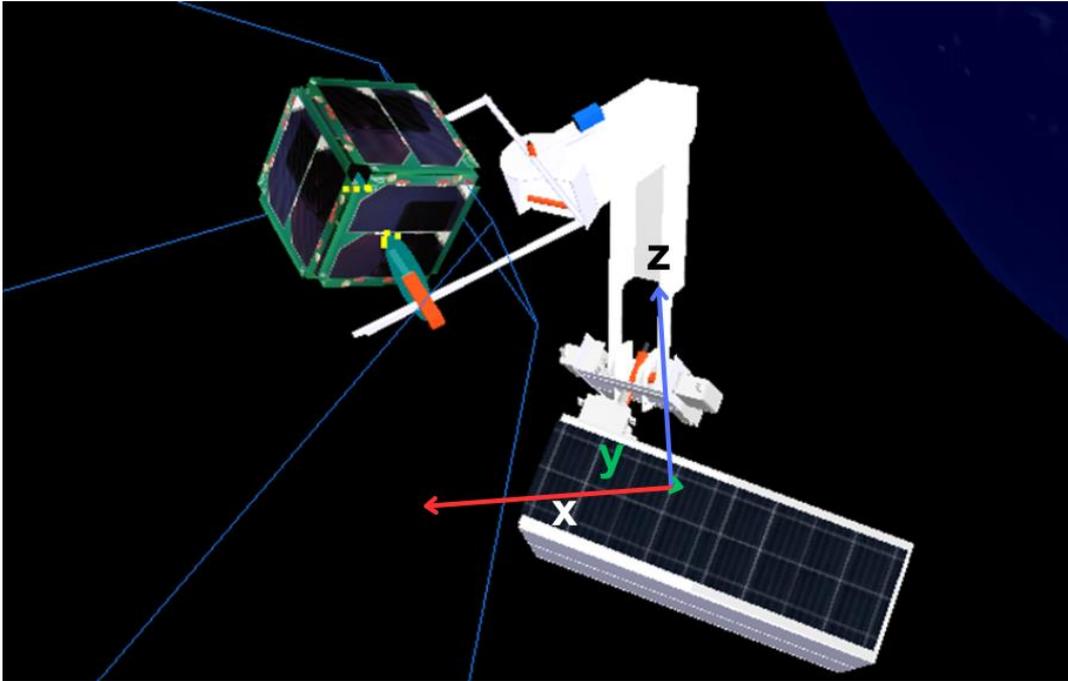
Fonte: O Autor (2023)

5.5.1 Experimento 5.1

Combinando a nova posição do *CubeSat*, dentro do espaço de trabalho do robô com a última técnica de captura bem sucedida, decidiu-se considerar esta adaptação do experimento 5 para avaliar a técnica de captura do *CubeSat* em uma posição limítrofe para validação do modelo dinâmico desenvolvido. A posição inicial é a mesma da Figura 50.

Como resultado, observou-se que o *CubeSat* fora capturado com sucesso, após 59,0 segundos, permitindo ao robô posicionar o *CubeSat* no TCP e acionar as estruturas de fixação do *CubeSat* à ferramenta, conforme ilustra a Figura 52.

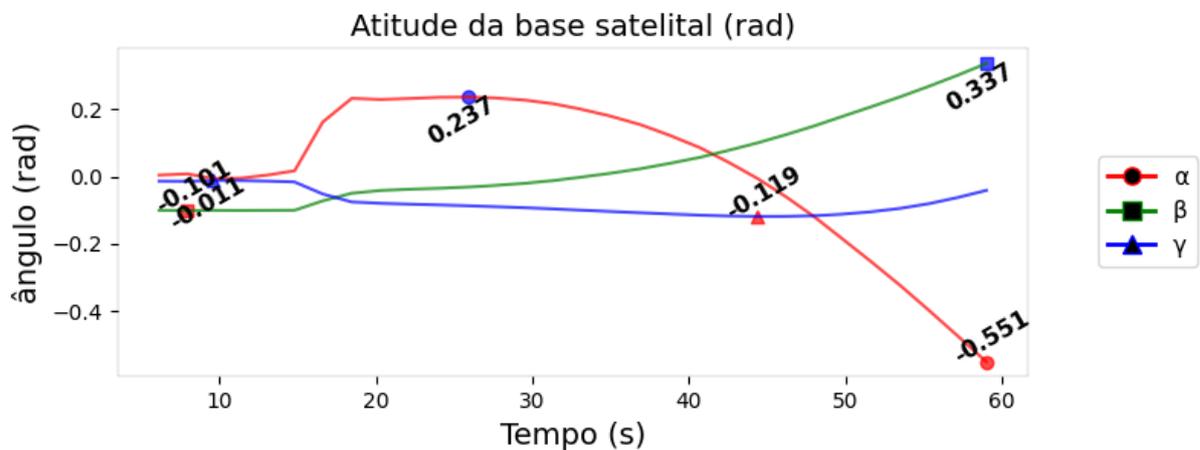
Figura 52 - Instante de captura do CubeSat em posição limítrofe ao alcance durante experimento 5.1.



Fonte: O Autor (2023)

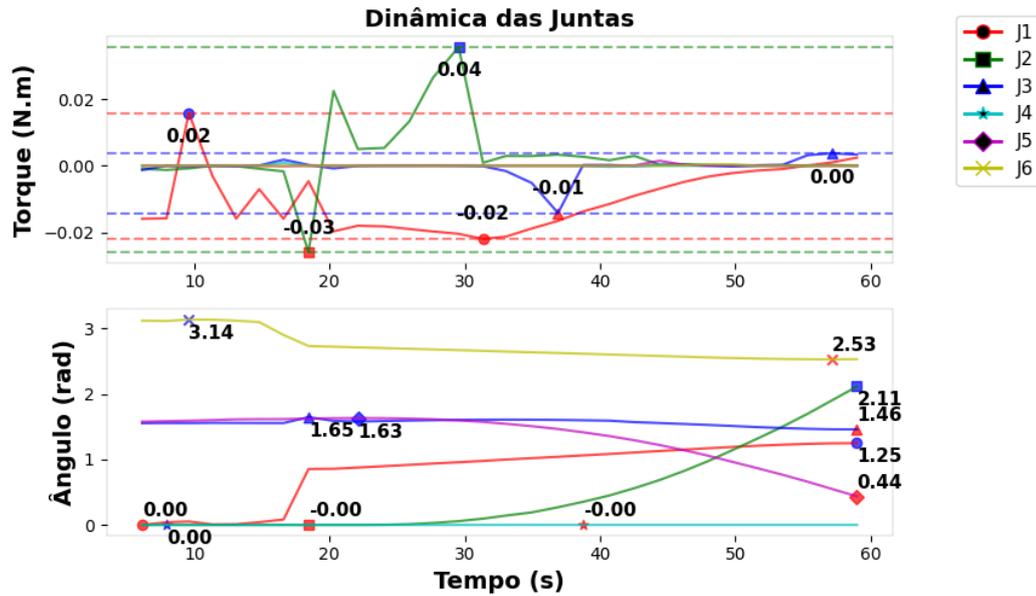
Ao final do experimento, pôde-se perceber que a variação de atitude da base satelital ocorreu sensivelmente em torno dos três eixos de referência inercial (Figura 53). Além disso, percebe-se a oscilação gerada pelo algoritmo de controle visual através dos gráficos de torque e posição angular das juntas do robô presentes na Figura 54.

Figura 53 - Variação de atitude da base satelital ao longo do experimento 5.1.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 54 - Variações de torques e posições angulares nas juntas do robô durante o experimento 5.1



Fonte: O Autor (2023)

5.6 AVALIAÇÃO DOS DADOS DOS EXPERIMENTOS

Ao final dos experimentos, reuniram-se os dados de tempo percorrido, torques, posição e atitude da base satelital de forma a extrair o valor médio de cada uma das variáveis mencionadas, bem como seus valores limítrofes (máximos e mínimos) a fim de delimitar os requisitos de operação do modelo de robô produzido. A Tabela 8 exhibe as médias dos valores obtidos que obtiveram maior variação em cada experimento.

Tabela 8 - Tempo, consumo e valores médios calculados de cada experimento

Experimento	Tempo (s)	Torques (N.m)	Deslocamento (cm)	Atitude (rad)	Consumo (mA.h)
1	55,3	0,004 (J2)	7,1 (\hat{Z})	0,237 (β)	298
2.1	43,3	0,005 (J2)	4,2 (\hat{Z})	0,161 (β)	234
3	53,9	0,005 (J2)	4,5 (\hat{Z})	0,303 (γ)	291
4	141,9	0,008 (J1)	4,3 (\hat{Z})	0,437 (α)	765
5.1	59,0	0,011 (J1)	4,2 (\hat{Z})	0,174 (α)	318

Fonte: O Autor (2023)

Tabela 9 Tempo, consumo e valores máximos obtidos em cada experimento

Experimento	Tempo (s)	Torques (N.m)	Deslocamento (cm)	Atitude (rad)	Consumo (mA.h)
1	55,3	0,055 (J2)	9,75 (\hat{Z})	1,202 (β)	298
2.1	43,3	0,083 (J2)	5,20 (\hat{Z})	0,535 (β)	234
3	53,9	0,068 (J2)	4,77 (\hat{Z})	0,308 (γ)	291
4	141,9	0,027 (J1)	5,12 (\hat{Z})	0,784 (α)	765
5.1	59,0	0,036 (J2)	4,80 (\hat{Z})	0,551(α)	318

Fonte: O Autor (2023)

Tabela 10 - Tempo, consumo e valores mínimos obtidos em cada experimento

Experimento	Tempo (s)	Torques (N.m)	Deslocamento (cm)	Atitude (rad)	Consumo (mA.h)
1	55,3	0,000 (J5)	0,11 (\hat{Y})	0,010 (α)	298
2.1	43,3	0,000 (J5)	0,00 (\hat{Y})	0,000 (α)	234
3	53,9	0,000 (J4)	0,38 (\hat{Y})	0,004 (α)	291
4	141,9	0,000 (J5)	0,03 (\hat{X})	0,005 (α)	765
5.1	59,0	0,000 (J4)	0,00 (\hat{X})	0,002 (β)	318

Fonte: O Autor (2023)

Das Tabelas 8, 9 e 10 podem-se observar os valores ótimos de cada parâmetro, destacados em negrito. Perceba-se na Tabela 8 o experimento 2.1, com melhor desempenho, selecionado por ter o maior número de variáveis com menor média, significando um sistema mais acurado.

6 CONCLUSÕES

A modelagem de um modelo dinâmico de robô manipulador para a tarefa de captura de *CubeSats* “1U” em ambiente de micro gravidade foi desenvolvida, bem como seu sistema de controle baseado em controle híbrido. Foi realizado o estudo de dimensionamento dos motores utilizados, que resultou na escolha dos servomotores “TD-8135”, “MG996R” e “MG90”, sendo distribuídos da base para o efetuator final por ordem decrescente de massa e torque (inclusive para suportar os efeitos da inércia). Como produto desta pesquisa, pôde-se obter o modelo cinemático e dinâmico do robô que pode ser reproduzido obedecendo à sua Matriz Harmônica de Transformação e à sua Matriz Jacobiana.

O modelo foi adicionado a um cenário elaborado no *software* “CoppeliaSim”, assumindo a inexistência de gravidade e considerando a dinâmica gerada pela *engine* “bullet 2.82”. Uma vez configurado o cenário simulado, foi possível executar experimentos simulando o momento após o *Rendez-Vous* entre robô e um *CubeSat* 1U, nos quais o nanossatélite estaria em posições e orientações diferentes em relação à base satelital do robô, a fim de avaliar o desempenho e deduzir a posição de captura ótima.

A partir da fase experimental da presente pesquisa foi possível apontar tempo de captura, torques aplicados sobre as juntas do robô, deslocamento de sua base satelital e variação de atitude da mesma base em 5 situações diferentes, bem como a aplicação de adequações aos modelos físico e de controle diante dos problemas encontrados resultantes dos experimentos. Inicialmente percebeu-se os efeitos da inércia propagada ao longo do corpo do robô deslocam a base satelital de forma que ocorre uma perda significativa no alcance do robô. Sendo assim, percebeu-se que a relação de massa entre a base satelital e o manipulador melhora sensivelmente a resistência do sistema contra a perda de alcance se à medida que a massa da base seja superior à do manipulador. Por esse motivo, os experimentos 2 em diante foram realizados com a base satelital mais massiva, resultando na massa total do robô igual ao limite operacional de um *CubeSat* 6U, ou seja, 12kg.

O algoritmo de controle foi desenvolvido considerando a detecção do *CubeSat* a partir do modelo de rede neural “YOLOv8”, treinada usando uma base de dados de imagens de *CubeSats* combinando imagens encontradas na *web* (“Google Imagens”), o repositório “*CubeSat in Space (Synthetic Unreal Engine Data)*”, composto por

imagens sintéticas de um *CubeSat* 1U em órbita da Terra e ainda imagens cedidas do *CubeSat* “Aldebaran 1”, pelo Laboratório de Eletrônica e Sistemas Embarcados Espaciais (LABESEE) da Universidade Federal do Maranhão. O algoritmo usou então a detecção de objetos do YOLOv8 para estimar a posição do *CubeSat* no plano da imagem da câmera e realizar os cálculos geométricos para estimar também a distância do satélite em relação à câmera.

A partir das informações computadas, aplicou-se o planejamento de trajetória combinado com o controle Proporcional Integral-Derivativo (PID), com constantes proporcional, de integração e de derivação $K_p = 0,1; K_i = 0,01, K_d = 0,01$ para as variáveis de entrada no espaço cartesiano (x, z) e $K_p = 0,15; K_i = 0,0, K_d = 0,01$ para o controle a partir de variáveis de entrada no espaço normalizado do plano da imagem da câmera. Perceba-se que, no caso de variáveis no plano da imagem da câmera, o controle se resume ao Proporcional Derivativo, uma vez que a constante de integração é zero.

Essa circunstância pode ser justificada pelas características intrínsecas da câmera que se baseiam em câmeras dotadas de lentes “fish-eye” que, apesar da imagem gerada ser plana, ela se dá pela projeção de luz através de uma lente angular e, como se sabe, tal relação é não linear por depender de elementos trigonométricos. Essa relação não-linear mostrou-se substituta do elemento integrativo do controle PID, resumindo-o a um controle apenas Proporcional Derivativo (PD).

Sobre o desempenho do robô durante os experimentos, pôde-se observar que o cenário com melhor desempenho, definido pelas menores médias de tempo, torque, deslocamento da base e consumo de baterias, pode sugerir uma configuração ótima para captura do *CubeSat*. O experimento com melhor desempenho foi o experimento 2.1, no qual o robô levou 43,3 segundos desde sua posição inicial da trajetória planejada até a posição de utilização da ferramenta de captura. Nesse contexto, o *CubeSat* foi posicionado a 50 cm do centro de massa da base satelital do robô, na posição $(x, y, z) = [30; 0; 40]$ cm.

Foi observado durante o experimento 4 que a ferramenta de captura pode gerar colisões indesejadas durante a trajetória à captura do *CubeSat*. Sendo assim, optou-se por sugerir, mas não limitar a ferramenta de captura à projetada para o modelo de robô produzido por esta pesquisa. A não fixação de uma ferramenta de captura se justifica por não haverem indícios conclusivos de superioridade de desempenho entre

as opções avaliadas: rede, garra e eletroímã. Portanto, optou-se por não avaliar o movimento de recolhimento do manipulador, ou seja, o que sucederia a captura do *CubeSat*.

Pode-se antecipar ainda que, qualquer uma das ferramentas mencionadas pode ser utilizada para a tarefa de captura, mas foi observado que o uso de rede é útil para contornar distúrbios dinâmicos gerados no contato da ferramenta com o *CubeSat* capturado. No entanto, ao usar rede como ferramenta, o movimento de captura resulta em um aumento significativo de momento de inércia na porção terminal do robô e a sua geometria deve ser tridimensionalmente superior à do *CubeSat*. O uso de garra reduz a chance de colisão, mas depende de motores que aumentam a massa na porção terminal do manipulador. Usar garra como ferramenta torna o sucesso na captura sensível a variações de orientação do *CubeSat*, podendo fazer com que ele “escorregue”. O uso de eletroímã como ferramenta de captura é conveniente por demandar muito menos massa e espaço, mas pode gerar um consumo abusivo de energia das baterias, além de que sua força de anexação dependeria da propriedade ferromagnética do *CubeSat* que, por padrão, é composto principalmente de alumínio e silício que são materiais não-ferromagnéticos.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de combinar novas soluções aos problemas identificados e explorados por esta pesquisa, as seguintes sugestões são oferecidas para trabalhos futuros:

- Desenvolver um modelo de controle inteligente de atitude do robô projetado nesta pesquisa, que compense os efeitos da inércia gerada pelo manipulador;
- Aplicar um estudo utilizando Aprendizagem de Máquina para, através de algoritmos de Regressão (Polinomial, Linear Múltipla, etc.), verificar a existência de uma Equação que possa ser usada para compensar o deslocamento e variação de atitude da base satelital do robô;
- Avaliar a utilização de diferentes ferramentas de captura que possam ocupar a função de efetuator final do robô projetado durante esta pesquisa, bem como sua fase após a captura do *CubeSat*;

- Estudar diferentes combinações de câmeras, bem como de outros sensores que possam ser utilizados (*laser, RADAR, etc.*).

REFERÊNCIAS

- ALEPUZ, J. P.; EMAMI, M. R.; POMARES, J. Direct image-based visual servoing of free-floating space manipulators. **Aerospace Science and Technology**, v. 55, p. 1–9, 1 ago. 2016.
- ARTIGAS, J. et al. **The OOS-SIM: An on-ground simulation facility for on-orbit servicing robotic operations**. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). **Anais...** Em: 2015 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA). maio 2015.
- CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf**. , [s.d.]. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2023
- CRAIG, J. J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. 3rd ed. edição ed. Upper Saddle River, N.J: Pearson, 2004.
- CubeSat**. Disponível em: <<https://www.cubesat.org>>. Acesso em: 24 ago. 2023.
- CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers**. , [s.d.].
- CubeSat in Space (Synthetic Unreal Engine Data)**. Disponível em: <<https://www.kaggle.com/datasets/eberhardtkorf/synthetic-cubesat>>. Acesso em: 12 jul. 2023.
- DA FONSECA, I. M. et al. Attitude dynamics and control of a spacecraft like a robotic manipulator when implementing on-orbit servicing. **Acta Astronautica**, v. 137, p. 490–497, 1 ago. 2017.
- DAVIS, J. P.; MAYBERRY, J. P.; PENN, J. P. ON-ORBIT SERVICING: INSPECTION, REPAIR, REFUEL, UPGRADE, AND ASSEMBLY OF SATELLITES IN SPACE. 24 abr. 2019.
- ESA's Space Environment Report 2023**. Disponível em: <https://www.esa.int/Space_Safety/ESA_s_Space_Environment_Report_2023>. Acesso em: 13 set. 2023.
- FENG, F. et al. A review of the end-effector of large space manipulator with capabilities of misalignment tolerance and soft capture. **Science China Technological Sciences**, v. 59, n. 11, p. 1621–1638, 1 nov. 2016.
- FERNANDES, C.; GURVITS, L.; LI, Z. X. Attitude Control of Space Platform/Manipulator System Using Internal Motion. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 131–163.
- FLORES-ABAD, A. et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 68, p. 1–26, 1 jul. 2014.
- HALL, L. The History of Space Debris. 6 nov. 2014.
- HUANG, P. et al. Dynamics and configuration control of the Maneuvering-Net Space Robot System. **Advances in Space Research**, v. 55, n. 4, p. 1004–1014, 15 fev. 2015.

HUANG, P. et al. Attitude takeover control for post-capture of target spacecraft using space robot. **Aerospace Science and Technology**, v. 51, p. 171–180, 1 abr. 2016.

JANKOVIC, M. et al. Space debris ontology for ADR capture methods selection. **Acta Astronautica**, v. 173, p. 56–68, 1 ago. 2020.

KULU, E. Nanosatellite Launch Forecasts - Track Record and Latest Prediction. 9 ago. 2022.

LI, Z. et al. Rapid satellite capture by a space robot based on delay compensation. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 44, n. 3, p. 363–376, 1 jan. 2017.

LIM, J.; CHUNG, J. Dynamic analysis of a tethered satellite system for space debris capture. **Nonlinear Dynamics**, v. 94, n. 4, p. 2391–2408, 1 dez. 2018.

LINDBERG, R. E.; LONGMAN, R. W.; ZEDD, M. F. Kinematic and Dynamic Properties of an Elbow Manipulator Mounted on a Satellite. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 1–25.

LIU, Y. et al. Robotic hand-arm system for on-orbit servicing missions in Tiangong-2 Space Laboratory. **Assembly Automation**, v. 39, n. 5, p. 999–1012, 1 jan. 2019.

LONGMAN, R. W. The Kinetics and Workspace of a Satellite-Mounted Robot. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 27–44.

LYNCH, K. M.; PARK, F. C. **Modern Robotics**. [s.l.] Cambridge University Press, 2017.

MACDONALD, M.; BADESCU, V. **The International Handbook of Space Technology**. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2014.

MAHIL, S. M.; AL-DURRA, A. **Modeling analysis and simulation of 2-DOF robotic manipulator**. 2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). **Anais...** Em: 2016 IEEE 59TH INTERNATIONAL MIDWEST SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS (MWSCAS). out. 2016.

MASUTANI, Y.; MIYAZAKI, F.; ARIMOTO, S. Sensory Feedback Control for Space Manipulators. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 205–227.

MATARIĆ, M. J. **Introdução à robótica**. [s.l.] Editora Blucher, 2014.

MAYOROVA, V. I.; SHCHEGLOV, G. A.; STOGNII, M. V. Analysis of the space debris objects nozzle capture dynamic processed by a telescopic robotic arm. **Acta Astronautica**, v. 187, p. 259–270, 1 out. 2021.

MCCORMICK, R. et al. **REMORA CubeSat for large debris rendezvous, attachment, tracking, and collision avoidance**. 2018 IEEE Aerospace Conference. **Anais...** Em: 2018 IEEE AEROSPACE CONFERENCE. mar. 2018.

NAKAMURA, Y.; MUKHERJEE, R. Nonholonomic Motion Planning of Free-Flying Space Robots Via a Bi-Directional Approach. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 101–130.

NANJANGUD, A. et al. Robotics and AI-Enabled On-Orbit Operations With Future Generation of Small Satellites. **Proceedings of the IEEE**, v. 106, n. 3, p. 429–439, mar. 2018.

NI, Z. et al. Identification of the state-space model and payload mass parameter of a flexible space manipulator using a recursive subspace tracking method. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 32, n. 2, p. 513–530, 1 fev. 2019.

PANG, W. et al. **BOOM OF THE CUBESAT: A STATISTIC SURVEY OF CUBSATS LAUNCH IN 2003-2015**. 27 set. 2016.

PAPADOPOULOS, E.; DUBOWSKY, S. Dynamic Singularities in Free-floating Space Manipulators. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 77–100.

Rotary atomisers for efficient paint spraying (EN). Disponível em: <<https://keller-druck.com/pt/setores/automoveis/rotary-atomisers-for-efficient-paint-spraying-en>>. Acesso em: 19 mar. 2023.

SEWERYN, K. et al. **The prototype of space manipulator WMS LEMUR dedicated to capture tumbling satellites in on-orbit environment**. 2017 11th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo). **Anais...** Em: 2017 11TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON ROBOT MOTION AND CONTROL (ROMOCO). Wasowo Palace, Poland: IEEE, jul. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8003887/>>. Acesso em: 18 mar. 2023

SICILIANO, B.; KHATIB, O. (EDS.). **Springer Handbook of Robotics**. 2nd edition ed. [s.l.] Springer, 2016.

SUN, C.; WAN, W.; DENG, L. Adaptive space debris capture approach based on origami principle. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 16, n. 6, p. 1729881419885219, 1 nov. 2019.

ULLMAN, M. A.; CANNON, R. H. Experiments in Autonomous Navigation and Control of a Multi-Manipulator, Free-Flying Space Robot. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 269–284.

VAFI, Z.; DUBOWSKY, S. On the Dynamics of Space Manipulators Using the Virtual Manipulator, with Applications to Path Planning. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 45–76.

WANG, B.; MENG, Z.; HUANG, P. Attitude control of towed space debris using only tether. **Acta Astronautica**, The Fifth International Conference on Tethers in Space. v. 138, p. 152–167, 1 set. 2017.

- WANG, D. et al. Coordinated control of tethered space robot using mobile tether attachment point in approaching phase. **Advances in Space Research**, v. 54, n. 6, p. 1077–1091, 15 set. 2014.
- WANG, G. et al. Determination Method of Capture for an Orthogonal Distributed Satellite Capture Device. **IEEE Access**, v. 6, p. 61800–61811, 2018.
- WU, X. et al. Integral dynamics modelling of chain-like space robot based on n-order dual number. **Acta Astronautica**, v. 177, p. 552–560, 1 dez. 2020.
- XIE, Z. et al. Motion control of a space manipulator using fuzzy sliding mode control with reinforcement learning. **Acta Astronautica**, v. 176, p. 156–172, 1 nov. 2020.
- XU, W. et al. On-orbit identifying the inertia parameters of space robotic systems using simple equivalent dynamics. **Acta Astronautica**, v. 132, p. 131–142, 1 mar. 2017.
- XU, Y. et al. Adaptive Control of Space Robot System with an Attitude Controlled Base. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 229–268.
- XU, Y.; KANADE, T. (EDS.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. Boston, MA: Springer US, 1993. v. 188
- YOSHIDA, K.; UMETANI, Y. Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix. Em: XU, Y.; KANADE, T. (Eds.). **Space Robotics: Dynamics and Control**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 165–204.
- ZHANG, F.; HUANG, P. Stability control of a flexible maneuverable tethered space net robot. **Acta Astronautica**, v. 145, p. 385–395, 1 abr. 2018.
- ZHANG, X.; LIU, J. Effective motion planning strategy for space robot capturing targets under consideration of the berth position. **Acta Astronautica**, v. 148, p. 403–416, 1 jul. 2018.
- ZHANG, Z. et al. Dynamics and control of a tethered space-tug system using Takagi-Sugeno fuzzy methods. **Aerospace Science and Technology**, v. 87, p. 289–299, 1 abr. 2019.
- ZHAO, P.; LIU, J.; WU, C. Survey on research and development of on-orbit active debris removal methods. **Science China Technological Sciences**, v. 63, n. 11, p. 2188–2210, 1 nov. 2020.

APÊNDICE A – COMPONENTES DO MANIPULADOR ROBÓTICO

COMPONENTE	MASSA (Kg)	DIMENSÕES (cm)	QUANTIDADE
Motor TD-8135	0,075	(4,0; 2,0; 4,0)	2
Motor MG996R	0,055	(4,0; 1,9; 4,3)	2
Motor MG90	0,013	(2,3; 1,2; 2,8)	2
Bateria Li 18650	0,037	(6,5; 1,8)	8
Raspberry Pi 4	0,05	(8,5; 5,6)	1
Painel solar 2W	0,05	(13,3; 7,6; 0,2)	8
Rolamento 6001-ZZ	0,03	(1,2; 3,2)	3
TOTAL	1,122		26