

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE ESTRUTURA
ROBÓTICA ARTICULADA, AUTÔNOMA E ADAPTATIVA
PARA AQUISIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS E,
DISPERSÃO DE INSUMOS (ERA3CIDI) AGRÍCOLAS EM
ÁREA DE CULTIVO**

José Ricardo Ferreira Cardoso
Professor do Ensino Básico,
Técnico e Tecnológico

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE ESTRUTURA
ROBÓTICA ARTICULADA, AUTÔNOMA E ADAPTATIVA
PARA AQUISIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS E,
DISPERSÃO DE INSUMOS (ERA3CIDI) AGRÍCOLAS EM
ÁREA DE CULTIVO**

Discente: José Ricardo Ferreira Cardoso

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das exigências para a
obtenção do título de Doutor em Agronomia
(Ciência do Solo)

2024

C268d	Cardoso, José Ricardo Ferreira Desenvolvimento de protótipo de estrutura robótica articulada, autônoma e adaptativa para aquisição e classificação de imagens e, dispersão de insumos (ERA3CIDI) agrícolas em área de cultivo / José Ricardo Ferreira Cardoso. -- Jaboticabal, 2024 91 p. : il., tabs., fotos, mapas Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani Coorientador: José Eduardo Pitelli Turco 1. Agricultura digital. 2. Cinemática. 3. Mecânica. 4. Eletrônica. 5. Computação. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE ESTRUTURA ROBÓTICA ARTICULADA, AUTÔNOMA E ADAPTATIVA PARA AQUISIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS E, DISPERSÃO DE INSUMOS (ERA3CIDI) AGRÍCOLAS EM ÁREA DE CULTIVO

AUTOR: JOSÉ RICARDO FERREIRA CARDOSO

ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

COORIENTADOR: JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

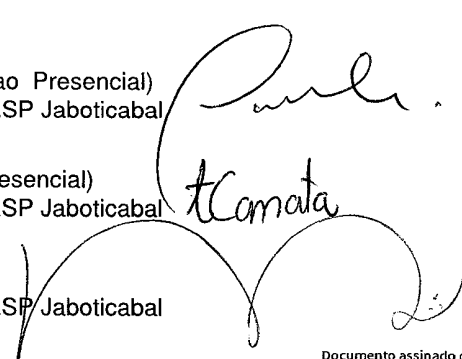
Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Profa. Dra. TATIANA FERNANDA CANATA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. AFONSO LOPES (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof.Dr. JOÃO PAULO LEMOS ESCOLA (Participação Virtual)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo / Barretos/SP

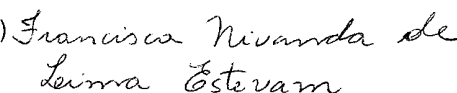
Profa. Dra. FRANCISCA NIVANDA DE LIMA ESTEVAM (Participação Virtual)
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) / Ituiutaba/MG




Documento assinado digitalmente

JOAO PAULO LEMOS ESCOLA

Data: 14/06/2024 09:13:54-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 14 de junho de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

José Ricardo Ferreira Cardoso, nasceu em Barretos/SP no dia 21 de novembro de 1977. É graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em computação e automação pelo Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos (2008), licenciado em Matemática pelo Centro Universitário Claretiano de Batatais (2012), especializado em Metodologia e Didática do Ensino pela “Faculdades Integradas Soares de Oliveira” (2009) e em Desenvolvimento de Web também pelo Centro Universitário Claretiano de Batatais (2012). É doutor (2024) e mestre (2020) em Agronomia (ciência do solo) pela Universidade Estadual Paulista. Desde 2014 é Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico (EBTT) no Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Arquitetura de Sistemas de Computação, atuando principalmente na agricultura digital e desenvolvimento de sistemas inteligentes para as plataformas web, móvel, mesa, embarcados. Foi coordenador de extensão e membro do conselho de extensão no Instituto Federal de São Paulo nos anos de 2014 e 2015.

“(...) A racionalidade baliza os instintos de forma que a espécie que a detém sobreviva às adversidades naturais. (Cardoso, José Ricardo Ferreira)

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que acreditam e me inspiraram a ser a melhor pessoa que eu pudesse ser. Em especial ao meu irmão Luiz Henrique Ferreira Cardoso (in memorian), meu pai José Cardoso (in memorian) e minha mãe Cleide Ferreira Cardoso

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que me cumulou dos dons necessários para desenvolver este projeto. Agradeço também aos meus pais, José Cardoso (*in memorian*) e Cleide Ferreira Cardoso, que me criaram com os valores de respeito, amor e força de vontade; graças a seus ensinamentos consegui atingir os objetivos traçados até aqui. Agradeço a minha esposa Joyce Aparecida Santana Cardoso e minha filha Gabriela Aparecida Santana Cardoso que me suportaram e me apoiaram durante todo o período em que me preparei e desenvolvi este trabalho. Agradeço ao meu irmão Luiz Henrique Ferreira Cardoso (*in memorian*) que sempre me inspirou a buscar a vitória com respeito ao próximo e a si mesmo. Agradeço também aos meus orientadores Carlos Eduardo Angeli Furlani e José Eduardo Pitelli Turco que acreditaram na minha capacidade e me ajudaram sempre que foi necessário. A todos meu muito obrigado.

Sumário

	RESUMO	iv
	ABSTRACT	v
	LISTA DE FIGURAS	x
	LISTA DE TABELAS	xi
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	Solos e suas características	3
2.2	Anatomia e locomoção dos animais domésticos	3
2.3	Robótica e convenções	8
3	MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1	Definição dos requisitos para interação com o solo	14
3.2	Definição das características biológicas	14
3.2.1	Anatomia	14
3.3	Modelo geométrico	15
3.3.1	Protótipo 1	15
3.3.2	Protótipo 2	17
3.4	Modelos cinemáticos	18
3.4.1	Modelo cinemático direto	18
3.4.1.1	Protótipo 1	19
3.4.1.2	Protótipo 2	20
3.4.2	Modelo cinemático inverso	22
3.4.2.1	Protótipo 1	22
3.4.2.2	Protótipo 2	24
3.4.3	Modelo cinemático diferencial e modelo estático	25
3.4.3.1	Protótipo 1	26
3.4.3.2	Protótipo 2	28
3.5	Modelo dinâmico	30
3.6	Modelo CAD e implementação da estrutura mecânica	33
3.7	Simulação da cinemática	35

3.8	Simulação dinâmica	40
3.9	Estrutura mecânica com os servomotores integrados	45
3.10	Estrutura mecânica com os circuitos eletrônicos e de potência integrados	47
3.10.1	Softwares	52
3.10.1.1	Subsistema atuador	54
3.10.1.1.1	Protocolo 45/3	60
3.10.1.1.2	Protocolo 2	61
3.10.1.2	Subsistema de sensoriamento e controle responsivo	62
3.10.1.3	Subsistema pseudo-consciente	65
3.10.1.4	Subsistema supervisor e de controle remoto	67
3.10.2	Teste do protótipo em diferentes texturas	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5	CONCLUSÃO	78
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE A – ALGORITMOS	82

Resumo

Este trabalho de pesquisa e desenvolvimento traz os aspectos construtivos de uma estrutura robótica que tem características mecânicas inspiradas em animais vertebrados presentes no ambiente agrícola ou em paisagens similares. É construída em alumínio e possui desenho que permite a locomoção em solos com diferentes texturas. Cada uma das quatro patas são tratadas a princípio de forma única e independente permitindo uma área de atuação semi-esférica. As articulações rotacionais permite uma movimentação que varia entre intervalos de 135 e 270 graus. Sua abrangência metodológica vai desde a formação da estrutura bio-inspirada, materiais utilizados, configuração sistêmica de hardware e softwares, além de passar pela cinemática direta, inversa, movimentos e velocidades diferenciais, análise dinâmica e de forças. Foram construídos dois protótipos sendo um baseado em búfalo e outro em lagarto. Após a implementação e testes dos protótipos observou-se que o protótipo baseado em lagarto apresentou melhor viabilidade de construção.

Palavras-chave: agricultura digital, cinemática, dinâmica, mecânica, eletrônica, computação

Abstract

This research and development work brings the constructive aspects of a robotic structure that has mechanical characteristics inspired by vertebrate animals present in the agricultural environment or in similar landscapes. It is built in aluminum and has design that allows locomotion in soils with different textures. Each of the four paws is treated at first in a unique and independent way allowing a semi-spherical area of action. The rotational joints allows a movement that varies between intervals of 135 and 270 degrees. Its methodological scope ranges from the formation of the bio-inspired structure, materials used, systemic configuration of hardware and software, as well as passing through direct kinematics, reverse, differential movements and speeds, dynamic and strength analysis. Two prototypes were built and one based on buffalo and one in lizard. After implementation and testing of the prototypes it was observed that the Lizard-Based Prototype presented better construction viability.

Keywords: Digital agriculture, kinematic, dynamic, mechanics, electronics, computing

Lista de ilustrações

Figura 1 – Resistência do solo à penetração nas profundidades de 12 cm (a) e 16 cm (b)	4
Figura 2 – Designações para posição e direção do corpo animal.	5
Figura 3 – Esqueleto do bovino.	6
Figura 4 – Esforço exercido sobre a pata; (il) ílio; (vc) coluna vertebral; (td) diâmetro real; (N) força normal; (F) força de propulsão	7
Figura 5 – Os tipos principais de progressão e as subvariações num movimento lateral, da esquerda para a direita. Os pontos preenchidos fazem referência às patas que exercem o apoio e os círculos vazios às patas que realizam o balanço.	9
Figura 6 – Rotações positivas obtidas pela regra da mão direita.	10
Figura 7 – Rotações positivas obtidas pela regra da mão direita.	11
Figura 8 – Rotações positivas obtidas pela regra da mão direita.	12
Figura 9 – Estágios para o desenvolvimento do protótipo	13
Figura 10 – Estrutura de locomoção da base e patas A) búfalo e B) lagarto.	15
Figura 11 – Diagrama tronco referente ao Protótipo 1 com vistas em A) corte no plano horizontal e B) corte no plano transversal	16
Figura 12 – Diagrama da pata robótica com articulações com mobilidade rotacional de 180°. A) Pata robótica com a apresentação do pseudo fêmur em $\overline{AB}$, pseudo tíbia em $\overline{BC}$ e pseudo falanges em $\overline{CD}$; B) pseudo ílio em $\overline{HI}$ que permite a rotação perpendicular da pata	17
Figura 13 – Diagrama tronco referente ao Protótipo 2 com vistas em A) corte no plano horizontal e B) corte no plano transversal	18
Figura 14 – Diagrama da Estrutura em 3D. A) Estrutura construída em software CAD para a confecção da estrutura física de todo o dispositivo robótico e, B) estrutura modelada geometricamente a ser utilizada para a simulação algébrica de posicionamento por meio das equações de cinemática direta e inversa	34
Figura 15 – Estrutura física do esqueleto do dispositivo referente ao protótipo 1 confeccionada em alumínio	35
Figura 16 – Artefatos utilizados na construção da estrutura física do esqueleto do dispositivo referente ao protótipo 2. A) dobradiça e extensão para servo de 40 kgf.cm; B) Suporte Multifuncional; C) Engrenagens e rolamento de metal para servo de 60 kgf.cm; D) Suporte e extensão para servo de 60 kgf.cm; E) Suporte para servo de 60 kgf.cm; F) Artefato de borracha comumente utilizado como pé de escada	36

Figura 17 – Janelas para simulação da cinemática direta da pata robótica do ERA3CIDI no software GeoGebra referente ao protótipo 1. A) mostra os valores algébricos utilizados para a simulação; B) exibe os controles deslizantes relativos aos ângulos que podem para o ERA3CIDI variar entre -90° e 90° ; C) é a janela de visualização em 3 dimensões dos movimentos realizados pela pata com relação aos ângulos determinados nos controles deslizantes	37
Figura 18 – Janelas para simulação da cinemática inversa da pata robótica do ERA3CIDI no software GeoGebra para o protótipo 1. A) mostra os valores algébricos utilizados para a simulação; B) exibe os controles deslizantes relativos às posições do extremo do último elo que devem estar dentro do espaço de trabalho da pata; C) é a janela de visualização em 3 dimensões dos movimentos realizados pela pata com relação aos ângulos calculados pelos modelos algébricos obtidos pela cinemática inversa	38
Figura 19 – Janelas para simulação da cinemática direta e inversa da pata robótica do ERA3CIDI no software Geogebra referente ao protótipo 2. A) mostra os valores algébricos utilizados para a simulação; B) exibe os controles deslizantes relativos aos ângulos das juntas para a simulação da cinemática direta e, a posição do extremo do último elo que devem estar dentro do espaço de trabalho da pata na simulação da cinemática inversa; C) é a janela de visualização em 3 dimensões dos movimentos realizados pela pata com relação aos elos e ângulos calculados pelos modelos algébricos obtidos pelo estudo cinemático direto e inverso	39
Figura 20 – Janelas para simulação da cinemática inversa da pata robótica do ERA3CIDI no software Geogebra. A) mostra os valores algébricos utilizados para a simulação; B) exibe os controles deslizantes relativos às posições do extremo do último elo que devem estar dentro do espaço de trabalho da pata; C) é a janela de visualização em 3 dimensões dos movimentos realizados pela pata com relação aos ângulos calculados pelos modelos algébricos obtidos pela cinemática inversa	40
Figura 21 – Janelas para simulação dos modelos de velocidades e torques estáticos e dinâmicos	41
Figura 22 – Resultados obtidos através de simulação referente ao protótipo 1. A) velocidade angular em rad/s, B) linear em m/s, C) torque estático em N.m e D) dinâmico em N.m	42
Figura 23 – Janelas para simulação dos modelos de velocidades e torques estáticos e dinâmicos	43

Figura 24 – Servomotores utilizados para propiciar a movimentação controlada dos protótipos. A) Servomotor <i>FEETECH</i> (FT5320M) de 20 kgf.cm; B) Servomotor DSSERVO (DS3230) de 30 kgf.cm; C) Servomotor DSSERVO (DS3240) de 40 kgf.cm; D) Servomotor DSSERVO (DS5160) de 60 kgf.cm; E) Servomotor DSSERVO (DS5180) de 80 kgf.cm.	46
Figura 25 – Artefatos utilizados na construção da estrutura física do protótipo 2 integrados ao servo. A) dobradiça e extensão para servo de 60 kgf.cm e de 80 kgf.cm; B) dobradiça e extensão para servo de 20 kgf.cm, 30 kgf.cm e 40 kgf.cm; C) Módulo pan/tilt com 2 micro servos 9g SG90	46
Figura 26 – Estrutura física do ERA3CIDI referente ao protótipo 1 integrada aos servomotores	47
Figura 27 – Protótipo funcional do robô referente ao protótipo 2 com a configuração A, confeccionado em alumínio. A) Visão superior sobre a estrutura antes que fosse acoplado a câmera PI e o sensor ultrassônico; B) Visão lateral da parte frontal da estrutura com o sensor ultrassônico e a câmera Pi acoplados; C) Imagem do protótipo completo e funcional	48
Figura 28 – Protótipo funcional do robô referente ao protótipo 2 com a configuração B, confeccionado em alumínio. A) Bico cônico regulável azul para pulverização; B) Mangueira de condução hidráulica de 4 mm de diâmetro interno; C) Recipiente plástico de 500 ml; D) Câmera PI NOIR; E) Cabo <i>flat</i> CSI; F) Bateria LiPo de 3.7 V 10000 mAh; G) Módulo GPS Neo-6M; H) Sensor ultrassônico HC-SR04; I) Pata robótica; J) Braço robótico	49
Figura 29 – Protótipo funcional do robô referente ao protótipo 2 com a configuração C, confeccionado em alumínio. A) Visão superior do dispositivo; B) Visão frontal do dispositivo; C) Visão a partir da diagonal direita	49
Figura 30 – Sistema eletrônico de controle e potência utilizados nos protótipos. A) Arduino Uno R3; B) Driver Ponte H para 2 Motores DC + 16 Servomotores; C) Caixa com fusível de 3.0 A; D) Arduino Mega 2560; E) Módulo de regulador de potência da DFRobot; F) Módulo de dois relês	50
Figura 31 – Módulo de pulverização. A) bico cônico regulável para pulverização; B) mini bomba aquática submersa; C) sensor nível boia	50
Figura 32 – Módulos de sensoriamento. A) GPS NEO-6M; B) Sensor GY-87 10 DOF - Acelerômetro e Giroscópio MPU-6050 / Magnetômetro HMC5883L / Barômetro e Temperatura BMP180	51
Figura 33 – Sistema computacional destinado à emulação de uma pseudo-consciência. A) Módulo de regulação e suplementação energética modelo ups v3p; B) Computador Raspberry Pi modelo 4B; C) Bateria de polímero de lítio capas de fornecer 3.7 V a uma taxa de 10000 mAh; D) Case armadura dissipador Raspberry Pi 4 com cooler duplo	51

Figura 34 – Módulos de A) Câmera e B) ultrassom em destaque utilizados nos protótipos	52
Figura 35 – Diagrama organizacional do Sistema	52
Figura 36 – Interface gráfica do sistema supervisorio	53
Figura 37 – Arquitetura de <i>software</i> do ERA3CIDI	53
Figura 38 – Interface gráfica do sistema supervisorio	54
Figura 39 – Movimentação paralela ao solo	55
Figura 40 – Movimentação padronizada	57
Figura 41 – Movimentações ortogonais ao solo em relação às bases de cada uma das patas, com mobilidade apenas das juntas A. A) As patas da lateral esquerda são movidas em sentido horário e as da lateral direita em sentido oposto; B) As patas da lateral esquerda são movidas em sentido anti-horário e as da lateral direita em sentido oposto; C) Todas as patas são movidas em sentido horário; D) Todas as patas são movidas em sentido anti-horário; E) As patas 1 e 4 são movidas em sentido anti-horário e as 2 e 3 em sentido horário; F) As patas 1 e 4 são movidas em sentido horário e as 2 e 3 em sentido anti-horário	58
Figura 42 – Vista lateral dos movimentos ortogonais ao solo em relação à base. A) Extensão de todas as patas que resulta no distanciamento da base em relação ao solo; B) Contração de todas as patas que resulta na aproximação da base em relação ao solo; C) Movimento do tipo arfagem (<i>pitch</i>) com a frente do dispositivo ficando mais próxima ao solo enquanto a traseira fica mais distante; D) Também é um movimento do tipo arfagem (<i>pitch</i>), porém enquanto a parte traseira fica mais próxima ao solo a parte dianteira fica mais distante	59
Figura 43 – Movimentações ortogonais ao solo direcionadas para frente em relação a base. A) Extensão de todas as patas que resulta no distanciamento da base em relação ao solo; B) Contração de todas as patas que resulta na aproximação da base em relação ao solo; C) Movimento do tipo rolagem (<i>roll</i>) com a lateral esquerda do dispositivo ficando mais próxima ao solo enquanto a direita fica mais distante; D) Também é um movimento do tipo rolagem (<i>roll</i>), porém enquanto a lateral direita fica mais próxima ao solo a lateral esquerda fica mais distante	60
Figura 44 – Teste de capacidade motora e de resposta do <i>Software</i> relativos ao Protótipo 1. A) Teste das patas; B) Teste da estrutura suspensa por haste metálica; C) Teste da estrutura sustentando o próprio peso	68

Figura 45 – Teste de capacidade motora e de resposta do <i>Software</i> relativos ao Protótipo 2. A) Teste referente a configuração A; B) Teste pata a pata da estrutura sob a configuração B suspensa por haste metálica; C) Teste referente a configuração B sustentando o próprio peso; D) Teste referente a configuração C sustentando o próprio peso	69
Figura 46 – Teste de capacidade motora e de resposta do <i>Software</i> relativos ao Protótipo 2. A) Teste referente a configuração A; B) Teste pata a pata da estrutura sob a configuração B suspensa por haste metálica; C) Teste referente a configuração B sustentando o próprio peso; D) Teste referente a configuração C sustentando o próprio peso	70
Figura 47 – Local onde os testes do protótipo foi realizado. A) Área lisa; B) Relevos planos com pequenos acidentes e textura baseada em solo batido e levemente poroso	71
Figura 48 – Amostra de marcação realizada para a realização dos testes sobre textura áspera em cimento	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise junta a junta de uma pata referente ao Protótipo 1	19
Tabela 2 – Parâmetros D-H obtida pela análise junta a junta de uma pata referente ao protótipo 2	21
Tabela 3 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise junta a junta do braço robótico	21
Tabela 4 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise do centro de massa elo a elo de uma pata referente ao protótipo 1	31
Tabela 5 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise do centro de massa elo a elo de uma pata referente ao protótipo 2	31
Tabela 6 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise do centro de massa elo a elo do braço robótico	31
Tabela 7 – Tabela de valores de massa em kg de cada uma das partes que compõe a estrutura física	34
Tabela 8 – Tabela para avaliação de mobilidade e segurança de cada junta	69
Tabela 9 – Tabela modelo para avaliação da capacidade motriz sincronizada dos Protótipos sob a estrutura suspensa	70
Tabela 10 – Tabela para avaliação da capacidade de auto-sustentação	70
Tabela 11 – Tabela modelo para avaliação de mobilidade e segurança do dispositivo em diferentes texturas e relevos	72
Tabela 12 – Tabela com os valores qualitativos relativos a verificação da mobilidade e congruência de cada junta do Protótipo 1	73
Tabela 13 – Tabela com os valores relativos a verificação da mobilidade e segurança de cada junta do Protótipo 2	74
Tabela 14 – Tabela para avaliação da capacidade motriz sincronizada dos Protótipos sob a estrutura suspensa	74
Tabela 15 – Tabela para avaliação da capacidade de auto-sustentação	75
Tabela 16 – Tabela para avaliação de mobilidade em textura áspera e relevo plano com inclinação lateral leve para o Protótipo 2 com movimento para frente	75
Tabela 17 – Tabela para avaliação de mobilidade em textura áspera e relevo plano com inclinação lateral leve para o Protótipo 2 com movimento para trás	76
Tabela 18 – Tabela para avaliação de mobilidade em textura de solo batido e relevo plano com pequenas ondulações do Protótipo 2 com movimento para frente	76
Tabela 19 – Tabela para avaliação de mobilidade em textura de solo batido e relevo plano com pequenas ondulações do Protótipo 2 com movimento para trás	76

Lista de abreviaturas e siglas

ACENJ	Ângulo central definido para a junta
AF	Área Foliar
AMAXS	Ângulo máximo nominalmente permitido pelo servomotor
AMINS	Ângulo mínimo nominalmente permitido pelo servomotor
AMXP	Ângulo máximo permitido para a junta
AMINP	Ângulo mínimo permitido para a junta
AOT	Ahead Of Time
AP	Agricultura de Precisão
API	Application Programming Interface
APK	Android Package
ART	Android Runtime
BD	Banco de Dados
CPU	Central Process Unit
CSI	Camera Serial Interface
DAO	Data Access Object
DEX	Dalvik Executable
DGGC	Dispositivo Gerador e Gestor de Conhecimento
DM	Dispositivo Móvel
DRR	Dispositivo Robótico Remoto
DT	Decision Tree
ERACI	Estrutura Robótica para Aquisição e Classificação de Imagens '
ERA3CIDI	Estrutura Robótica Articulada, Autônoma e Adaptativa para Aquisição e Classificação de Imagens e, Dispersão de Insumos
FD	Forma como o Sistema foi Desligado

GC	Garbage Colector
GPIO	General Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
HAL	Hardware Abstraction Layer
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HSV	Hue, Saturation and Value
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDL	Interface Definition Language
IFSP	Instituto Federal de São Paulo
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
JIT	Just in Time
JVM	Java Virtual Machine
KNN	K-Nearest Neighbors
LED	Light Emitting Diode
LiDAR	Light Detection And Ranging
MDM	Multiscale Distance Matrix
ML	Machine Learn
MLP	Multilayer Perceptron
NB	Naive Bayes
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OpenCV	Open Source Computer Vision
ORM	Object Relacionl Mapping
PDI	Processamento de Imagens Digitais

PIXEL	picture elements
QMR	Quantidade Mínima para Regularidade
REST	Representational State Transfer
RF	Random Forest
RGB	Red, Green and Blue
RL	Logistic Regression
RPI	Raspberry Pi
SIG	Sistema de Informação Gerencial
SO	Sistema Operacional
SSH	Secure Shell
SSID	Service Set Identifier
SVM	Support Vector Machine
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TMF	Tempo máximo de Funcionamento
TSF	Tempo que o Sistema Permaneceu em Funcionamento
TTL	Time to Live
UDP/IP	User Datagram Protocol/Internet Protocol
UML	Unified Model Language
Unesp	Universidade Estadual Paulista
URI	Uniform Resource Identifier
URL	Uniform Resource Locator
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
WAN	Wide Area Network
XML	Extensible Markup Language

1 Introdução

O crescimento da demanda por produtos provenientes da atividade agrícola, alinhada com a proteção do eco-sistema, tem exigido maior eficiência dos produtores. Neste sentido, uma região baseada no agronegócio, quando bem gerida profissionalmente, está integrada ao desenvolvimento regional e a estabilidade econômica de um país, além de incentivar o desenvolvimento de tecnologias produtivas ecológicas. Isto tem levado a propostas com foco na otimização da produção que resultam em benefícios econômicos e ambientais. Para atingir esta eficiência na produção agrícola é necessário um planejamento cuidadoso, que deve considerar a composição da paisagem e as políticas socioambientais, o tipo da cultura, as frequentes alterações nos tipos e na quantidade de serviço desenvolvido, sem que com isso, a subsistência e a biodiversidade do local seja prejudicada.

A mecânica, a eletrônica e a computação tem sido amplamente utilizada no processo de melhoria da eficiência nas atividades agrícolas. A redução de custo do próprio maquinário, dos insumos e da mão de obra, com o aumento da intensidade das tarefas no campo tem marcado o ritmo do desenvolvimento das máquinas e implementos agrícolas.

Com esta mesma proposta, vê-se os dispositivos eletrônicos cada vez mais presentes na atividade agrícola, principalmente naquelas dentro do contexto da agricultura de precisão. Todo este ferramental tem recebido bastante atenção da área da computação, com a inserção do conceito de Internet das Coisas (Internet of Things - IOT) corroborando para integrar todo o maquinário agrícola, sensores e dispositivos de geolocalização com diversas outras tecnologias computacionais como, a inteligência artificial, rede de computadores, realidade virtual e aumentada etc.

As características do local onde acontecem o cultivo influenciam na escolha dos equipamentos utilizados. Assim, o planejamento das operações deve considerar o tipo do solo e a declividade do local, bem como a cultura implantada e o cronograma das operações. É importante considerar que a textura do solo e a compactação resultante da tensão sobre ele influenciam diretamente no desenvolvimento da planta cultivada. Um aspecto importante a ser considerado é que, em áreas de alta declividade, como aquelas onde ocorrem a agricultura de montanha, os requisitos inerentes à esta característica não são atendidos pelos maquinários agrícolas convencionais. Dentro deste contexto, em áreas com declividade acima de 35°, os robôs agrícolas existentes precisam ter seu trajeto cuidadosamente planejado para evitar danos no equipamento ou até mesmo nos seres humanos presentes no local.

Um olhar mais cuidadoso sobre os seres vivos permite encontrar traços fisiológicos importantes e necessários para sua sobrevivência. É graças a esta adaptação que algumas

espécies, dentre elas, o búfalo *Bubalus murrensis* europeu se sustentaram após grandes mudanças climáticas e ambientais (VISLOBOKOVA et al., 2021). Outro aspecto relevante é observado na evolução adaptativa morfológica do esqueleto locomotor dos lagartos da Grande Anolis, que evoluiu dentro de um subconjunto de morfologias possíveis e altamente acessíveis por meio de mudança genética (FEINER et al., 2020).

É plausível afirmar aqui, que a criação de estratégias artificiais, fruto da evolução do cérebro humano, tem contribuído e ainda contribui para aumentar a eficiência na produção agrícola. Neste sentido, um sistema robótico agrícola, autônomo, robusto e eficiente deve ser capaz de propiciar a otimização da produção e a manutenção da segurança alimentar e de outros produtos.

Esta pesquisa parte da hipótese h_0 de que uma estrutura robótica que unifica aspectos resultantes da evolução natural, com aqueles obtidos artificialmente pode contribuir com a formação de um organismo robótico capaz de se adequar as diferentes características de solo. De outra forma uma contra hipótese h_1 refuta h_0 parcialmente ou totalmente por meio da apresentação de resultados de testes que demonstram a inviabilidade de custo e da não efetividade e segurança em mobilidade.

Como um meio de corroborar com a hipótese é apresentado o estudo e resultado da abstração das características de bubalinos e lagartos, que os permitem locomover e transportar cargas em diferentes terrenos, com textura e declividades diversificadas, em um protótipo de estrutura robótica móvel capaz de carregar dois tipos de substâncias líquidas, a serem definidas pelo agricultor. Esse objetivo é justificado pela grande atenção que as estruturas robóticas tem tido por parte do meio acadêmico, industrial e comercial, com presença cada vez maior nos ambientes de produção agrícola.

2 Revisão de literatura

2.1 Solos e suas características

Por meio das alterações da rocha em solo são criados substratos que permitem uma maior disponibilidade de água e nutrientes. Esses substratos estão correlacionados com a vida e outras funções multivariadas exercidas pelo solo. Dentre os minerais advindos destas transformações as argilas têm grande destaque pela grande atividade físico-química que também influencia no comportamento do solo (RESENDE, 2011).

Hoje a necessidade de solos com fertilidade natural não é mais um limitador de produtividade. A razão disso é que a pesquisa científica e tecnológica orientou o caminho para que a agricultura baseada no uso de corretivos passasse a ocupar área antes consideradas improdutivas (RAIJ, 2017).

O desenvolvimento das plantas são influenciados por fatores físicos, mineralógicos e químicos e biológicos. O primeiro corresponde à sua estrutura e textura. Os fatores mineralógicos e químicos, de forma geral e ampla, correspondem a atributos relacionados com a composição mineralógica do solo, disponibilidade de nutrientes, presença de elementos tóxicos, presença de metais pesados, teor de matéria orgânica, reações de sorção, precipitação, redução e oxidação e, salinidade. Já os efeitos dos fatores de natureza biológica sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas estão relacionados com a atividade dos microrganismos do solo e geralmente advém de exsudatos das próprias plantas e de microrganismos que vivem nesta zona (MEURER, 2007).

Em seu artigo (BOTTEGA et al., 2022) os resultados de sua pesquisa em que atribui ao manejo inadequado, sem o devido respeito a faixa recomendada de umidade do solo para a realização de operações agrícolas mecanizadas. Conforme o gráfico apresentado na Figura 1 a resistência à penetração nas profundidades de 12 e 16 cm são predominantemente da ordem de 5,2 e 7,2 MPa.

2.2 Anatomia e locomoção dos animais domésticos

A anatomia comparada descreve e compara as estruturas dos animais de modo a estabelecer os critérios para a sua classificação dentro da morfologia. Na anatomia veterinária são analisadas a forma e a estrutura de animais e, neste contexto a osteologia descreve o esqueleto, a sindesmologia as juntas e, a miologia os músculos e estruturas acessórias que promovem o movimento dos ossos e articulações, dentre outras (GETTY, 2008).

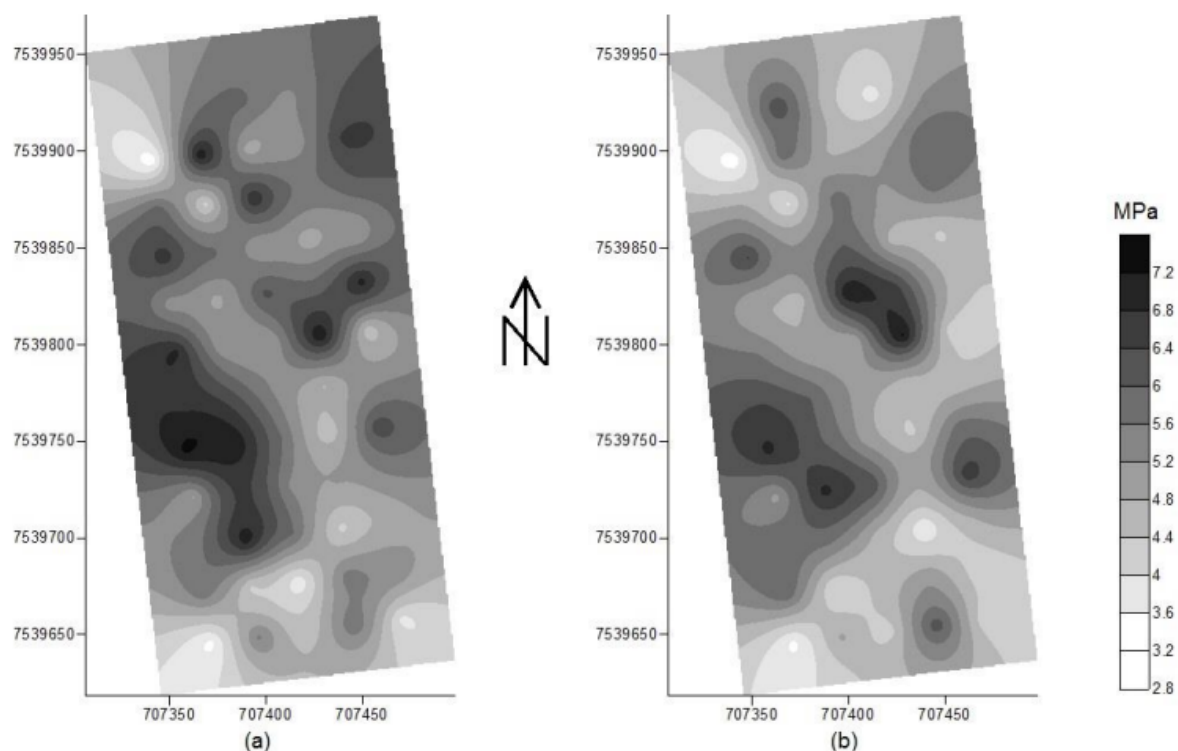


Figura 1 – Resistência do solo à penetração nas profundidades de 12 cm (a) e 16 cm (b).
Fonte: (BOTTEGA et al., 2022)

A anatomia topográfica designa os métodos pelos quais as posições relativas das várias partes do corpo são rigorosamente determinadas. Deste modo a superfície orientada em direção ao plano de apoio é denominada ventral e a superfície oposta, dorsal. O plano mediano longitudinal divide o corpo em metades similares. Uma estrutura ou superfície que está mais próxima do plano mediano do que uma outra é chamada medial a ele, e um objeto ou superfície que está mais distante do plano medial do que um outro é chamado lateral a ele. Os planos paralelos ao medial são sagitais. Os planos transversos cortam o eixo mais longo do corpo perpendicularmente ao plano mediano, ou um órgão ou membro em ângulos retos ao seu eixo mais longo. Um plano frontal é perpendicular aos planos mediano e transversal. Ao lado do corpo mais próximo à cabeça é denominado cranial e o mais próximo a cauda, caudal. Com respeito às partes da cabeça, os termos correspondentes são rostral e caudal. Proximal e distal expressam distâncias relativas das partes em relação ao eixo longo do corpo. Abaixo do carpo os termos usados são dorsal e palmar e abaixo do tarso, dorsal e plantar. Os termos superficial e profundo são úteis para indicar distâncias relativas a partir da superfície do corpo (KÖNIG; LIEBICH, 2021).

O número dos ossos do esqueleto de um animal varia com a idade, dependendo da fusão, durante o crescimento de elementos esqueléticos que estão separados no feto ou no indivíduo jovem (GETTY, 2008). A Figura 3 ilustra os ossos do bovino.

A coluna vertebral é formada por uma série de ossos chamados vértebras que

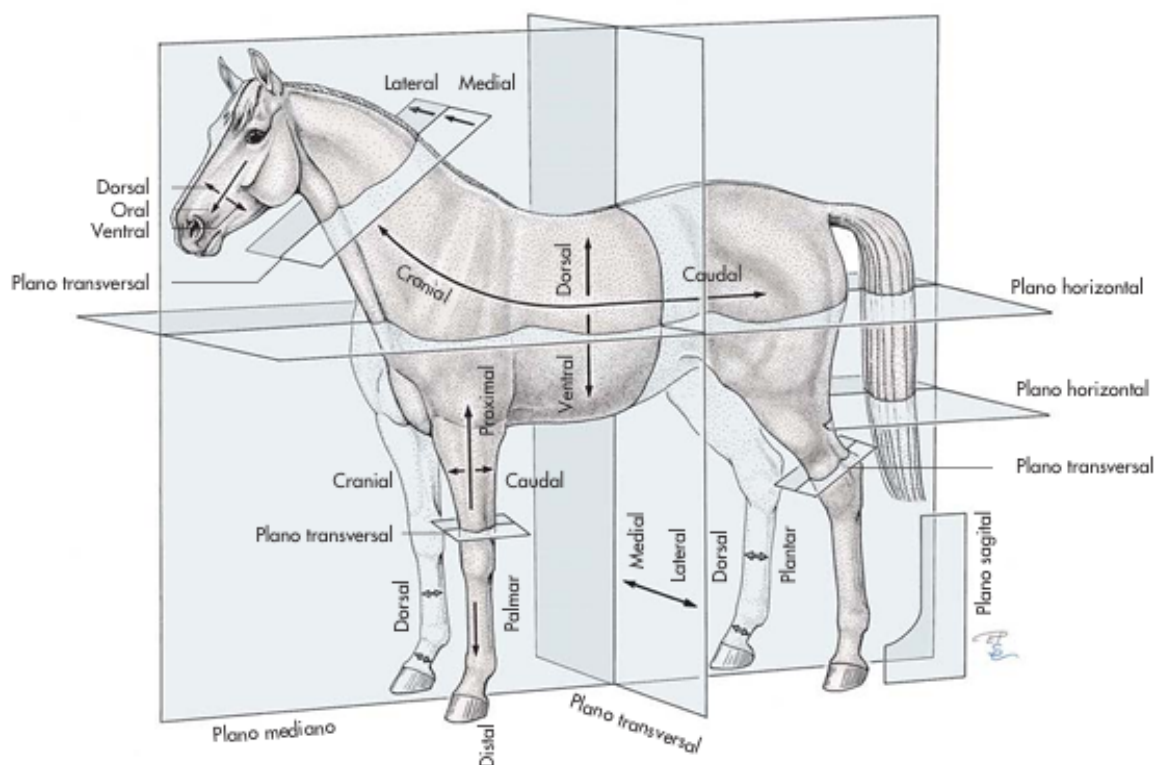


Figura 2 – Designações para posição e direção do corpo animal.

Fonte: (KÖNIG; LIEBICH, 2021)

consiste de uma cadeia mediana, ímpar, de ossos irregulares que estendem-se do crânio à extremidade da cauda. O arco está formado sobre a face dorsal do corpo e consiste originalmente de duas metades laterais, cada uma das quais é constituída de um pedículo ventral e uma lâmina dorsal. As costelas são ossos alongados e encurvados, que formam o esqueleto das paredes laterais do tórax. O braço tem um único osso longo chamado de úmero. No antebraço há dois ossos, o rádio e a ulna que variam quanto ao tamanho e mobilidade. Nos bovinos e equinos estes dois ossos são fundidos e sua parte distal é fixada na posição de pronação. O rádio está colocado cranialmente e suporta o próprio peso. A ulna é bem desenvolvida somente em sua parte proximal, que forma uma alavanca para os músculos extensores do cotovelo. O carpo tem um grupo de ossos pequenos. O metacarpo tem tipicamente cinco ossos metacárpicos, um para cada dedo, são ossos longos e designados numericamente do lado radial ou ulnar. Nos equinos, o primeiro e quinto metacárpicos estão ausentes, o terceiro é o grande osso metacárpico que suporta e carrega o único dedo, enquanto que o segundo e quarto são muito reduzidos. Nos bovinos e nos bovinos e ovinos estes dois ossos estão fundidos. O membro pélvico, como o torácico, consiste dos segmentos cingulo pélvico, coxa, perna e pé (KÖNIG; LIEBICH, 2021).

O osso coxal consiste primariamente do ílio, ísquio e pube. O ílio é divisível em duas partes, o corpo e a asa. A porção dorsal, conhecida como tuberosidade ilíaca, é elevada e rugosa para inserção do ligamento sacro-ilíaco dorsal. O ísquio forma a parte caudal do

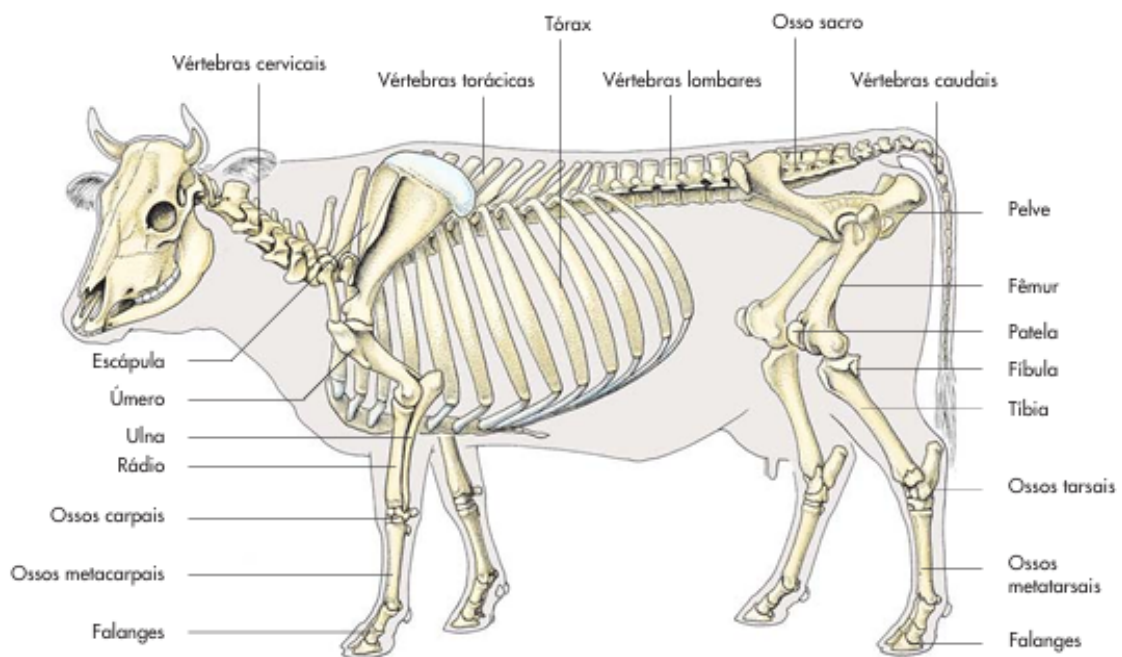


Figura 3 – Esqueleto do bovino.

Fonte: (KÖNIG; LIEBICH, 2021)

osso do quadril ou coxa e entra na formação do acetábulo. O pube é divisível em um corpo e um ramo cranial e caudal. O acetábulo é uma cavidade cotiloide que aloja a cabeça do fêmur. O esqueleto da coxa é composto do fêmur e da patela. A patela é um osso curto que se articula com a tróclea da extremidade distal do fêmur. O esqueleto da perna compreende dois ossos, a saber, a tibia e a fíbula. A tibia é um osso longo, grande e prismático que suporta e articula-se distalmente com o tálus. A fíbula está situada ao longo da borda lateral da tibia, da qual está separada pelo espaço interósseo da perna. O esqueleto do pé consiste do tarso, metatarso e dedos (KÖNIG; LIEBICH, 2021).

De acordo com (GETTY, 2008), a anatomia dentro da biologia lida com a forma e a estrutura dos organismos. Neste caso, por meio de estudo é possível inferir que a distribuição mais favorável do esforço de animais se dá quando a carga está sobre o eixo do osso e, quando o esforço exercido, principalmente pela ação de músculos, é distribuído sobre uma área tão extensa quanto possível (Figura 4). No caso de uma carga axial N sobre uma área A , o esforço de compressão é distribuído igualmente sobre a secção (Equação 2.1).

A força propulsora total de um membro é a soma de sua ação como suporte e alavanca, e isto significa que há uma componente vertical exercida pelo membro contra o corpo, a qual afeta o momento fletor total acerca de cada uma das juntas intervertebrais, e a componente horizontal que exerce a força propulsora.

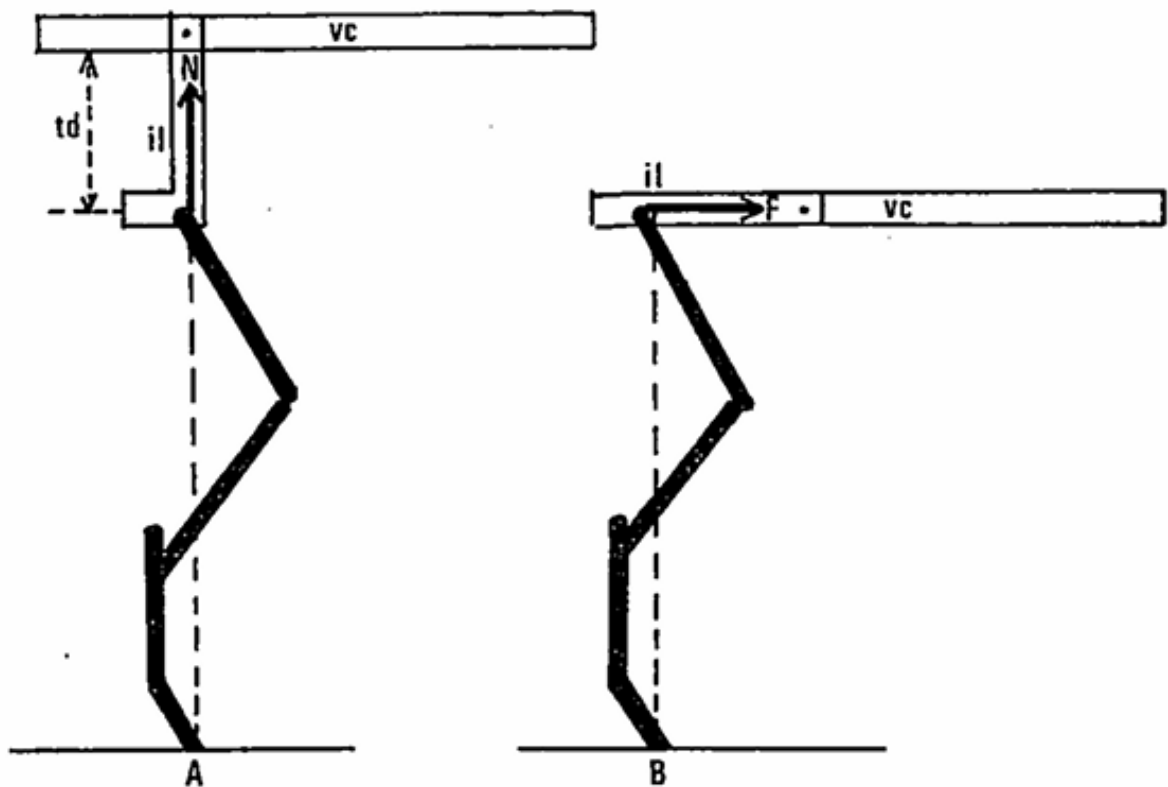


Figura 4 – Esforço exercido sobre a pata; (il) ílio; (vc) coluna vertebral; (td) diâmetro real; (N) força normal; (F) força de propulsão. Fonte: (GETTY, 2008)

$$\sigma = \frac{N \text{ kg}}{A \text{ cm}^2} \quad (2.1)$$

No animal em pé a resultante da força motriz horizontal é zero, porém, caso uma força resultante orientada cranialmente na horizontal seja exercida contra a margem cranial do acetábulo, o animal começa a se mover.

O movimento dos animais pode ser expressado pela duração do contato de cada pé e a relação das batidas realizadas pelas patas dianteiras até as patas traseiras em valores percentuais. Esses movimentos podem ser classificados como (GETTY, 2008):

Marcha Comum para todos os mamíferos quadrúpedes. O corpo é sustentado por três ou dois membros laterais ou diagonais de modo que os movimentos do membro mostrem determinado modelo diagonal. Este andamento é mais estável visto que a projeção do centro de gravidade situa-se dentro do triângulo de sustentação.

Trote lento É uma marcha acelerada e tem sequência diagonal de movimentos do membro enquanto o corpo é sustentado por duas ou três patas. Se aumenta a velocidade, uma curta fase flutuante se alterna de forma que o animal se sustenta por duas patas.

Andamento Neste tipo de movimento o corpo sustentado de forma alternada por dois ou três membros diagonais ou laterais. Em velocidade crescente, contudo, um modelo lateral substitui o diagonal. Se a velocidade aumenta, o andamento gradualmente se altera em:

Andamento Interrompido Durante cerca da metade de cada fase deste passo o corpo está flutuando. Alternadamente ele é sustentado por um ou dois membros laterais durante a outra fase. Este é o tipo natural de locomoção em camelos e girafas, embora possa ser visto casualmente em cavalos e cães.

Galope Saltado Este tipo mostra as seguintes fases: patas traseiras em contato com o solo, em que os membros dianteiros completam um passo e impulsionam o corpo para frente e, enquanto o lombo é fletido, os membros traseiros são protraídos sob o corpo.

Estes aspectos da mobilidade de um animal quadrúpede são sintetizados de forma visual na Figura 5, baseada no gráfico apresentado por (GETTY, 2008). Nela, as esferas vazias correspondem às patas da esquerda e as preenchidas, da direita.

Os princípios dinâmicos pelos quais os membros exercem uma força propulsora são essencialmente os mesmos princípios estáticos pelos quais o corpo é sustentado. Em ambos os casos um membro pode funcionar como um suporte ou uma alavanca. Se o eixo mecânico de um membro é retraído, o membro pode atuar como um suporte propulsor, desde que a componente horizontal da reação total no pé seja maior do que as forças dispersas exercidas pelos outros membros. Quando o pé está no solo e o eixo mecânico está protraído, o membro atua como um freio. Visto que durante um ciclo locomotor completo o membro é alternadamente retraído e protraído, a potência propulsora é primeiramente positiva e depois negativa (GETTY, 2008).

2.3 Robótica e convenções

Segundo (NIKU, 2013) a robótica é a base de conhecimento, conhecimento, aplicação e uso de robôs em atividades humanas. Estes, por sua vez consistem, de forma integrada, de manipulador, atuador final, atuadores, sensores, controladores, processador e softwares.

Conforme define (CRAIG, 2012), o número de graus de liberdade que um manipulador possui corresponde quantidade de variáveis de posição independentes que teriam de ser especificadas para que seja possível a localização todas as suas partes.

Os robôs têm articulações translacionais ou rotacionais e para descrever o grau de deslocamento de uma articulação é necessário fazer uso de uma descrição matemática unificada desses movimentos translacionais conforme a Equação 2.2 (MIHELJ et al., 2019).

Tipo de Movimento	Passos													
	1		2		3		4		5		6		7	
Marcha lenta	○	○		○	○	○	○		○	○	○	○	○	○
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●
Marcha ligeira		○		○			○		○		○	○	○	○
	●		●	●	●	●	●	●		●		●		
Andamento		○							○		○		○	○
	●		●		●	●		●		●				
Andamento interrompido													○	○
					●	●								
Trote		○							○					
	●								●					
Meio galope lento							○		○	○	○	○	○	○
			●		●	●	●	●	●	●		●		
Meio galope ligeiro							○			○	○	○		○
			●		●		●	●				●		●

Figura 5 – Os tipos principais de progressão e as subvariações num movimento lateral, da esquerda para a direita. Os pontos preenchidos fazem referência às patas que exercem o apoio e os círculos vazios às patas que realizam o balanço.

$$d = a \cdot i + b \cdot j + c \cdot k \quad (2.2)$$

Esse deslocamento também pode ser descrito como na Equação 2.3.

$$H = Trans(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Os deslocamentos rotacionais ocorrem ao longo de 3 eixos. Sua direção de rotação é dada pela regra da mão direita em que o polegar é dirigido ao longo do eixo para seu fim positivo e os dedos mostram a direção positiva de rotação 6 (MIHELJ et al., 2019).

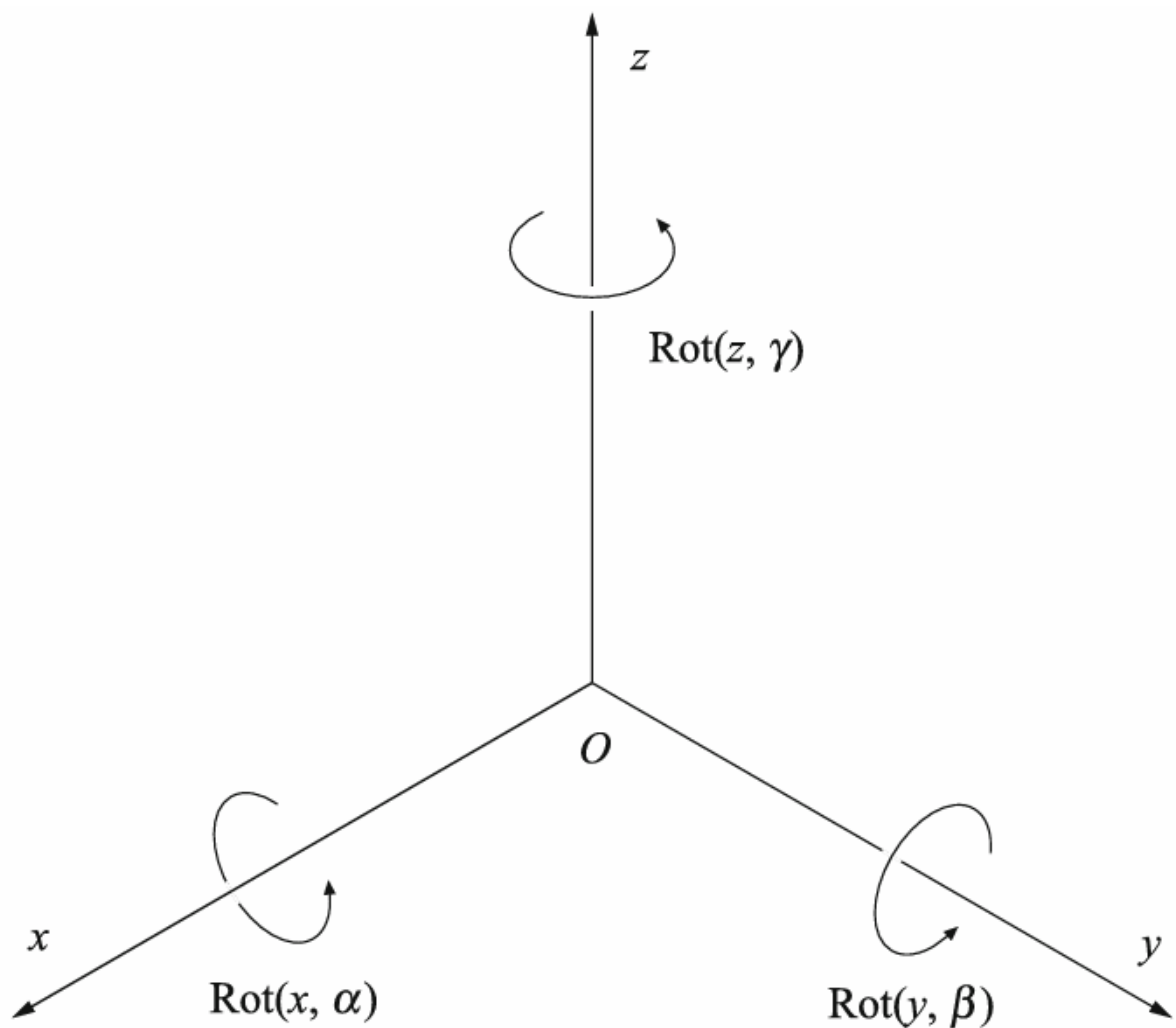


Figura 6 – Rotações positivas obtidas pela regra da mão direita.

Fonte: (MIHELJ et al., 2019)

Esse deslocamento também é descrito por uma matriz homogênea em que as três primeiras linhas correspondem aos eixos x , y e z do *frame* de referência e, as três primeiras colunas correspondem aos eixos x' , y' e z' do *frame* rotacionado (MIHELJ et al., 2019). As Equações de

$$H = Rot(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$H = Rot(y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$H = Rot(z, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

O trabalho de pesquisa realizado por (LI; WANG, 2022a) utiliza o robô Bausatzlwa3 6 DOF+FWK050 Schunk como objeto de pesquisa. Nele os autores travam as juntas 4 e 6 de modo que possa ser estudado como um dispositivo de 4-DOF. Esta configuração garante o robô seja redundante, visto que o número de articulações é maior que a dimensão de movimento (Figura 7).

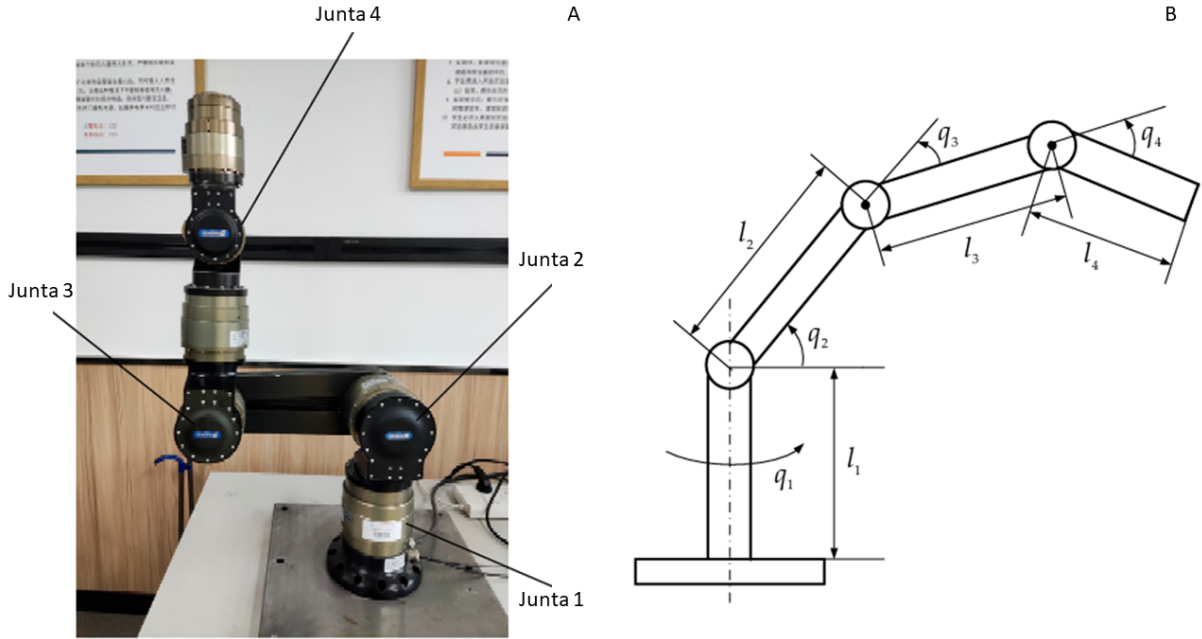


Figura 7 – Rotações positivas obtidas pela regra da mão direita.

Fonte: (LI; WANG, 2022a)

O método de transformação de matriz homogênea é utilizada para resolver a cinemática do robô por meio dos quatro parâmetros de Denavit-Hartenberg (CORKE; JACHIMCZYK; PILLAT, 2011). Segue abaixo a definição gráfica (Figura 8) e a lista desses parâmetros com as descrições inerentes a cada um deles.

d_i é o deslocamento da origem do sistema $i - 1$ na intersecção dos eixos $\hat{Z}_{i-1}$ e $\hat{X}_i$, medido sobre o eixo $\hat{Z}_{i-1}$. Se a junta i for prismática este valor é variável.

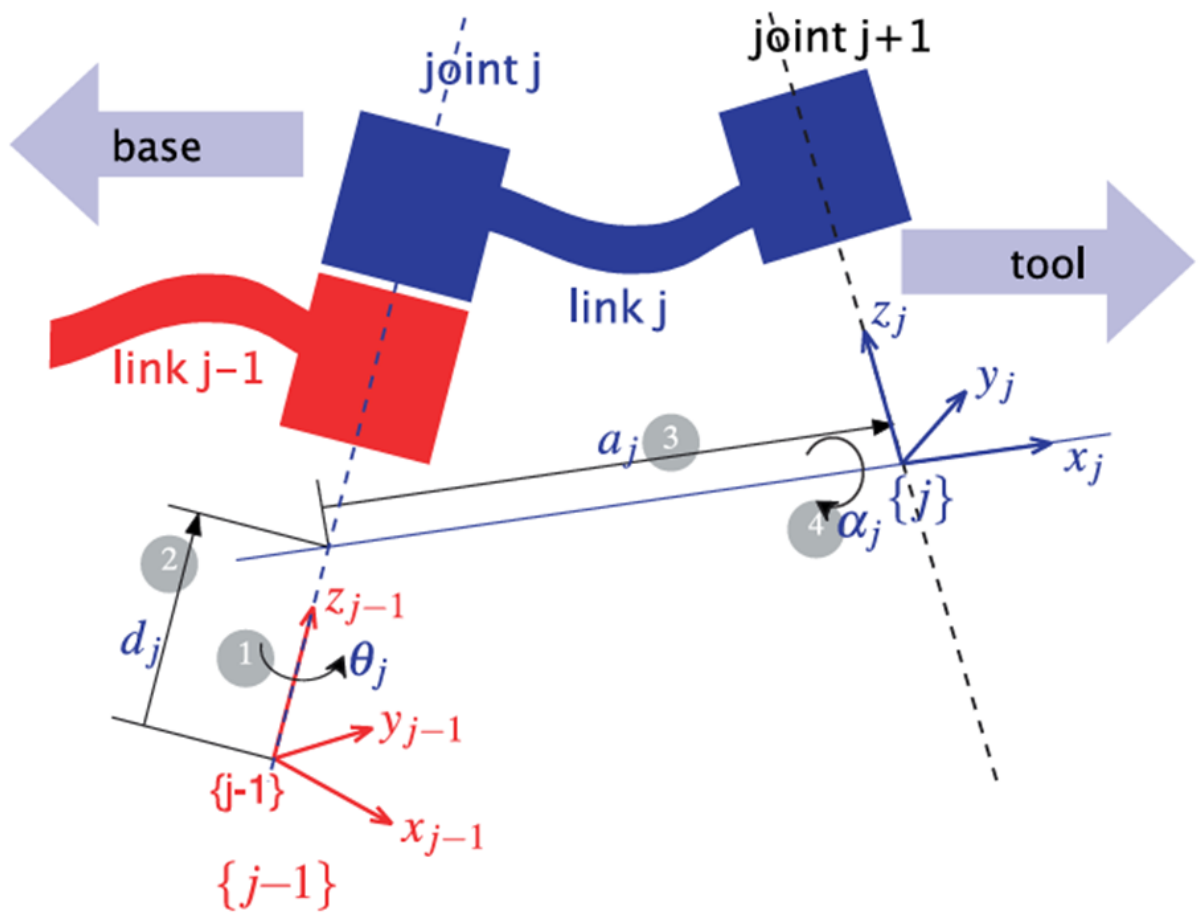


Figura 8 – Rotações positivas obtidas pela regra da mão direita.

Fonte: (CORKE; JACHIMCZYK; PILLAT, 2011)

a_i é o deslocamento da intersecção de $\hat{Z}_{i-1}$ e $\hat{X}_i$ à origem do sistema i , medido sobre o eixo $\hat{X}_i$.

θ_i é o deslocamento angular em torno de $\hat{Z}_{i-1}$, medido de $\hat{X}_{i-1}$ à $\hat{X}_i$. Este é um parâmetro de valor variável se a junta i for rotacional.

α_i é o deslocamento angular em torno de $\hat{X}_i$, medido de $\hat{Z}_{i-1}$ à $\hat{Z}_i$.

Outra questão importante a ser considerada é sobre a constatação de (BARASUOL, 2013) de que os robôs com pernas exibem mobilidade maior do que de robôs móveis com rodas, inclusive superior àqueles que utilizam rodas suecas. Sua capacidade de locomoção e orientação podem ser modificadas e ainda sim manter seus pontos de apoio.

3 Material e Métodos

O projeto foi desenvolvido em laboratório particular de engenharia e organizado nos seguintes estágios e fluxo realizados de forma cíclica até a obtenção de resultado que permitisse a locomoção do robô sustentando sobre si, o próprio peso e uma massa equivalente a 50% de seu peso, posicionada no dorso (Figura 9).

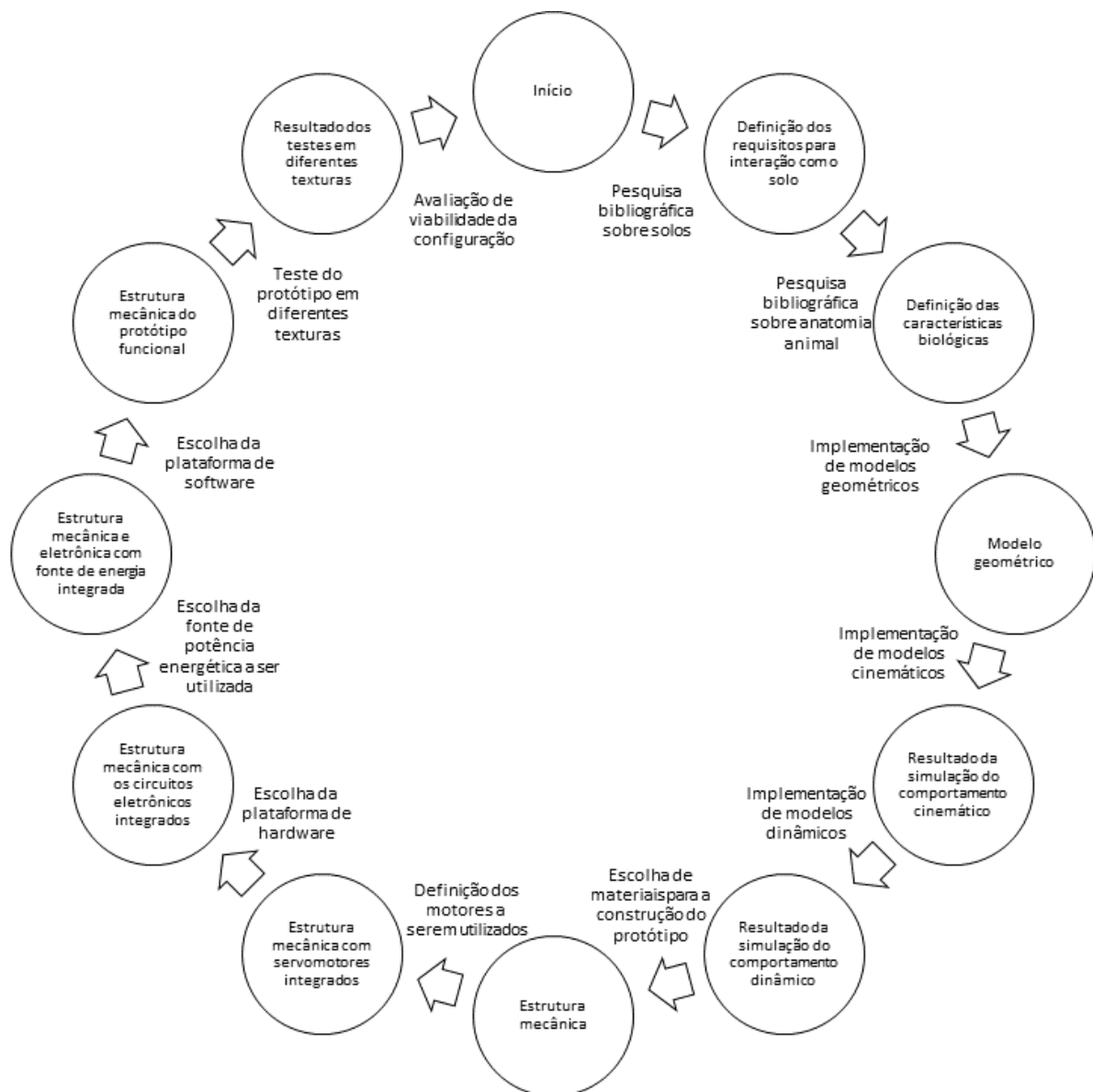


Figura 9 – Estágios para o desenvolvimento do protótipo

Após a implementação da estrutura física articulada e a satisfação desse requisito, foram implementados e integrado o sistema decisório e de monitoramento, controle e supervisão remota, bem como o sistema de gestão e geração de conhecimento, ambos adaptados de (Cardoso et al., 2020).

3.1 Definição dos requisitos para interação com o solo

É fato que a umidade do solo influencia diretamente a umidade do solo influencia diretamente na resistência a penetração. Conforme se observa em (BOTTEGA et al., 2022) os valores para a resistência a penetração se dá de forma mais acentuada na casa de MPa e, por tanto, dispositivos mais leves, da ordem aproximada de 10 kg, considerando apenas a força g exercida ortogonal ao solo de $9.8 \frac{m}{s^2}$, não interferem de forma significativa na compactação do solo.

Para estimar a área de contato e do ponto de pressão adequado em cada membro articulado responsável pela mobilidade, foi definido que deve ser de $\frac{1}{16}$ que é equivalente a a área resultante da divisão da base do robô em 4 partes e esta por sua vez, também dividida em 4 partes (Equação 3.1). Esta definição vem do fato de que a área de contato deve ser grande o suficiente para não causar o efeito de ponta cônica e adequada o suficiente para permitir a mobilidade horizontal sem que uma pata interfira no movimento da outra durante a locomoção.

$$A_{contato} = A_{total} \cdot \frac{\frac{1}{4}}{4} \quad (3.1)$$

3.2 Definição das características biológicas

A análise morfológica dos sistemas de mobilidade dos animais presentes na fauna terrestre que juntos expressam, grande força de tração e capacidade de movimento nas paisagens agrícolas. Nesta categoria, são considerados os lagartos, pela sua capacidade de movimento nas mais diversas textura e declividades e os bubalinos pela sua grande capacidade de tração, além de ser utilizado como motor animal dos mais diversos implementos agrícolas.

3.2.1 Anatomia

Como dito nos parágrafos anteriores, a inspiração baseia-se principalmente na observação das capacidades de animais como os bubalinos e reptéis (Figura 10). O primeiro apresenta grande força de tração e mobilidade. Já os reptéis apresentam grande simplicidade de movimento.

A estrutura robótica apresentada no protótipo 1 busca emular as características como, juntas e forma de locomoção, dos bubalinos e no protótipo 2 a de lagartos, com os elos e juntas assinalados em seguimentos de retas e círculos respectivamente, com a junta na extremidade superior que propicia movimentos sagitais e dorso-caudais.

A utilização de um equipamento que viabilize a aplicação de insumos agrícolas

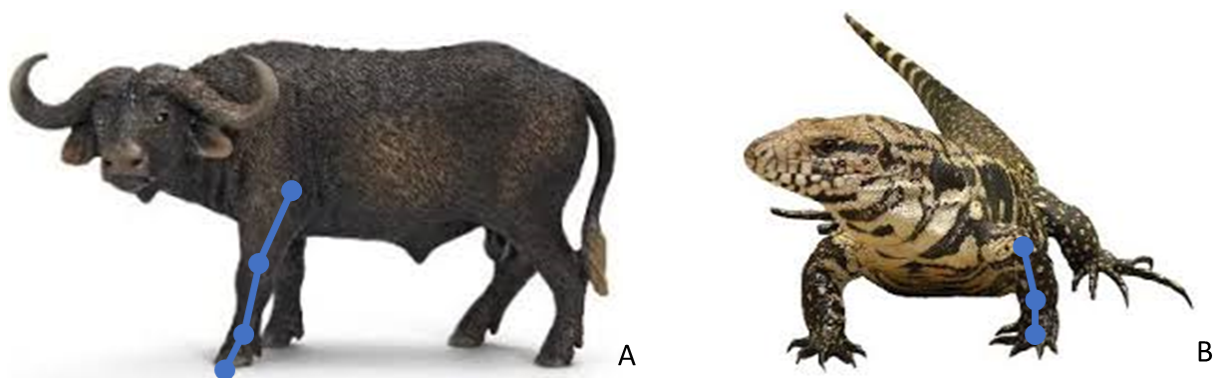


Figura 10 – Estrutura de locomoção da base e patas A) búfalo e B) lagarto.

líquidos próximo a área radicular é avaliada como um importante campo de estudo e, por esta razão, é de interesse aqui a implementação do protótipo 2 baseado em animais de mobilidade próxima a superfície do solo.

3.3 Modelo geométrico

O desenho da base do robô, em cada um dos modelos apresentados foram desenvolvidos e estudados (Figura 11) por meio da análise geométrica com apoio da plataforma Geogebra (INSTITUTE, 2023). Estes desenhos partem da definição de que a largura, de ponta a ponta deve ser equivalente à metade de seu comprimento.

Para a obtenção, primeiramente é feito, sobre um plano quadriculado, com cada um dos quadriláteros tendo lado igual a 1 un. (unidade genérica), um retângulo com 4 un. de largura e 10 un. de comprimento com centro congruente ao do plano. O retângulo resultante é concebido como estabilizadores horizontais no plano dorso-caudal e no plano sagital e, suas conexões, acontecem nos vértices D, F, K, I e D no protótipo 1 e A, B, D, C e A para o protótipo 2.

A estratégia de se utilizar unidade genérica é para melhor ilustrar a escalabilidade do dispositivo no que tange ao dimensionamento. Outro aspecto importante para o melhor entendimento da arquitetura física apresentada nos modelos geométricos é que os eixos ou articulações do dispositivo robótico são nomeados de cima para baixo para as patas e de baixo para cima no braço robótico.

3.3.1 Protótipo 1

Para garantir maior estabilidade no centro sagital neste modelo, é desenhado um segmento de reta que forma a linha $\overline{OP}$. Depois disso, são traçados os eixos do tronco, que receberão em suas extremidades externas, cada uma das 4 patas. A partir do ponto G e L, são traçadas retas até os cantos superiores e inferiores mais próximos, atravessando-o

uma diagonal do quadrilátero para fora do retângulo de estabilização para formar as linhas $\bar{GH}$, $\bar{GJ}$, $\bar{LM}$ e $\bar{LN}$.

Ainda na Figura 11 B) o tronco do robô é mostrado sob uma perspectiva de corte em plano transversal. Nela é possível observar seu formato hexagonal com o propósito de, além de permitir a acomodação de recipiente de fluídos e circuitos elétricos, também possibilitar uma melhor distribuição da pressão dos elementos externos e, assim, reduzir a probabilidade de perda do equipamento em uma provável saturação hídrica ou inundação do local. A concepção também é baseada em análise geométrica. Assim, primeiramente é desenhado um segmento de reta que corta horizontalmente o plano quadriculado de 5 quadriláteros de largura e 6 de altura de 1 un. de lado cada. São definidos dois pontos, C e F , sobre este segmento a $\frac{6}{5}$ un. a partir de cada extremidade de $\bar{AB}$. A $\frac{5}{2}$ do segmento $\bar{AB}$ é traçada um segmento paralelo $\bar{DE}$ e $\bar{GH}$, tanto acima quanto abaixo com centro horizontal equivalente ao da reta $\bar{AB}$. As duas retas resultantes possuem medidas de 5 un. cada e suas extremidades são em seguida conectadas aos pontos C e F para formar o hexágono $CDEFHG$.

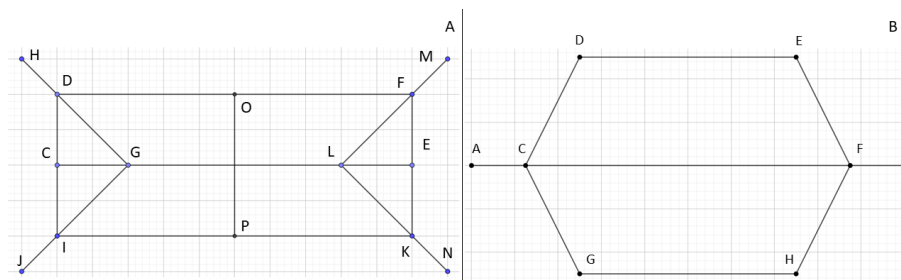


Figura 11 – Diagrama tronco referente ao Protótipo 1 com vistas em A) corte no plano horizontal e B) corte no plano transversal.

Para a obtenção das medidas de cada pata (Figura 12) é desenhada sobre uma folha com 5 retângulos equiláteros empilhados, com cada quadro de 1 un. de lado. A partir do ponto D , é traçada uma reta até o centro do quadrilátero (ponto C), do ponto C segue-se até o canto superior esquerdo do segundo quadrilátero (ponto B) e, por fim, do ponto B é traçada uma reta até o canto superior esquerdo do quarto quadrilátero (ponto A). O segmento de reta formado pelos pontos A e N é o comprimento da junta H , perpendicular os seguimento $\bar{HI}$. O movimento perpendicular da pata é proporcionado pelo pseudo ílio que permite que toda a estrutura da pata tenha a sua direção alterada dentro de um intervalo de 180° . Esta técnica foi criada e aplicada aqui para se obter uma proximidade entre as medidas das estruturas locomotoras dos animais como cães, bovinos e bubalinos, de forma a garantir um grau de aproximação entre as patas biológicas e as artificiais. Um aspecto relevante sobre esta aproximação encontra-se no fato de se utilizar a quadratura para determinação de altura e comprimento do dispositivo, inspirado na forma como os cães são classificados em competições, como aquelas organizadas por entidades especializadas em sua criação

(ROSS, 2013). O último elo também é inspirado na capacidade do carpo bubalino que permite um giro de 180° , permitindo a esta espécie uma capacidade de escapar de atoleiros com uma maior facilidade (DAMÉ,).

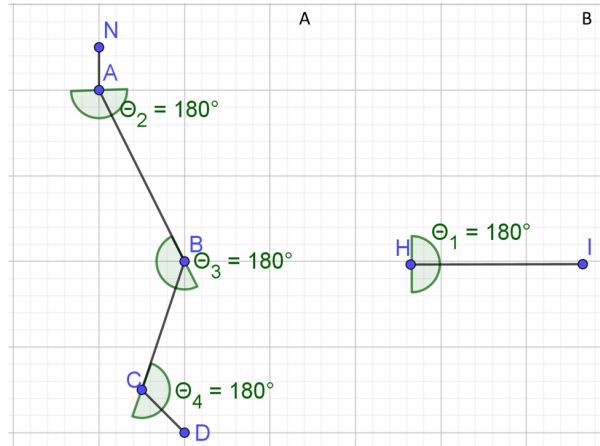


Figura 12 – Diagrama da pata robótica com articulações com mobilidade rotacional de 180° . A) Pata robótica com a apresentação do pseudo fêmur em $\overline{AB}$, pseudo tíbia em $\overline{BC}$ e pseudo falanges em $\overline{CD}$; B) pseudo ílio em $\overline{HI}$ que permite a rotação perpendicular da pata.

Para este modelo foi estipulado que o dispositivo, deverá ter sua área de contato distribuída em 4 patas, com o Elo referente a última extremidade paralela ao solo, para maximizar a área de contato do dispositivo. Sua forma deverá estar dentro de um padrão quadrado, com sua altura e comprimento de 60 cm e largura de 30 cm.

3.3.2 Protótipo 2

Os retângulos formados pelos seguimentos $\overline{EFGSE}$, $\overline{IJVHI}$, $\overline{TKLMT}$ e $\overline{NUPON}$, com cada um medindo 5 e 3 un. que correspondem às bases para fixação das patas e dos estabilizadores verticais e horizontais superiores dianteiros e traseiros, adicionados a 5 un. de altura do plano inferior. Estes últimos, formados pelos segmentos $\overline{AC}$, $\overline{BD}$ e $\overline{QR}$. O estabilizador horizontal superior é mostrado no plano pelos seguimento $\overline{QR}$. Paralelo a este seguimento e ortogonal ao seguimento $\overline{BD}$, é formado, a 5 un. do vértice R o vértice W para a ilustração do seguimento $\overline{WX}$ com 12 un. e posteriormente o segmento $\overline{XY}$ com 22 un.

O tronco do robô é apresentado sob uma perspectiva de corte em plano transversal (Figura 13B). Nela é possível observar seu formato, pseudo cabeça e pescoço. Os segmentos $\overline{AB}$ e $\overline{CD}$ são paralelos com medidas de 15 unidades. $\overline{AC}$ e $\overline{BD}$ são concebidos com 5 un. $\overline{AE}$ e $\overline{BF}$ são a base de fixação das articulações das patas apresentadas como vértices E, G e I e espelhadas em F, H, J. Os seguimentos $\overline{EG}$ e $\overline{FH}$ correspondem aos ligamentos do Robô e devem permitir um movimento horizontal. Estes segmentos espelhados em todas as 4 patas tem comprimento de 5 un. Já os seguimentos $\overline{GI}$, $\overline{IK}$, $\overline{HJ}$ e $\overline{JL}$ permitirão

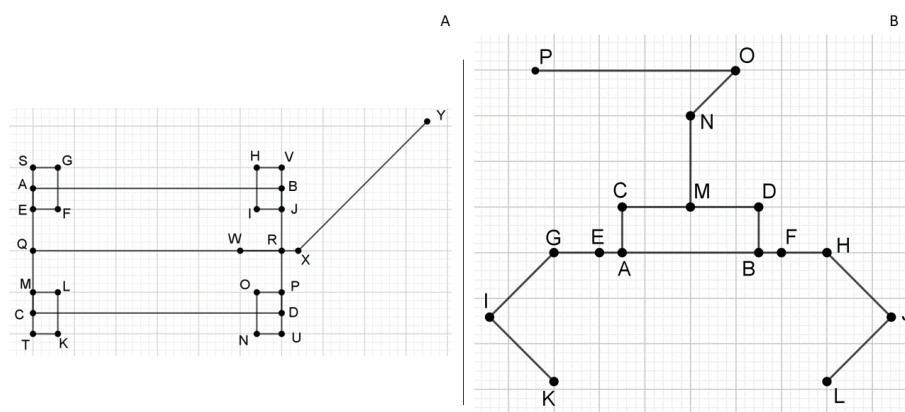


Figura 13 – Diagrama tronco referente ao Protótipo 2 com vistas em A) corte no plano horizontal e B) corte no plano transversal.

movimentos no plano transversal e tem medida de 10 un. também espelhados em todas as 4 patas. O seguimento $\overline{MN}$ que mede 10 un. são acoplados eixos de rotação discriminados aqui como vértices N e O. $\overline{NO}$ corresponde a um elo de 7 un. e deve permitir movimento transversal e, o elo final $\overline{OP}$ de 22 un. deve permitir movimentos laterais.

Neste modelo os vértices E, G e I, assim como, F, H e J correspondem, respectivamente às articulações $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ das patas. Já os vértices H e G, correspondem, respectivamente às articulações θ_1 e θ_2 do braço robótico que emula a cabeça e pescoço.

3.4 Modelos cinemáticos

O sistema robótico foi desenvolvido para andar sobre 4 patas sob o controle de um sistema computacional que fará com que sua estrutura se mova ou fique parada em equilíbrio. Para que seja possível simular seu movimento e verificar suas características cinemática e, posteriormente dinâmica esses modelos foram levantados por meio de cálculos algébricos. Seu estudo deve partir do entendimento de que a base do robô é o seu próprio corpo, de onde partem cada uma das patas. Assim, esse estudo é realizado entendendo que tanto uma pata robótica quanto um braço robótico são equivalentes do ponto de vista cinemático e dinâmico.

3.4.1 Modelo cinemático direto

A cinemática direta permite que se possa saber a posição de uma determinada extremidade de Elo em relação a sua base.

3.4.1.1 Protótipo 1

Para ao Protótipo 1, tensiona-se posicionar a extremidade do Elo 3 sobre a superfície do solo e não o final do último Elo (Elo 4). Porém, entende-se que é necessário, o conhecimento da posição desta última extremidade.

Com base na análise da estrutura, são obtidos os valores relativos a convenção de Denavit-Hartenberg (DH) 1.

Tabela 1 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise junta a junta de uma pata referente ao Protótipo 1

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	d_1	0	90°
2	θ_2^*	0	l_2	0
3	θ_3^*	0	l_3	0
4	θ_4^*	0	l_4	0

A partir desta tabela é possível obter as matrizes homogêneas para cada uma das articulações do dispositivo simplesmente pela aplicação da Equação 3.2.

Os valores obtidos pela análise equivalem a aqueles apresentados por (TING et al., 2021) e (LI; WANG, 2022b). Por sua similaridade, cada uma das transformações seguintes são também equivalentes, porém, com a cinemática realizada não apenas para o último Elo e sim, também para a extremidade do terceiro. Seguindo os princípios apresentados por estes autores, a matriz de transformação entre cada uma das coordenadas do sistema é apresentado na (Equação 3.2), onde $i = 1, 2, 3$ e 4.

$$H_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & r_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & r_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Visto que é pré-requisito a adaptabilidade do dispositivo em diferentes ambientes, as transformações são realizadas para permitir que cada uma das extremidades que compõe cada pata seja conhecido. Isso é uma estratégia que auxiliará o robô a se locomover e adaptar-se a diferentes paisagens e texturas de solo.

Para tornar a visualização das Equações de 3.3 a 3.6 mais simples, as descrições de seus sin e cos são descritas como: $\cos(\theta_2 + \theta_3) = C_{23}$, $\sin(\theta_2 + \theta_3) = S_{23}$, $\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = C_{234}$ e $\sin(\theta_2 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = S_{234}$.

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$T_0^2 = T_1^0 \times T_2^1 = \begin{bmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 & l_2 C_1 C_2 \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & -C_1 & l_2 S_1 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2 S_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$T_0^3 = T_1^0 \times T_2^1 \times T_3^1 = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & S_1 & C_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23}) \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -C_1 & S_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23}) \\ S_{23} & C_{23} & 0 & l_2 S_2 + l_3 S_{23} + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$T_0^4 = T_1^0 \times T_2^1 \times T_3^1 \times T_4^3 = \begin{bmatrix} C_1 C_{234} & -C_1 S_{234} & S_1 & C_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23} + l_4 C_{234}) \\ S_1 C_{234} & -S_1 S_{234} & -C_1 & S_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23} + l_4 C_{234}) \\ S_{234} & C_{234} & 0 & l_2 S_2 + l_3 S_{23} + l_4 S_{234} + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.4.1.2 Protótipo 2

Este modelo também deve permitir a locomoção sobre 4 patas sob controle de sistema computacional porém, neste caso o último Elo é o 3 que deve ser posicionado sobre a superfície do solo.

Com base na análise dessa estrutura foram obtidos os valores relativos a convenção de Denavit-Hartenberg (DH) para as patas (Tabela 2) e para o pescoço (Tabela 3). Neste caso essas duas características são importantes pois, o movimento rotacional do pseudo-cranio do robô auxiliam na alteração do centro de massa do dispositivo de forma a interferir positivamente na capacidade de sustentação em duas patas por passada.

Para este modelo os valores são equivalentes aos obtidos por (SICILIANO et al., 2009) e, por sua similaridade, cada uma das transformações seguintes também equivalentes. Suas matrizes são apresentadas nas Equações de 3.7 a 3.9.

Para simplificar a exibição destas equações, as descrições de seus $\sin$ e $\cos$ são descritas como: $\cos(\theta_2 + \theta_3) = C_{23}$, $\sin(\theta_2 + \theta_3) = S_{23}$.

Tabela 2 – Parâmetros D-H obtida pela análise junta a junta de uma pata referente ao protótipo 2.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	0	l_1	90°
2	θ_2^*	0	l_2	0
3	θ_3^*	0	l_3	0

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & l_1 C_1 \\ S_1 & 0 & -C_1 & l_1 S_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$T_2^0 = T_1^0 \times T_2^1 = \begin{bmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 & C_1(l_1 + l_2 C_2) \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & -C_1 & S_1(l_1 + l_2 C_2) \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$T_3^0 = T_1^0 \times T_2^1 \times T_3^2 = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & S_1 & C_1(l_1 + l_2 C_2 + l_3 C_{23}) \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -C_1 & S_1(l_1 + l_2 C_2 + l_3 C_{23}) \\ S_{23} & C_{23} & 0 & l_2 S_2 + l_3 S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

A cinemática direta referente ao braço robótico que emula as funções da cabeça e pescoço são obtidas pela Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise junta a junta do braço robótico.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	10	0	90°
2	θ_2^*	0	l_2	-90°
3	θ_3^*	0	l_3	0°

A partir da Tabela 3 é possível obter as matrizes homogêneas para cada uma das articulações do braço robótico.

A matriz de transformação entre cada uma das coordenadas do sistema é apresentado nas Equações 3.10 até 3.12.

Para simplificar a exibição destas equações, as descrições de seus $\sin$ e $\cos$ são descritas como: $\cos(\theta_2 + \theta_3) = C_{23}$, $\sin(\theta_2 + \theta_3) = S_{23}$.

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$T_2^0 = T_1^0 \times T_2^1 = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & -S_1 & l_2 C_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ S_2 & 0 & C_2 & l_1 + l_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$T_3^0 = T_1^0 \times T_2^1 \times T_3^2 = \begin{bmatrix} C_2 C_3 & -C_2 S_3 & -S_2 & C_2(l_2 + l_3 C_3) \\ S_3 & C_3 & 0 & l_3 S_3 \\ S_2 C_3 & -S_2 S_3 & C_2 & l_1 + l_2 S_3 + l_3 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.4.2 Modelo cinemático inverso

Para a obtenção da cinemática inversa de cada uma das patas do robô foi feito uso do método analítico-geométrico. Assim como a cinemática direta, a cinemática inversa é similar aos apresentados por (LI; WANG, 2022b) e (TING et al., 2021) que apresentam graficamente esta decomposição.

3.4.2.1 Protótipo 1

O sistema articulatorio da pata, relativo a este modelo é decomposto em duas partes: uma correspondente ao movimento realizado pela Junta 1, em que o ângulo θ_1 determina o posicionamento da extremidade inferior da pata nos eixos (X, Y) e a outra que considera um eixo R, fixado em um ponto denominado p_R determinado pela aplicação do Teorema de Pitágoras a partir destes eixos.

O ângulo θ_1 e o ponto p_R são determinados pelas Equações 3.13 e 3.14, respectivamente.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_Y}{p_X}\right),$$

$$\theta_1 = \begin{cases} \theta_1 & , 0^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ \\ \theta_1 + 180^\circ & , \theta_1 > 90^\circ \end{cases} \quad (3.13)$$

$$r_4 = R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.14)$$

$$z_4 = Z - d_1) \quad (3.15)$$

$$p_R = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (3.16)$$

$$r_3 = r_4 - l_4 \cdot \cos(\phi) \quad (3.17)$$

$$z_3 = z_4 - l_4 \cdot \sin(\phi) \quad (3.18)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{z_4}{r_4}\right) \quad (3.19)$$

$$\psi = \arctan(z_3/r_3) \quad (3.20)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{p_R^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot p_R \cdot l_2}\right) \quad (3.21)$$

$$\theta_2 = -(\beta - \psi) \quad (3.22)$$

$$\theta'_2 = \beta + \psi \quad (3.23)$$

$$\theta_3 = -(\arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - p_R^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3}\right) - 180^\circ) \quad (3.24)$$

$$\theta'_3 = (\arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - p_R^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3}\right) + 180^\circ) \quad (3.25)$$

$$\theta_4 = -(\phi - (\theta_2 + \theta_3)) \quad (3.26)$$

As Equações 3.23 e 3.25 determinam o cotovelo para baixo e devem ser utilizadas em conjunto, da mesma forma, as Equações 3.22 e 3.24 definem o cotovelo para cima e devem, também, ser utilizadas em conjunto.

3.4.2.2 Protótipo 2

O sistema articulatorio da pata, relativo a este modelo é similar ao apresentado para o protótipo 1. Neste caso uma parte corresponde ao movimento propiciado pela Junta 1, em que o ângulo θ_1 determina o posicionamento da extremidade inferior da pata nos eixos (X, Y) e a outra que considera um eixo V, fixado em um ponto denominado p_V , também determinado pela aplicação do Teorema de Pitágoras, a partir destes eixos. O ângulo θ_1 e o ponto p_R são determinados pelas Equações 3.27 e 3.28, respectivamente.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right),$$

$$\theta_1 = \begin{cases} \theta_1 & , 0^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ \\ \theta_1 + 180^\circ & , \theta_1 > 90^\circ \end{cases} \quad (3.27)$$

$$p_v = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (3.28)$$

$$p_R = \sqrt{(p_v^2 + p_z^2)} \quad (3.29)$$

$$\psi = \arctan(p_z, p_v) \quad (3.30)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{p_v^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot p_v \cdot l_2}\right) \quad (3.31)$$

$$\theta_2 = -(\beta - \psi) \quad (3.32)$$

$$\theta_2' = \beta + \psi \quad (3.33)$$

$$\theta_3 = -\left(\arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - p_v^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3}\right) - 180^\circ\right) \quad (3.34)$$

$$\theta_3' = \left(\arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - p_v^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3}\right) + 180^\circ\right) \quad (3.35)$$

Da mesma forma que o que foi apresentado para o protótipo 1, aqui, as Equações 3.33 e 3.35 determinam o cotovelo para baixo e devem ser utilizadas em conjunto, da mesma forma, as Equações 3.32 e 3.34 definem o cotovelo para cima e devem, também, ser utilizadas em conjunto.

A obtenção da cinemática inversa do braço robótico é dirigida pelo mesmo método, porém com alterações sutis, pois o primeiro eixo tem movimento transversal ao corpo e o

segundo executa movimentos laterais. Desta forma são apresentadas as Equações 3.36 a 3.37 para o posicionamento de sua extremidade.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_z}{p_x}\right),$$

$$\theta_1 = \begin{cases} \theta_1 & , 0^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ \\ \theta_1 + 180^\circ & , \theta_1 > 90^\circ \end{cases} \quad (3.36)$$

$$\theta_2 = \arctan(p_y, p_x) \quad (3.37)$$

3.4.3 Modelo cinemático diferencial e modelo estático

A cinemática diferencial relaciona as velocidades e acelerações dos componentes da cadeia cinemática, o que dá como resultado uma velocidade e aceleração total na extremidade do sistema (CAMPOS; GUENTHER; MARTINS, 2005).

A estimação pode ser obtida por meio de iterações sobre as Equações da cinemática direta.

Para a realização das iterações de cálculos considera-se em sua base uma matriz identidade como matriz homogênea, visto que nela não deve haver nem movimento de rotação e de translação, por ser um ponto fixo no dispositivo em relação a cada uma das partes da pata.

Durante o processo de cálculo, logo após a obtenção das velocidades angulares e lineares, é possível obter a Matriz Jacobina que nada mais é que o mapeamento da velocidade no espaço das juntas em velocidades no espaço cartesiano. Ele não é inversível em singularidades, em que o determinante é 0. Quando a pata robótica se encontra em uma posição singular, perde um ou mais graus de liberdade no espaço cartesiano.

Este mapeamento é descrito por uma matriz Jacobiana que depende da configuração do manipulador. Ela é expressa com a mesma representação e um espaço operacional obtido pela diferenciação da cinemática direta. Ela define a relação dinâmica entre os diferentes sistemas de Coordenada (SCIAVICCO; SICILIANO, 2001).

Quando o robô se locomove sobre cada uma das patas está sustentando o próprio peso e é necessário fazer as considerações matemáticas sobre este processo. Uma das formas que podem ser utilizadas para resolver este problema é a utilização do conceito de equilíbrio estático, que trata dos valores de torque necessários nas juntas para este fim. Para a obtenção ocorre o travamento de todas as juntas e depois é realizada a descrição de força-momento das juntas em relação ao sistema de referência de cada elo. Isso resulta nas equações que modelam o conjunto de torques necessário para a sustentação de uma carga estática que age no efetuador (CRAIG, 2012). As equações para isso são baseadas

nos métodos deste mesmo autor e seu cálculo é realizado de forma iterativa a partir da extremidade da pata, ou seja, no último elo do robô, que interage diretamente com o solo ou outro meio qualquer.

3.4.3.1 Protótipo 1

Primeiro é obtida a matriz homogênea da junta analisada por meio da Equação 3.38, com $i = 1, 2, 3$ e 4. As Equações descritas aqui para a velocidade angular (ω) e velocidade linear (v) são baseadas em (CRAIG, 2012) e adaptadas ao propósito do projeto e a simulação em software Matlab (MATLAB, 2022).

$$H_i^{i-1} = R_{z,\theta_i} \cdot T_{z,d_i} \cdot R_{x,\alpha_i} \cdot T_{x,l_i} \quad (3.38)$$

Onde,

$$R_{z,\theta_i} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$T_{z,d_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$R_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$T_{x,l} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

O resultado da aplicação da Equação 3.38 é similar a obtenção das matrizes homogêneas baseadas na Equação 3.2.

Após a obtenção desta matriz é realizado o levantamento da velocidade angular (ω) por meio da Equação 3.43.

$$\omega_i^i = R_{i-1}^i \cdot \omega_{i-1}^{i-1} + \dot{\theta}_i \cdot \hat{Z}_i^i \quad (3.43)$$

Onde na primeira iteração ω_{i-1}^{i-1} é igual a $[0 \ 0 \ 0]^T$, $R_{i-1}^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)^T$ e $\hat{Z}_i^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 3)$.

Em seguida é obtido a velocidade linear v relativo a junta em questão através da Equação 3.44.

$$v_i^i = R_{i-1}^i \cdot (v_{i-1}^{i-1} + W_{i-1}^{i-1} \times O_i^{i-1}) \quad (3.44)$$

Onde na primeira iteração v_{i-1}^{i-1} é igual a $[0 \ 0 \ 0]^T$, $R_{i-1}^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)^T$ e $O_i^{i-1} = H_i^{i-1}(1 : 3, 4)$.

O Jacobiano para a estrutura é apresentado nas Equações de 3.45 a 3.52.

$$J = \begin{bmatrix} Z_0 \times (p_4 - p_0) & Z_1 \times (p_4 - p_1) & Z_2 \times (p_4 - p_2) & Z_3 \times (p_4 - p_3) \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$p_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$p_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$p_2 = \begin{bmatrix} l_2 C_1 C_2 \\ l_2 S_1 C_2 \\ l_2 S_2 + d_1 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$p_3 = \begin{bmatrix} C_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23}) \\ S_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23}) \\ l_2 S_2 + l_3 S_{23} + d_1 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$p_4 = \begin{bmatrix} C_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23} + l_4 C_{234}) \\ S_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23} + l_4 C_{234}) \\ l_2 S_2 + l_3 S_{23} + l_4 S_{234} + d_1 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$z_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$z_1 = z_2 = z_3 = \begin{bmatrix} S_1 \\ -C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Após estes cálculos obtém-se as o conjunto de torques necessários manter a estrutura em equilíbrio estático. Para isso, primeiramente é obtida a matriz homogênea relativa ao elo por meio da Equação 3.38. Depois é calculada a Força que atua sobre ele por meio da Equação 3.53. No caso do ERA3CIDI, a força que atua sobre ele é equivalente ao peso do próprio dispositivo robótico, conforme definição da Terceira Lei de Newton.

$$f_i^i = R_{i+1}^i \cdot f_{i+1}^{i+1} \quad (3.53)$$

Onde, $R_{i+1}^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)$ e H_i^{i-1} é dado em relação a Equação 3.38 e f_{i+1}^{i+1} é a força aplicada sobre este último elo dada pela sua forma vetorial [fx fy fz].

Em seguida é calculado o momento para o mesmo elo, conforme a Equação 3.54.

$$n_i^i = R_{i+1}^i \cdot n_{i+1}^i + O_{i+1}^i \times f_{i+1}^i \quad (3.54)$$

Onde, n_{i+1}^i na primeira iteração é $[0 \ 0 \ 0]^T$ e $O_{i+1}^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 4)$.

Por fim, o torque estático, para o Elo em questão é dado pela Equação 3.55.

$$\tau_i = n_i^i \cdot \hat{Z}_i^i \quad (3.55)$$

Onde, $\hat{Z}_i^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 3)$.

3.4.3.2 Protótipo 2

Para o protótipo 2 também é seguida as mesmas etapas citadas anteriormente. Primeiramente é obtida a matriz homogênea da junta analisada por meio da Equação 3.56, com $i = 1, 2$ e 3 para as patas e $i = 1$ e 2 para o braço robótico. As Equações descritas aqui para as velocidades angular (ω) e linear (v) são baseadas em (CRAIG, 2012) e adaptadas ao propósito do projeto e a simulação em software Matlab (MATLAB, 2022).

$$H_i^{i-1} = R_{z,\theta_i} \cdot T_{z,d_i} \cdot R_{x,\alpha_i} \cdot T_{x,l_i} \quad (3.56)$$

Em que,

$$R_{z,\theta_i} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$T_{z,d_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$R_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$T_{x,l} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Após a obtenção desta matriz é realizado o levantamento da velocidade angular (ω) por meio da Equação 3.61.

$$\omega_i^i = R_{i-1}^i \cdot \omega_{i-1}^{i-1} + \dot{\theta}_i \cdot \hat{Z}_i^i \quad (3.61)$$

Em que na primeira iteração ω_{i-1}^{i-1} é igual a $[0 \ 0 \ 0]^T$, $R_{i-1}^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)^T$ e $\hat{Z}_i^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 3)$.

Em seguida é obtido a velocidade linear v relativo a junta em questão pela Equação 3.62.

$$v_i^i = R_{i-1}^i \cdot (v_{i-1}^{i-1} + W_{i-1}^{i-1} \times O_i^{i-1}) \quad (3.62)$$

As equações para a obtenção do Jacobiano para a estrutura das patas e do braço são mostradas nas Equações 3.63 a 3.64, respectivamente.

$$J_{patas} = \begin{bmatrix} Z_0 \times (p_3 - p_0) & Z_1 \times (p_3 - p_1) & Z_2 \times (p_3 - p_2) \\ z_0 & z_1 & z_2 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

$$J_{braco} = \begin{bmatrix} Z_0 \times (p_2 - p_0) & Z_1 \times (p_2 - p_1) \\ z_0 & z_1 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Depois disso é realizado o processo para a obtenção do torque necessário para a manutenção de equilíbrio estático da estrutura utilizando a metodologia equivalente a apresentada para o protótipo 1. Porém aqui a matriz homogênea relativa ao elo é obtida por meio da Equação 3.56. Depois é calculada a força que atua sobre ele por meio da Equação

3.65. No caso do ERA3CIDI, a força que atua sobre ele é equivalente ao peso do próprio dispositivo robótico, conforme definição da Terceira Lei de Newton.

$$f_i^i = R_{i+1}^i \cdot f_{i+1}^{i+1} \quad (3.65)$$

Em que, $R_{i+1}^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)$ e H_i^{i-1} é dado em relação a Equação 3.56 e f_{i+1}^{i+1} é a força aplicada sobre este último elo dada pela sua forma vetorial $[f_x \ f_y \ f_z]$.

Em seguida é calculado o momento para o mesmo elo utilizando a Equação 3.66).

$$n_i^i = R_{i+1}^i \cdot n_{i+1}^i + O_{i+1}^i \times f_{i+1}^i \quad (3.66)$$

Em que, n_{i+1}^i na primeira iteração é $[0 \ 0 \ 0]^T$ e $O_{i+1}^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 4)$.

Por fim, o torque estático, para o Elo em questão é dado pela Equação 3.67.

$$\tau_i = n_i^i \cdot \hat{Z}_i^i \quad (3.67)$$

Em que, $\hat{Z}_i^i = H_i^{i-1}(1 : 3, 3)$.

3.5 Modelo dinâmico

Os Sistemas dinâmicos são aqueles em que o comportamento evolui com o tempo, suas propriedades físicas, como massa ou inércia se mantém constantes e seu comportamento pode mudar em função do que ocorre ao seu redor (NIKU, 2013).

Para o dispositivo a força de aceleração da gravidade g é dada como $G = [g_x \ g_y \ g_z]$, pois a magnitude de como ela age sobre ele depende da orientação do dispositivo em relação ao espaço em que se encontra.

Para a obtenção deste modelo é necessário a distinção entre a matriz homogênea em função dos Elos e aquela relativa a cada uma das juntas.

As Equações descritas aqui são também baseadas em (CRAIG, 2012) e adaptadas ao propósito do projeto e a simulação em software Matlab (MATLAB, 2022).

Para o protótipo 1 é utilizada a Equação 3.38 de duas formas distintas, em que se altera a Tabela D-H para dar destaque a cada um dos centros de massa em cada elo 4. Já para o protótipo 2 são utilizadas a Equação 3.56 e, as Tabelas D-H 5 e 6.

É importante observar que as iterações ocorrem em número equivalente ao descrito pela Tabela 4 para as juntas, ou seja, no caso do protótipo 1 ela ocorre por 4 ciclos correspondentes às juntas 1, 2, 3 e 4. Outra informação importante é que as matrizes homogêneas são denominadas aqui como HEJ_i para o domínio das juntas e HEE_i ($i = 1$,

Tabela 4 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise do centro de massa elo a elo de uma pata referente ao protótipo 1.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	0	0	90°
2	θ_2^*	d_1c	0	0
3	θ_3^*	0	l_2c	0
4	θ_4^*	0	l_3c	0
5	0	0	l_4c	0

Tabela 5 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise do centro de massa elo a elo de uma pata referente ao protótipo 2.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	0	0	90°
2	θ_2^*	0	l_1c	0
3	0	0	l_2c	0

Tabela 6 – Tabela de Parâmetros D-H obtida pela análise do centro de massa elo a elo do braço robótico

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	0	0	90°
2	0	0	l_1c	-90°

2, 3 e 4 na primeira parte e $i = 4, 3, 2$ e 1 na segunda parte) para o domínio dos elos e seus respectivos centros de massa. As iterações ocorrem em duas partes distintas, a primeira a partir do primeiro elo para o último e, a segunda parte do último elo até o primeiro. Já para o protótipo 2 as iterações ocorrem por 3 ciclos correspondentes às juntas 1, 2 e 3 para patas e 1 e 2 para o braço. As matrizes homogêneas são denominadas aqui como HEJ_i para o domínio das juntas e HEE_i para o domínio dos elos e seus respectivos centros de massa. As iterações ocorrem em duas partes distintas, a primeira a partir do primeiro elo para o último e, a segunda parte do último elo até o primeiro.

Depois da obtenção das matrizes homogêneas é utilizada a Equação 3.68, passando como parâmetro H a matriz HEJ_i . Em seguida é obtida a aceleração angular ($\dot{\omega}_{i+1}^{i+1}$) do elo corrente, por meio da Equação 3.69.

$$\omega_{i+1/0}^0 = \omega_{i/0}^0 + \hat{n}_{i+1/i}^i \cdot \dot{\theta}_i \quad (3.68)$$

$$\dot{\omega}_{i+1}^{i+1} = R_i^{i+1} \cdot \dot{\omega}_i^i + R_i^{i+1} \cdot \dot{\omega}_i^i \times \dot{\theta}_i \cdot \hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} \cdot \hat{Z}_{i+1}^{i+1} \quad (3.69)$$

Onde, $R_i^{i+1} = HEJ_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)^T$, $\omega_i^i = [0 \ 0 \ 0]$ na primeira iteração, $\dot{\theta}_i$ é a velocidade entregue na junta pelo motor de torque, $\hat{Z}_{i+1} = HEJ_i^{i-1}(1 : 3, 3)^T$ e $\ddot{\theta}_{i+1}$ é a aceleração entregue na junta pelo motor de torque.

O próximo passo dentro desta iteração é a obtenção da aceleração linear $\dot{v}$ através da Equação 3.70.

$$\dot{v}_{c_{i+1}}^{i+1} = R_i^{i+1} \cdot (\dot{\omega}_i^i \times O_{i+1}^i + \omega_i^i \times (\omega_i^i \times O_{i+1}^i) + \dot{v}_i^i) \quad (3.70)$$

Onde, $R_i^{i+1} = HEJ_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)^T$, $O_{i+1}^i = HEJ_i^{i-1}(1 : 3, 4)$, $\dot{v}_i^i = [g_x \ g_y \ g_z]$, onde g_x , g_y e g_z é a aceleração da gravidade decomposta, conforme a orientação do dispositivo no plano.

A velocidade linear no centro de massa é calculada através da Equação 3.71.

$$\dot{v}_{i+1}^{i+1} = \dot{\omega}_{i+1}^{i+1} \times Oc_{i+1}^{i+1} + \omega_{i+1}^{i+1} \times (\omega_{i+1}^{i+1} \times Oc_{i+1}^{i+1}) + \dot{v}_{i+1}^{i+1} \quad (3.71)$$

Onde, $Oc_{i+1}^{i+1} = HEE_i^{i-1}(1 : 3, 4)$.

Os próximos passos na primeira parte para aquisição do modelo cinemático são os cálculos da força (F) e do momento (N) para cada uma das juntas. Sua formulação algébrica é apresentada através das Equações 3.72 e 3.73.

$$F_{i+1}^{i+1} = m_{i+1} \cdot \dot{v}_{c_{i+1}}^{i+1} \quad (3.72)$$

Onde, m é a massa do elo que está sendo iterado no momento.

$$N_{i+1}^{i+1} = I_{i+1}^{c_{i+1}} \cdot \dot{\omega}_{i+1}^{i+1} + \omega_{i+1}^{i+1} \times I_{i+1}^{c_{i+1}} \cdot \omega_{i+1}^{i+1} \quad (3.73)$$

$I_{i+1}^{c_{i+1}}$ Onde, m é a massa do elo que está sendo iterado no momento.

$$I_p = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

Os valores para cada um dos elementos da Matriz são obtidos computacionalmente. Por este ser considerado em relação com o centro de massa, os elementos $I_{xy} = I_{yx}$, $I_{xz} = I_{zx}$ e $I_{yz} = I_{zy}$ são iguais a zero. Já, os demais, são: $I_{xx} = \frac{m}{12} \cdot (h^2 + l^2)$, $I_{yy} = \frac{m}{12} \cdot (w^2 + h^2)$ e $I_{zz} = \frac{m}{12} \cdot (l^2 + w^2)$.

Ao final de cada iteração, os vetores resultantes para a Força (F) e o Momento (N) são armazenados em uma lista com índice equivalente ao resultado da iteração que ele

representa. Estes vetores serão a entrada para as funções inerentes à segunda parte do algoritmo que é realizado de fora para dentro do sistema.

Ao final de todas as iterações da primeira parte, ou seja, da parte que realiza a aplicação de equações de dentro para fora é realizada a segunda parte, de fora para dentro.

Primeiramente são obtidas as matrizes homogêneas HEJ e HEE para a junta corrente. Depois é calculada a Força resultante no elo iterado por meio da Equação 3.75.

$$f_i^i = R_{i+1}^i \cdot f_{i+1}^{i+1} + F_i^i \quad (3.75)$$

Onde, $R_{i+1}^i = HEJ_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)$, $f_{i+1}^{i+1} = [0 \ 0 \ 0]^T$ na primeira iteração e F_i^i é a força armazenada na lista de forças obtida durante o cálculo das forças na primeira parte (de dentro para fora) e, sua obtenção requer a busca pelo índice equivalente a iteração corrente.

O momento é calculado pela aplicação da Equação 3.76.

$$n_i^i = N_i^i + R_{i+1}^i \cdot n_{i+1}^{i+1} + O_{c_i}^i \times F_i^i + O_{i+1}^i \times R_{i+1}^i \cdot f_{i+1}^{i+1} \quad (3.76)$$

N_i^i é obtido a partir do índice, equivalente a iteração corrente, na lista de momentos calculados e armazenados na primeira parte; $R_{i+1}^i = HEJ_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)$, $n_{i+1}^{i+1} = [0 \ 0 \ 0]^T$ na primeira iteração, $O_{c_i}^i = HEE_i^{i-1}(1 : 3, 4)$, F_i^i é o mesmo utilizado na Equação 3.75 e $O_{i+1}^i = HEJ_i^{i-1}(1 : 3, 1 : 3)$.

O torque final em cada uma das juntas é obtido pela Equação 3.77.

$$\tau_i = (n_i^i)^T \cdot \hat{Z}_i^i \quad (3.77)$$

As equações até aqui permitem que seja modelado o sistema robótico, considerando cada pata individualmente e a elucidação da capacidade de torque necessária para cada servomotor.

3.6 Modelo CAD e implementação da estrutura mecânica

Para o protótipo 1, foram desenvolvidos os modelos CAD a partir das metodologias apresentadas utilizando o software FreeCad (FREECAD, 2022) que dirigem a simulação geométrica e algébrica com software Geogebra (INSTITUTE, 2023) e a construção do dispositivo físico. O resultado final desses modelos são mostrados na Figura 14.

Com base na metodologia apresentada para o desenho da estrutura e no modelo CAD, foram escolhidos os materiais para a construção do protótipo. Após as análises das diversas possibilidades existentes, o alumínio foi escolhido para esse fim devido a leveza,



Figura 15 – Estrutura física do esqueleto do dispositivo referente ao protótipo 1 confeccionada em alumínio.

que este peso é referente ao esqueleto do robô, sem as suas camadas protetoras, circuitos, fontes e 2 recipientes de produtos químicos que ele deverá carregar para aplicação em lavoura. Estes valores são importantes para se modelar a dinâmica do sistema e permite que se faça uma inferência dos torques necessários para sua movimentação.

Em relação ao protótipo 2, porém, nesta construção foram utilizadas, artefatos de alumínio pré-fabricados, já disponíveis no mercado e moldados para a fixação de servo motores. Por fim, o protótipo foi levado a uma balança doméstica convencional e apresentou aproximadamente 5.0 Kg.

Os artefatos mecânicos utilizados para a construção do protótipo 2 são apresentados na Figura 16.

3.7 Simulação da cinemática

Como dito anteriormente, foi possível a elaboração de um modelo geométrico para a simulação da aplicação das cinemáticas diretas e inversas, obtidas por meio das equações apresentadas na seção metodologias e subseção modelo cinemático.

As simulações a partir daqui levam em consideração de que todas as 4 patas devem ter um comportamento cinemático e dinâmico equivalente com sua integração. A sincronia deve ser tratada em um estudo posterior que relaciona todos os modelos

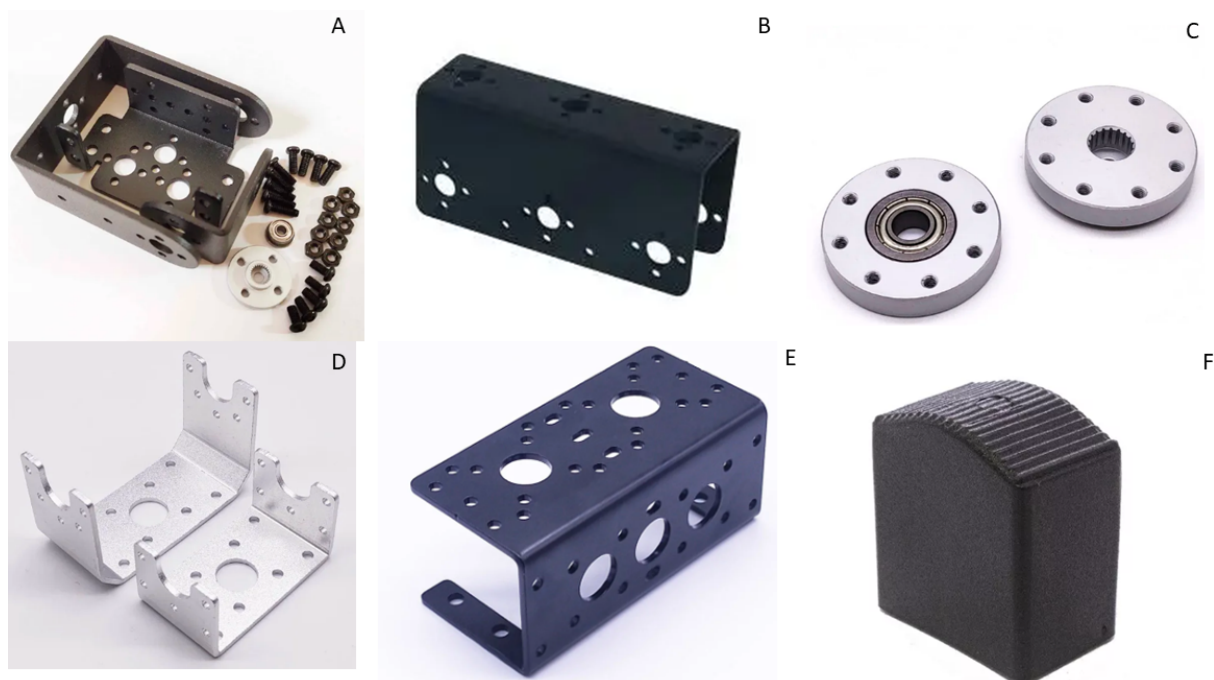


Figura 16 – Artefatos utilizados na construção da estrutura física do esqueleto do dispositivo referente ao protótipo 2. A) dobradiça e extensão para servo de 40 kgf.cm; B) Suporte Multifuncional; C) Engrenagens e rolamento de metal para servo de 60 kgf.cm; D) Suporte e extensão para servo de 60 kgf.cm; E) Suporte para servo de 60 kgf.cm; F) Artefato de borracha comumente utilizado como pé de escada.

construídos aqui com o sistema de controle do dispositivo. Desta forma, primeiramente foram modelados no software GeoGebra (INSTITUTE, 2023) as patas referentes aos dois protótipos apresentados e ao braço robótico específico do protótipo 2. Eles são controlados por meio da alteração de posicionamento angular de suas juntas, quando se trata de avaliação da cinemática direta e de acordo com a especificação de posição da extremidade de seu último elo quando é abordada a cinemática inversa. Outra questão relevante, é que os estudos sobre a cinemática leva a compreensão mais sucinta de que a abordagem de simulação de uma pata robótica é equivalente a de um braço robótico comumente utilizados em ambientes industriais, por conta de que em ambos, a referência de inércia do dispositivo é a base do robô. No caso do ERA3CIDI, a estrutura pode estar em movimento, porém, para suas patas a base ainda está fixa e permite que se realize o mapeamento do espaço em relação a ela, por meio de sua conexão ao primeiro elo e sua primeira junta. As Figuras 17, 18, 19 e 20 mostram as janelas de simulação da cinemática direta e inversa no software GeoGebra.

Para a simulação da cinemática direta do protótipo 1 com o GeoGebra foram necessárias a criação dos controles deslizantes para representar cada uma das juntas existentes em cada uma das patas e, elas foram nomeadas como θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4 . Depois, as equações relativas ao posicionamento de cada um dos elos foram descritas e nomeadas como

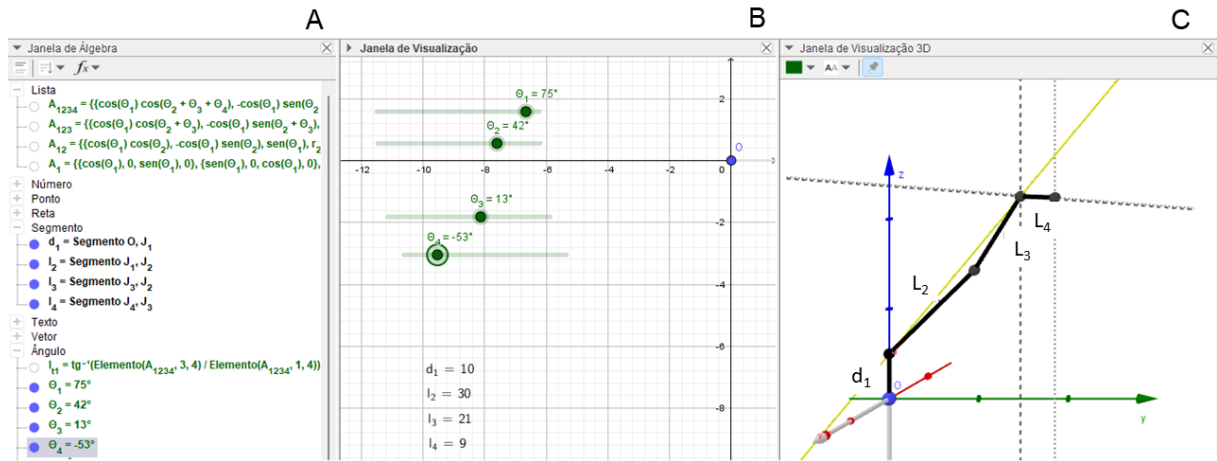


Figura 17 – Janelas para simulação da cinemática direta da pata robótica do ERA3CIDI no software GeoGebra referente ao protótipo 1. A) mostra os valores algébricos utilizados para a simulação; B) exibe os controles deslizantes relativos aos ângulos que podem para o ERA3CIDI variar entre -90° e 90° ; C) é a janela de visualização em 3 dimensões dos movimentos realizados pela pata com relação aos ângulos determinados nos controles deslizantes.

$A_{1234} = T_0^4$, $A_{123} = T_0^3$, $A_{12} = T_0^2$ e $A_1 = T_0^1$; estes nomes fazem referência a cada uma das transformações homogêneas apresentadas na seção de metodologia que trata da cinemática direta. Com esta simulação foi possível averiguar a validade das transformadas homogêneas obtidas e assim assegurar que a sua utilização em um sistema real seja bem sucedida.

Outra simulação realizada no GeoGebra permite validar os modelos algébricos da cinemática inversa. Neste caso é possível determinar um ponto no espaço e deixar que as equações determinem qual o ângulo que as juntas devem ter para que ele seja alcançado. A tela referente a esta tarefa é mostrada na Figura 18.

Assim como para a simulação da cinemática direta, foi necessário a criação de 3 controles deslizantes, um para cada coordenada cartesiana (p_x , p_y e p_z) para a definição de pontos no plano cartesiano para definir o comportamento das juntas e elos através da aplicação das equações algébricas obtidas na seção de cinemática inversa. Os valores resultantes foram armazenadas em variáveis no software nomeadas como ϵ , ϕ , θ_{1+} , θ_{2+} , θ_{3+} e θ_{4+} . O sinal de $+$ em cada uma delas diz respeito à qual sinal resultante de uma raiz quadrada é utilizado $\pm\sqrt{x}$. Como resultado da simulação, são percebidas as partes em que ocorrem as singularidades, ou seja, quando o modelo não consegue posicionar a extremidade do último elo no ponto desejado por não existir ângulo que o permita. Com base nisto é entendido que ao se desenvolver o sistema de controle do robô estas questões devem ser consideradas e estratégias para que não ocorram erros devem ser implementadas.

No caso do protótipo 2 a Figura 19 mostra a janela de simulação da cinemática

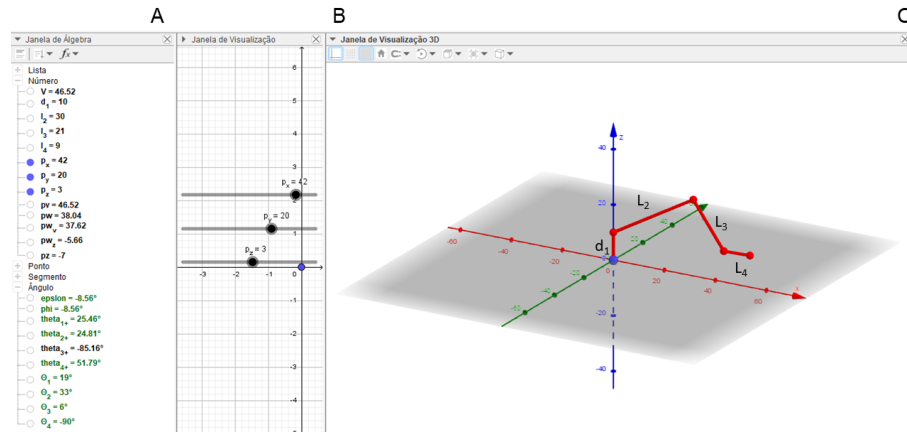


Figura 18 – Janelas para simulação da cinemática inversa da pata robótica do ERA3CIDI no software GeoGebra para o protótipo 1. A) mostra os valores algébricos utilizados para a simulação; B) exhibe os controles deslizantes relativos às posições do extremo do último elo que devem estar dentro do espaço de trabalho da pata; C) é a janela de visualização em 3 dimensões dos movimentos realizados pela pata com relação aos ângulos calculados pelos modelos algébricos obtidos pela cinemática inversa.

direta e inversa da pata e a Figura 20 do braço robótico que emula a cabeça e pescoço do dispositivo.

Na Figura 19 c) os seguimentos contínuos em preto, também fazem referencia à cinemática direta. Suas juntas no gráfico são denotadas como J_1 , J_2 e J_3 e os equivalentes angulares apresentados em b) da mesma figura são os controles deslizantes nomeados como θ_1 , θ_2 e θ_3 . Os intervalos possíveis para cada um destes ângulos foram definidos, respectivamente, como: -90° a 45° , -45° a 135° e -135° a 135° .

Os intervalos angulares foram obtidos durante a calibragem dos servo motores fixados nas articulações e correspondem aos ângulos possíveis de serem atingidos por cada junta sem que os elos anteriores e posteriores se chocassem entre si ou contra a base robótica. Para a realização destas verificações, as articulações com movimento entorno do eixo vertical definido como Z foram definidos como ângulo zero, em um intervalo que varia de -90° e 90° a extremidade de seu Elo em $x = 0$ e $y = 5$.

Para as demais juntas, o centro também foi definido como zero dentro de um intervalo que varia entre -135° e 135° e giram em torno do eixo horizontal. Sua extremidade posterior foi definida primordialmente como sendo paralela ao eixo vertical. Estes eixos vertical e horizontal são equivalentes aos apresentados nas Figuras 19 e 20.

Na calibragem dos servo motores, os demais servos são fixados em 0° e o eixo em questão é movido até ao o extremo possível de seu elo imediato posterior.

Já os segmentos pontilhados em vermelho e ponto-traço em verde, correspondem a simulação da cinemática inversa com cotovelo para cima e cotovelo para baixo denotados

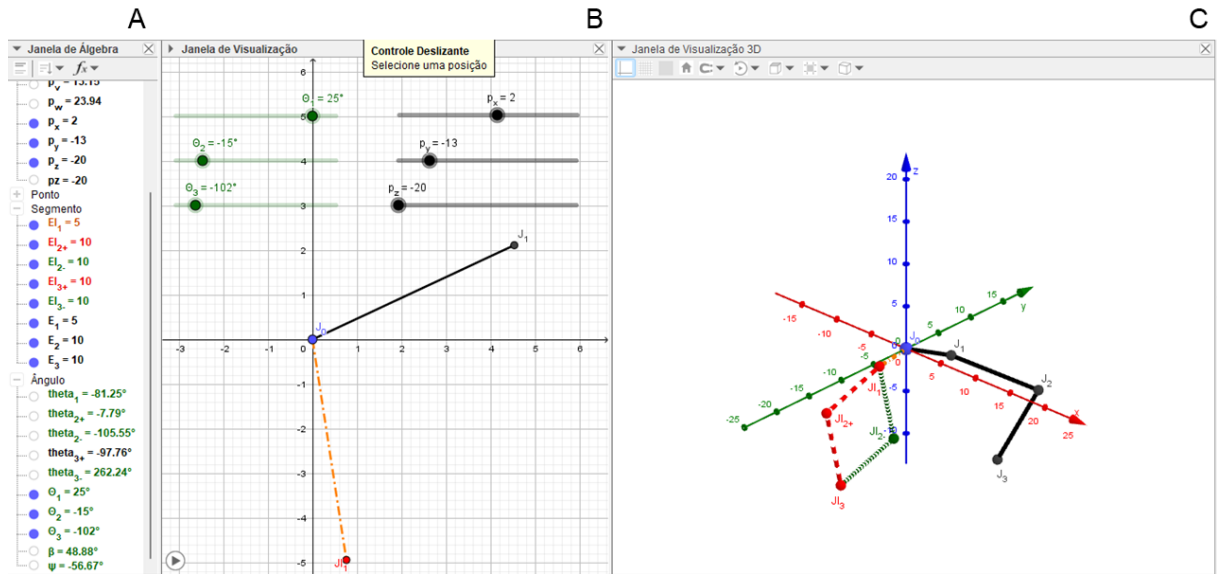


Figura 19 – Janelas para simulação da cinemática direta e inversa da pata robótica do ERA3CIDI no software Geogebra referente ao protótipo 2. A) mostra os valores algébricos utilizados para a simulação; B) exibe os controles deslizantes relativos aos ângulos das juntas para a simulação da cinemática direta e, a posição do extremo do último elo que devem estar dentro do espaço de trabalho da pata na simulação da cinemática inversa; C) é a janela de visualização em 3 dimensões dos movimentos realizados pela pata com relação aos elos e ângulos calculados pelos modelos algébricos obtidos pelo estudo cinemático direto e inverso.

na mesma sequência que se descreve como os vértices JI_{2+} e JI_{2-} . JI_0 está relacionado à base do robô e JI_1 e JI_3 são congruentes em todos os instantes. A extremidade JI_3 é determinada por 3 controles deslizantes nomeados como p_x , p_y e p_z . O intervalo para estes controles foram definidos como -20 e 20 que correspondem à soma dos elos $\overline{JI_2JI_3}$.

A partir desta mesma metodologia foram obtidos os valores possíveis para cada uma das juntas do braços robótico definido com variação de -15° e 135° para θ_1 que rotaciona ao redor do eixo horizontal e, -90° e 90° para θ_2 que rotaciona sobre o eixo vertical.

As equações relativas à cinemática direta e inversa são importantes para a movimentação segura e adaptativa do robô, pois com seus valores resultantes é possível evitar colisões entre as patas, base e patas e, entre as patas e obstáculos e, assim, reduzir a probabilidade de danos estruturais e eletrônicos.

Similar ao que foi citado no parágrafo que trata sobre a cinemática inversa do protótipo 1, aqui também foram criados 3 controles deslizantes, um para cada coordenada cartesiana (p_x , p_y e p_z). porém aqui as variáveis foram nomeadas como ϵ , ϕ , $theta_{1+}$, $theta_{2+}$, $theta_{3+}$.

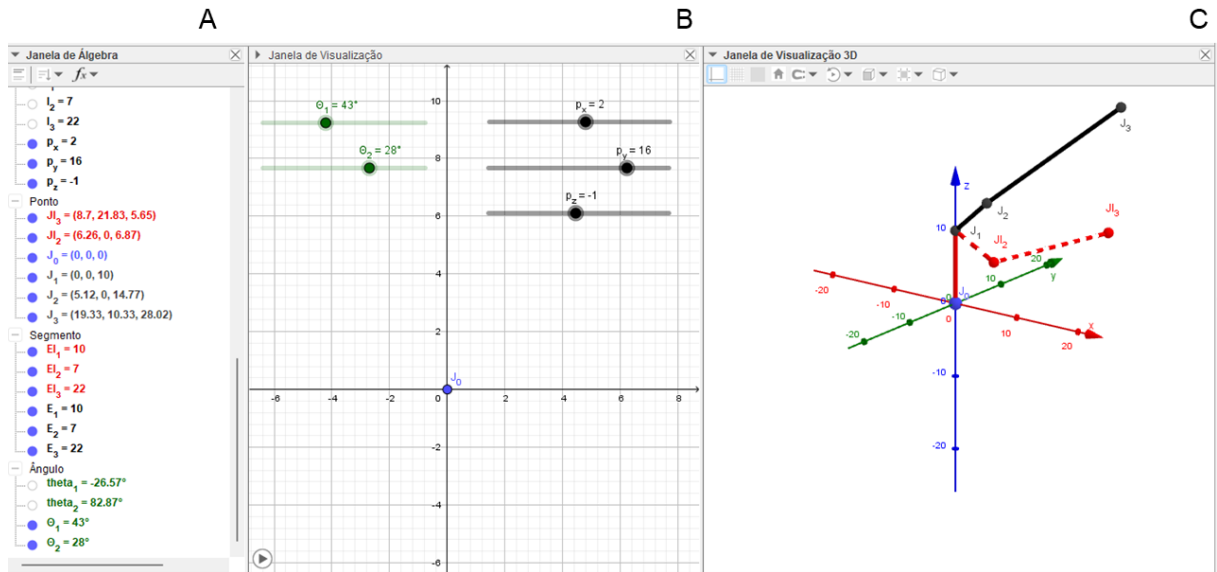


Figura 20 – Janelas para simulação da cinemática inversa da pata robótica do ERA3CIDI no software Geogebra. A) mostra os valores algébricos utilizados para a simulação; B) exibe os controles deslizantes relativos às posições do extremo do último elo que devem estar dentro do espaço de trabalho da pata; C) é a janela de visualização em 3 dimensões dos movimentos realizados pela pata com relação aos ângulos calculados pelos modelos algébricos obtidos pela cinemática inversa.

3.8 Simulação dinâmica

Além das simulações realizadas com o GeoGebra também foram feitas simulações no Matlab (MATLAB, 2022). Elas tem o propósito de permitir a visualização do sistema em funcionamento sob a aplicação de um sinal senoidal que varia de $-\frac{\pi}{2}$ e $\frac{\pi}{2} rad(radianos)$ a uma frequência fixa de 0.436332313 rad/s. Com esta simulação, é possível enxergar aspectos como velocidade angular e linear no último elo da pata robótica. Também é propósito desta simulação a visualização dos torques estáticos e dinâmicos para cada uma das juntas em diferentes momentos no tempo devido aos movimentos realizados por cada uma das juntas.

Para que isso seja possível, as equações inerentes aos modelos diferenciais, estáticos e dinâmicos foram calculadas e transformadas em funções computacionais a serem executadas no Simulink que, por sua vez foi configurado para receber os valores referentes às forças, massas, velocidades e acelerações. A velocidade é derivada do bloco que gera o sinal senoidal inerente à variação de posição das juntas e, a aceleração é derivada desta mesma velocidade. Isso é feito pelos blocos de derivação acrescentados na saída do gerador de sinal em cadeia.

Em relação ao protótipo 1, as funções em que se tem entrada de posição, velocidade e aceleração esses valores são passados em todas as entradas admitido que $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 =$

$\theta_4 = \theta$ para posicionamento, $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_4 = \dot{\theta}$ para velocidade e $\ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_2 = \ddot{\theta}_3 = \ddot{\theta}_4 = \ddot{\theta}$.
A Figura 21.

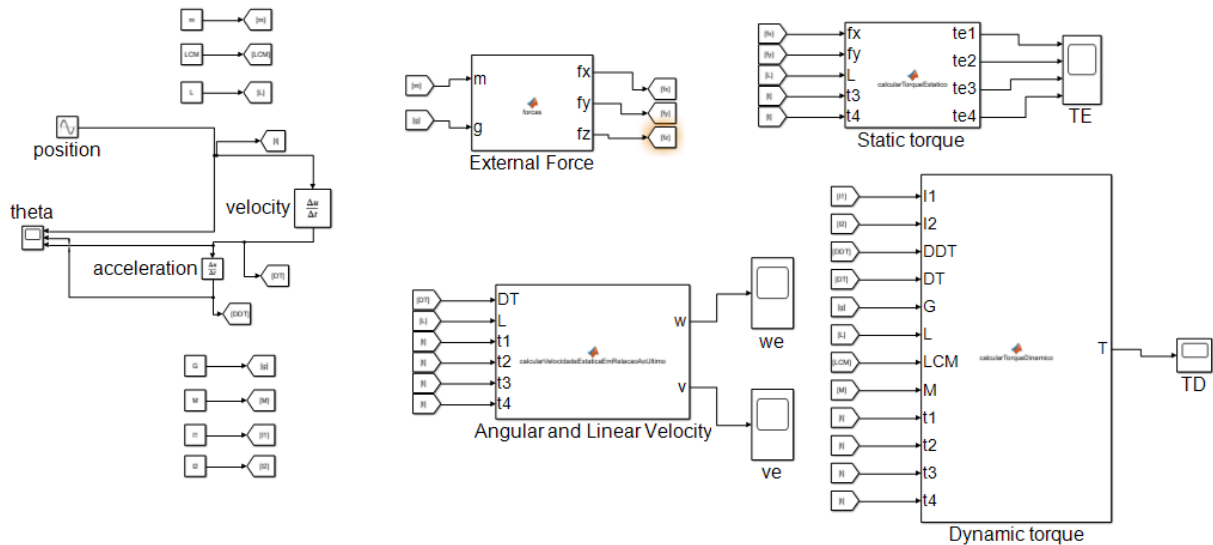


Figura 21 – Janelas para simulação dos modelos de velocidades e torques estáticos e dinâmicos.

Os gráficos da Figura 22 mostram a evolução de cada uma das grandezas em função do tempo durante o período de 60 segundos. Em 22 A) é possível visualizar que a velocidade no último elo do sistema em cadeia oscila entre 0.5 e 2.0 radianos por segundo. Isto ocorre devido a sua velocidade ser uma resultante das velocidades de outras juntas que participam do movimento corrente. Devido a todos os ângulos terem o mesmo valor, este é caracterizado como um movimento de recolhimento e extensão da pata, com todas as juntas atuando em conjunto para isso. Já a Figura 22 B) mostra o gráfico que trata da velocidade linear no extremo da última junta, dado aqui em metros por segundo. Seus valores oscilam, pelos mesmos motivos apresentados em (A) entre 0.5 e 2.5 m/s.

A Figura 22 C) e D) apresentam as magnitudes dos torques em Newton-metro (N.m) requeridos para manter o sistema em equilíbrio estático e dinâmico, respectivamente. Uma análise sobre A) mostra que durante uma atividade de contração e extensão total, os torques nas juntas θ_1 e θ_2 são idênticos com variação entre 110.0 e 140 N.m. Os torques θ_3 e θ_4 são constantes com valores de 90.0 e 110.0 N.m, respectivamente. Isto ocorre por conta dimensão do movimento que estes elos precisam realizar para se contrair ou expandir. Em B) que considera a dinâmica do sistema, as oscilações de torque são bem exuberantes em comparação ao apresentado pelo modelo estático. Os valores para o θ_1 tem pico máximo de 0.75 N.m, θ_2 de 2.0 N.m, θ_3 de 0.75 N.m e θ_4 de 0.3 N.m. A apresentação dos valores para os torques dinâmicos nos remetem que o sistema de controle deve atuar para que não haja um esforço maior do que o servomotor é capaz de suportar e, para isso, em um robô quadrúpede como o ERA3CIDI é fundamental para que ele não entre em sobrecarga devido ao acúmulo excessivo de toda sua massa sobre apenas uma das patas. Em todas as

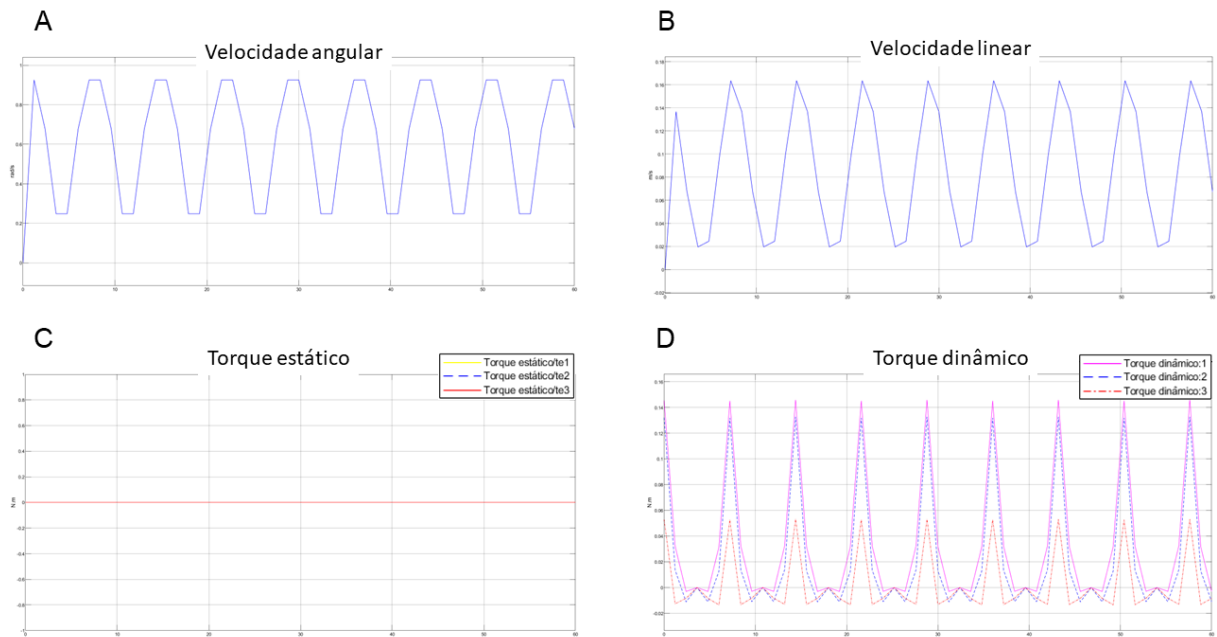


Figura 22 – Resultados obtidos através de simulação referente ao protótipo 1. A) velocidade angular em rad/s, B) linear em m/s, C) torque estático em N.m e D) dinâmico em N.m.

situações em que é possível visualizar valores negativos para torque tem-se a ideia de que a junta aproveita as forças externas, como a força da gravidade, para realizar o movimento.

Já, em se tratando do protótipo 2, os valores também são passado em todas as entradas, porém, adequadas à realidade do sistema, no que tange às suas juntas, como: $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$ para posicionamento, $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}$ para velocidade e $\ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_2 = \ddot{\theta}_3 = \ddot{\theta}$, tanto para patas quanto para o braço robótico, neste último existindo apenas 2 juntas: θ_1 e θ_2 . A Figura 23 mostra o diagrama de blocos para a simulação tanto da pata quanto do braço robótico. A diferença da aplicação de um e do outro é a quantidade de entradas.

A simulação exige que sejam determinados previamente alguns valores constantes como, comprimento dos elos, suas massas e a massa da carga sustentada pelo dispositivo. Para isso os valores foram definidos para o protótipo 1, como:

comprimento de cada um dos elos (l1, l2, l3, l4) : $L = [0.1 \ 0.3 \ 0.21 \ 0.9]$;

comprimento de cada um dos elos até o centro de massa (lcm1, lcm2, lcm3, lcm4) : $LCM = L$;

massa de cada um dos elos (m1, m2, m3, m4) : $M = [0.094 \ 0.146 \ 0.094 \ 0.02]$;

massa da carga sustentada pelo dispositivo : $m = 10$;

aceleração da gravidade percebida pelo dispositivo : $G = [0 \ 0 \ 9.8]$;

Os valores definidos para o protótipo 2, foram:

comprimento de cada um dos elos da pata em metros (I1, I2 e I3) : L = [0.05 0.1 0.1];

comprimento de cada um dos elos do braço robótico em metros (I1 e I2) : L = [0.07 0.22];

**comprimento de cada um dos elos até o centro de massa em metros (lcm1, lcm2 e lcm3)
: LCM = L;**

massa de cada um dos elos da pata em Kilograma (m1, m2 e m3) : M = [0.1 0.1 0.1];

massa de cada um dos elos do braço robótico em Kilograma (m1 e m2) : M = [0.1 0.2];

massa da carga sustentada por cada uma das patas em Kilograma : m = 10.0;

massa da carga sustentada pelo braço robótico em Kilograma : m = 5.0;

aceleração da gravidade percebida pelo dispositivo m/s^2 : 9.8;

espessura de todos os elos em metros : 0.03;

alturar de todos os elos em metros : 0.06.

Após a aplicação destes dados na Equação 3.74, foram obtidos os valores (Equações 3.82 a 3.84) para os tensores de inercia da pata e (Equações 3.85 a 3.86) do braço robótico.

$$I_{1_{pata}} = 1.0 \times 10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 50.8\bar{3} & 0 & 0 \\ 0 & 37.5 & 0 \\ 0 & 0 & 28.\bar{3} \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

$$I_{2_{pata}} = 1.0 \times 10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 113.\bar{3} & 0 & 0 \\ 0 & 37.\bar{5} & 0 \\ 0 & 0 & 90.8\bar{3} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

$$I_{3_{pata}} = 1.0 \times 10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 113.\bar{3} & 0 & 0 \\ 0 & 37.5 & 0 \\ 0 & 0 & 90.8\bar{3} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

$$I_{1_{braço\ robótico}} = 1.0 \times 10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 70.8\bar{3} & 0 & 0 \\ 0 & 37.5 & 0 \\ 0 & 0 & 48.\bar{3} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

$$I_{2_{braço\ robótico}} = 1.0 \times 10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 866.67 & 0 & 0 \\ 0 & 75.0 & 0 \\ 0 & 0 & 821.67 \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

O resultado da simulação para a pata mostrou que as maiores velocidades angular e linear da extremidade foram atingidas em -1.36 rad ($\approx -78.0^\circ$) com o valor de 16.69 rad/s ($\approx \frac{956.17^\circ}{s}$) e 1.93 m/s . Da mesma forma, os maiores valores para os torques nas juntas 1, 2 e 3 foram, respectivamente: 0.02 N.m ($\approx 0.2 \text{ kgf.cm}$), 0.22 N.m ($\approx 2.25 \text{ kgf.cm}$) e 0.22 N.m ($\approx 2.25 \text{ kgf.cm}$).

A simulação para o braço retornou o maior valor para velocidade angular e linear nas posições 0.0 e 1.36 rad . ($\approx 0^\circ$ e $\approx 77.94^\circ$) com os valores 1.31 rad/s ($\approx 75.0^\circ$) e 4.74 m/s , respectivamente. Os maiores torques apresentados foram 10.27 N.m ($\approx 104.77 \text{ kgf.cm}$) para a junta 1.0 e 0.15 N.m ($\approx 1.57 \text{ kgf.cm}$) para a junta 2, ambos na posição na posição 0 rad . (0°).

A apresentação dos valores para os torques e as velocidades refletem na escolha de cada um dos servo motores escolhidos para a implantação na estrutura, bem como, no tempo de resposta dos sistemas de controle para que os movimentos esperados para cada uma das patas sejam efetuados adequadamente.

3.9 Estrutura mecânica com os servomotores integrados

Após as simulações foram escolhidos os servomotores para iniciar a verificação de viabilidade e testar os sistemas de controle integrados à estrutura.

Em todos eles foram utilizados servos de alto torque para as patas com seus valores variando entre 20.0 kgf.cm , 30 kgf.cm , 40 kgf.cm , 60 kgf.cm e 80 kgf.cm conforme o protótipo e a configuração necessária (Figura 24). Além disso, o Protótipo 2 sob a configuração A (Figura 25) apresenta a utilização de uma *pan/tilt* com micro servo 9g SG90 para o posicionamento da câmera e do sensor ultrassônico.

O primeiro protótipo foi confeccionado com 4 servos de 60 kg para a base das patas, 8 servos de 80 kgf.cm para as juntas B e C de cada pata e 4 servos de 40 kgf.cm para a extremidade inferior de cada uma delas (Figura 26).

O segundo protótipo foi implementado sobre 3 configurações diferentes enumeradas em A, B e C. A primeira configuração (Figura 27) utiliza 8 servomotores de torque equivalente a 40 kgf.cm para as juntas B e C de cada pata, 4 servomotores de 30 kgf.cm para a base das patas. Esta configuração também utiliza uma *pan/tilt* para posicionamento da câmera e sensor ultrassônico com 2 micro servos de modelo 9g SG90.

A configuração B do protótipo 2 foi implementada de modo a utilizar 13 servos de 40 kgf.cm , sendo 12 para as patas e um para a base do braço robótico. Na extremidade do braço robótico, com a finalidade de se posicionar a câmera e sensor ultrassônico horizontalmente foi utilizado servo motor de 20 kgf.cm .

Por fim, a configuração C foi implementada com 4 servos de 60 kgf.cm na base de



Figura 24 – Servomotores utilizados para propiciar a movimentação controlada dos protótipos. A) Servomotor *FEETECH* (FT5320M) de 20 kgf.cm; B) Servomotor *DSSERVO* (DS3230) de 30 kgf.cm; C) Servomotor *DSSERVO* (DS3240) de 40 kgf.cm; D) Servomotor *DSSERVO* (DS5160) de 60 kgf.cm; E) Servomotor *DSSERVO* (DS5180) de 80 kgf.cm.



Figura 25 – Artefatos utilizados na construção da estrutura física do protótipo 2 integrados ao servo. A) dobradiça e extensão para servo de 60 kgf.cm e de 80 kgf.cm; B) dobradiça e extensão para servo de 20 kgf.cm, 30 kgf.cm e 40 kgf.cm; C) Módulo pan/tilt com 2 micro servos 9g SG90.

cada pata e 8 servos de 80 kgf.cm nas juntas B e C de cada uma delas. Manteve-se a utilização de um servo de 40 kgf.cm para a base do braço robótico e o servo de 20 kgf.cm para posicionamento horizontal.



Figura 26 – Estrutura física do ERA3CIDI referente ao protótipo 1 integrada aos servomotores.

3.10 Estrutura mecânica com os circuitos eletrônicos e de potência integrados

Para o teste de funcionamento da estrutura robótica foi utilizado a placa Arduino Uno com uma placa *Motor Shield L293D Arduino - Driver Ponte H* para 2 Motores DC + 16 Servos acoplada. As fontes de energia para os servos foi proveniente de uma bateria Lipo 2s 5000mah 7.4v 30c / 60c regulada para fornecer 6.8 V. Já para o Arduino foi utilizada um *PowerBank Xiaomi 10000 mah* com tensão de saída igual a 5.0 V.

Neste *Motor Shield* estão acoplados o sistema de pulverização capaz com os 2

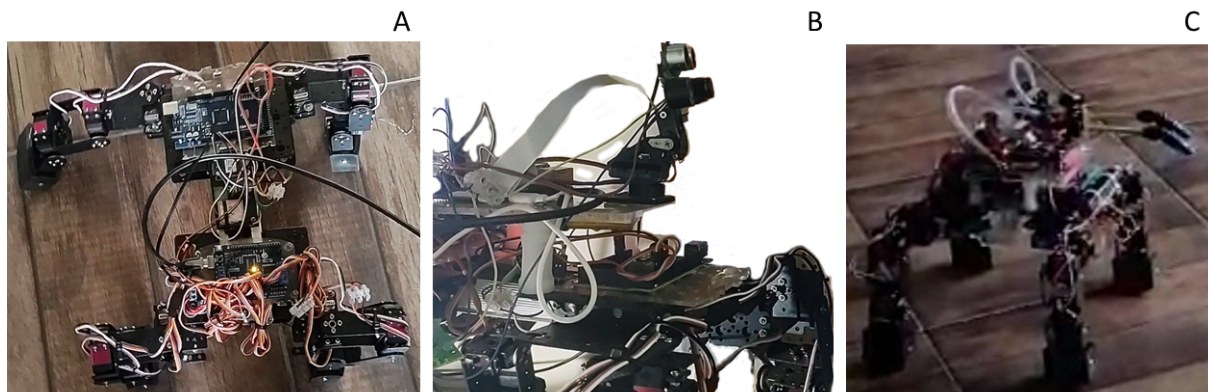


Figura 27 – Protótipo funcional do robô referente ao protótipo 2 com a configuração A, confeccionado em alumínio. A) Visão superior sobre a estrutura antes que fosse acoplado a câmera Pi e o sensor ultrassônico; B) Visão lateral da parte frontal da estrutura com o sensor ultrassônico e a câmera Pi acoplados; C) Imagem do protótipo completo e funcional.

motores DC acionados por sinais PWM e 2 sensores do tipo boia que informa o sistema computacional do módulo atuador se o recipiente de armazenamento de insumos agrícolas está ou não em seu limite máximo. Para o protótipo 2 foram utilizados 2 garrafas plásticas de 0.5 litros. Cada um destes recipientes podem ser preenchidos com substâncias como: fertilizantes, herbicidas ou inseticidas.

Durante o funcionamento do dispositivo o sensor envia para o módulo atuador a informação se o recipiente está cheio ou não. Quando o dispositivo é acionado para o preenchimento do recipiente a bomba permanece no modo sucção. Ao receber a informação de que está cheio a mini bomba é desligada. Quando o módulo recebe a informação para realizar a pulverização de um alvo, o motor DC é ligado de forma a expulsar o líquido presente no interior de um dos recipientes para que a tarefa seja realizada. O fluxo do líquido expelido pelo recipiente é contínuo o que permite que seja estimado se o recipiente está vazio ou não, bastando para isso, realizar a multiplicação do volume expelido por segundo pelo tempo que a bomba permanece no modo de pulverização. A Figura (31) mostra em detalhe o bico pulverizador, a mini bomba e o sensor boia.

De modo a permitir um monitoramento e controle responsivo ao dispositivo robótico foram utilizados sensores que monitoram sua localização e inclinação, bem como, pressão atmosférica, temperatura no ambiente, altitude e sua velocidade. Estes dados são obtidos pelos módulos apresentados na Figura 32.

O módulo GPS NEO-6M utiliza a comunicação serial/TTL para enviar ao Arduino as coordenadas de latitude e longitude, bem como, a velocidade e o momento em que esses dados foram obtidos, como: dia, mês, ano, hora, minuto e segundo. A velocidade obtida é da ordem de km/h. Já o módulo GY-87 10 DOF utiliza o protocolo de comunicação I2C para enviar para o Arduino os dados de: unidade de medida imercial (IMU), medição de velocidade,

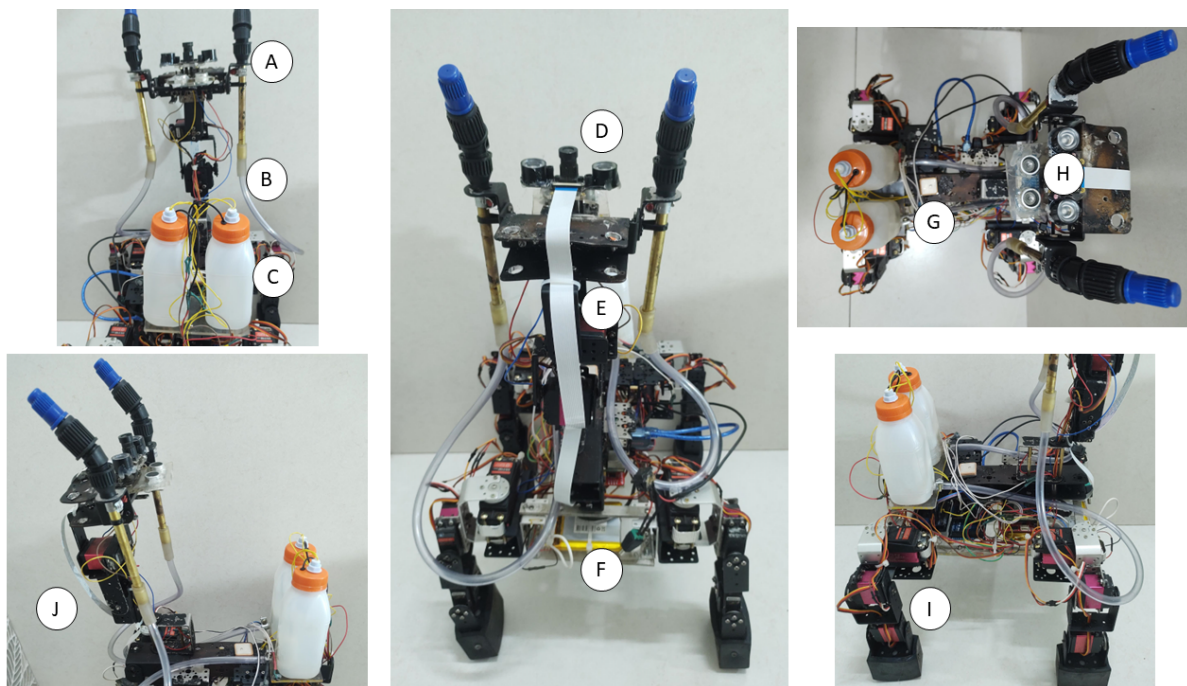


Figura 28 – Protótipo funcional do robô referente ao protótipo 2 com a configuração B, confeccionado em alumínio. A) Bico cônico regulável azul para pulverização; B) Mangueira de condução hidráulica de 4 mm de diâmetro interno; C) Recipiente plástico de 500 ml; D) Câmera PI NOIR; E) Cabo *flat* CSI; F) Bateria LiPo de 3.7 V 10000 mAh; G) Módulo GPS Neo-6M; H) Sensor ultrassônico HC-SR04; I) Pata robótica; J) Braço robótico.

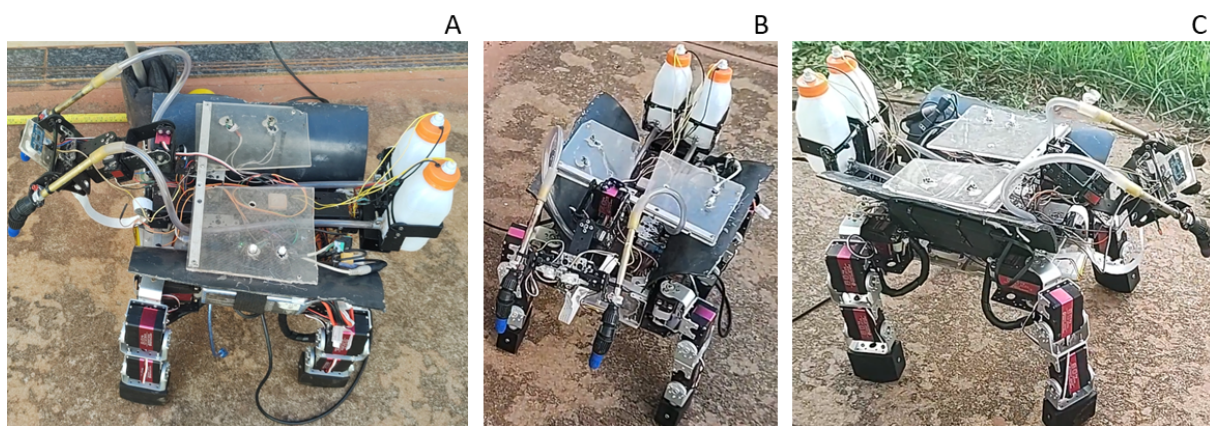


Figura 29 – Protótipo funcional do robô referente ao protótipo 2 com a configuração C, confeccionado em alumínio. A) Visão superior do dispositivo; B) Visão frontal do dispositivo; C) Visão a partir da diagonal direita.

temperatura, pressão atmosférica, verificação da orientação e forças gravitacionais.

O controle pseudo-consciente do sistema é realizado em um computador Raspberry Pi modelo 4B. Ele é conectado por uma porta USB ao Arduino Mega de modo a permitir a comunicação bidirecional entre estes dois circuitos eletrônicos, porém, existe um isolamento referente a alimentação elétrica entre cada uma das placas. O Raspberry Pi é alimentado

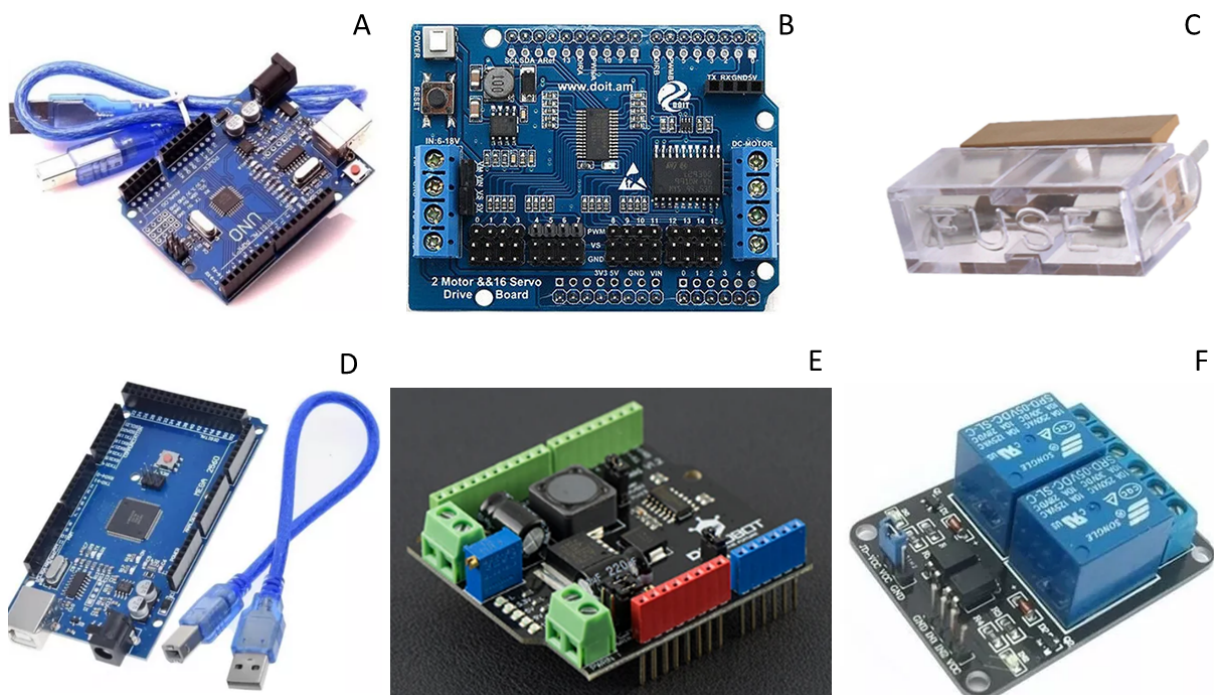


Figura 30 – Sistema eletrônico de controle e potência utilizados nos protótipos. A) Arduino Uno R3; B) Driver Ponte H para 2 Motores DC + 16 Servomotores; C) Caixa com fusível de 3.0 A; D) Arduino Mega 2560; E) Módulo de regulador de potência da DFRobot; F) Módulo de dois relês.

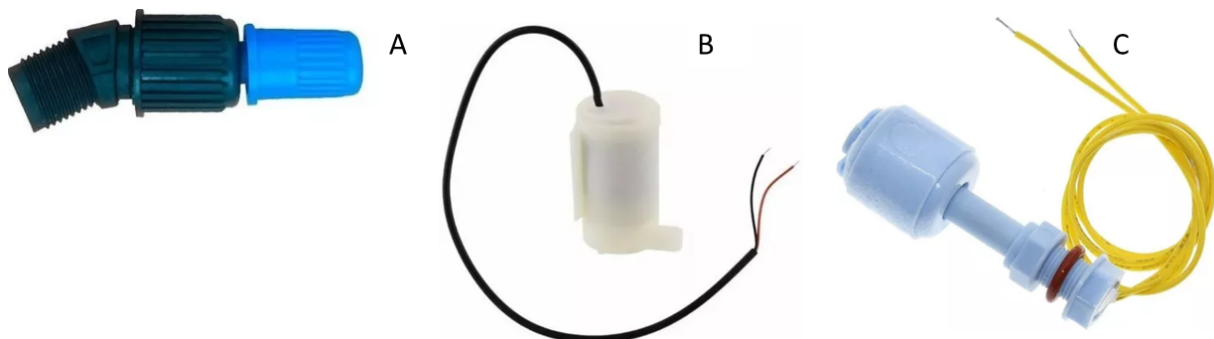


Figura 31 – Módulo de pulverização. A) bico cônico regulável para pulverização; B) mini bomba aquática submersa; C) sensor nível boia.

de forma única por um módulo de potência e baterias de lítio conectadas em cascata. Este procedimento tem o intuito de garantir ao máximo a eficiência e a qualidade de energia fornecida a ele. Este cuidado especial com esta placa advém de que o sistema operacional é instalado e executado sobre um cartão de memória microSD. O desligamento seguido da placa sem o devido cuidado de se realizar de forma lógica resulta, com muita frequência em um corrompimento dos arquivos ali armazenados e também causar danos físicos irreversíveis, inutilizando-o. Os componentes deste subsistema são mostrados na Figura 33.

O módulo de regulação e suplementação energética permite o monitoramento e o fornecimento energético. Ela garante a alimentação de 5.0 V e 3.0 A para o Raspberry Pi

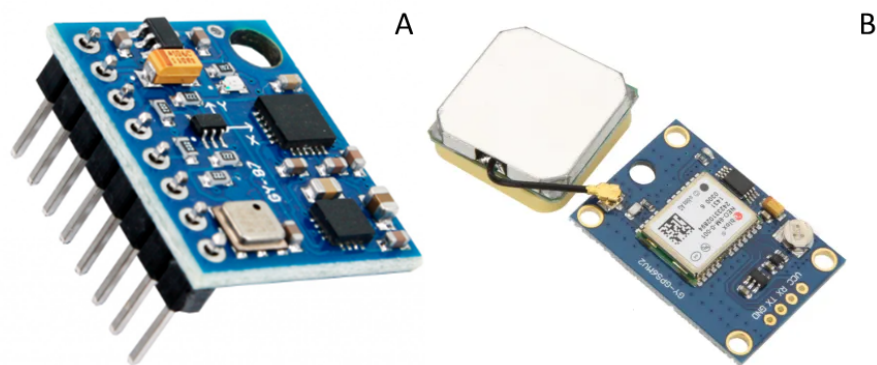


Figura 32 – Módulos de sensoriamento. A) GPS NEO-6M; B) Sensor GY-87 10 DOF - Acelerômetro e Giroscópio MPU-6050 / Magnetômetro HMC5883L / Barômetro e Temperatura BMP180.

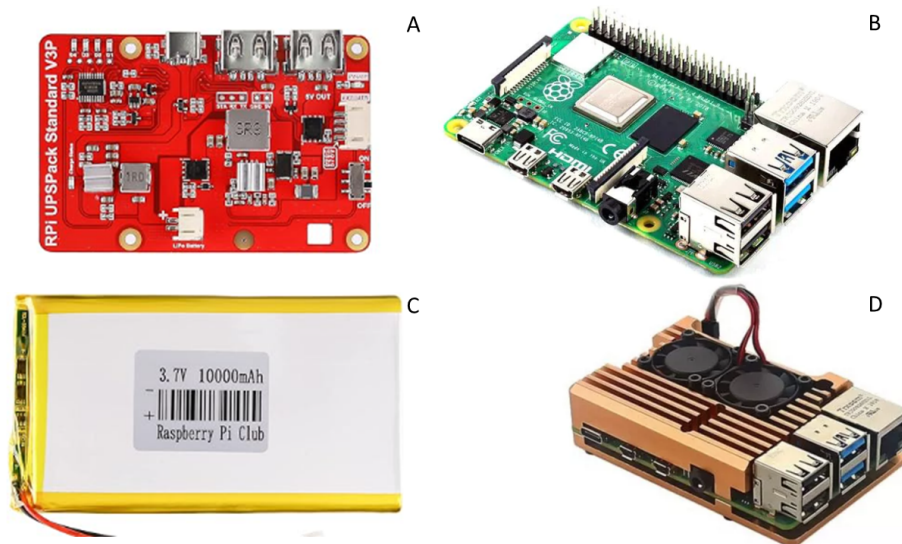


Figura 33 – Sistema computacional destinado à emulação de uma pseudo-consciência. A) Módulo de regulação e suplementação energética modelo ups v3p; B) Computador Raspberry Pi modelo 4B; C) Bateria de polímero de lítio capas de fornecer 3.7 V a uma taxa de 10000 mAh; D) Case armadura dissipador Raspberry Pi 4 com cooler duplo.

de modo a garantir a sua estabilidade enquanto está em funcionamento.

Ao Raspberry Pi são conectados uma câmera 8mp Noir V2 pela porta CSI (Camera Serial Interface) e um sensor de distância HC-SR04. A Figura 34 destaca estes dois módulos de sensoriamento conectados ao computador.

Todos os módulos são conectados entre si de modo a garantir que o sistema robótico funcione de maneira estável, ativa e reativa, com a transferência de dados tanto por meio de protocolos UART, S2C e, sinais digitais simples, como: HIGH, LOW e PWM. A Figura 35 ilustra sua organização.

Assim como seu projeto antecessor (Cardoso et al., 2020) o ERA3CIDI também

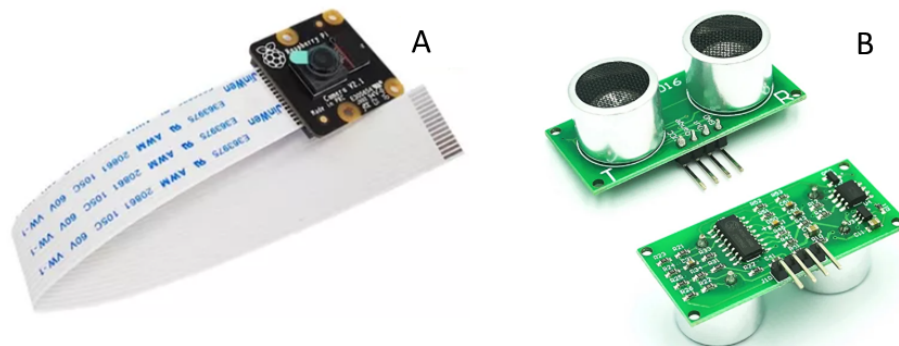


Figura 34 – Módulos de A) Câmera e B) ultrassom em destaque utilizados nos protótipos.

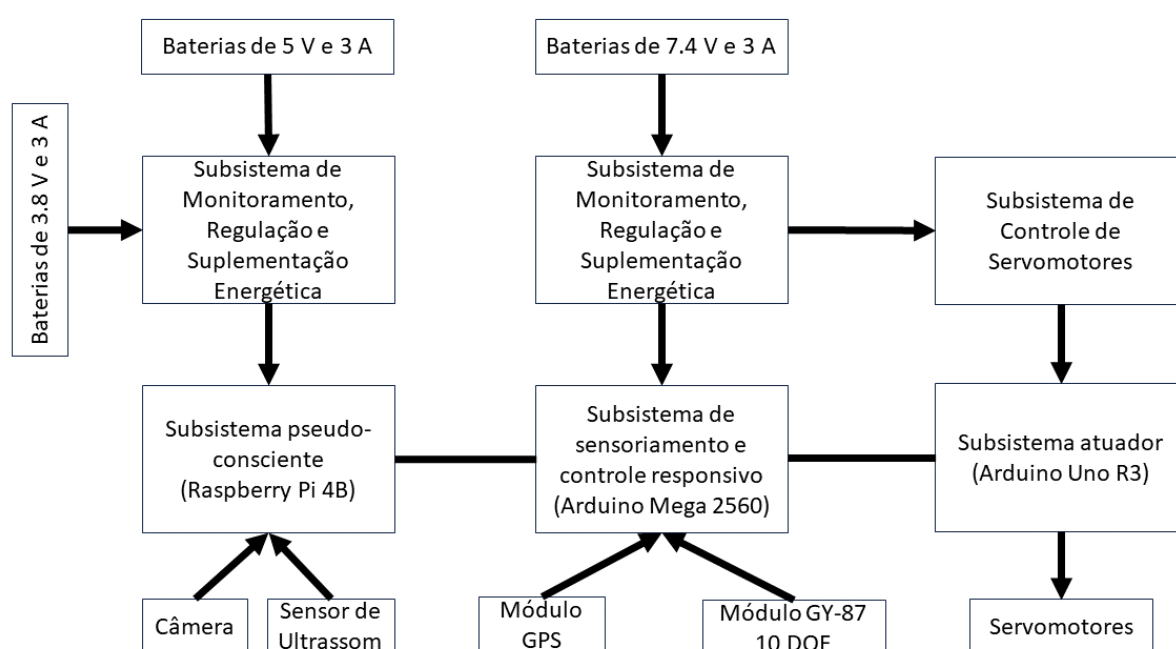


Figura 35 – Diagrama organizacional do Sistema.

está conectado por meio do protocolo http a dispositivos remotos como o Dispositivo Gestor e Gerador de Conhecimento e o Sistema Supervisório disponibilizado para Sistema Operacional Android. Este último já existente de forma legada. Neste caso a alteração ocorre tão somente no sistema supervisório, que agora permite mais do que treinar o subsistema de reconhecimento de padrões e enxergar em tempo real o que o Dispositivo Robótico Remoto está vendo. Agora ele também possibilita o monitoramento dos dados provenientes dos sensores, bem como, o controle dos movimentos do robô, desde seu braço robótico até sua mobilidade no ambiente em que ele se encontra (Figura 36).

3.10.1 Softwares

Os software foram desenvolvidos utilizando as linguagens compatíveis e mais adequadas a cada uma das plataformas de hardware. Para o Arduino foi utilizada a linguagem



Figura 36 – Interface gráfica do sistema supervisorio.

de programação Wire implementada utilizando a Arduino IDE. Para aqueles softwares que devem ser executados no Raspberry Pi foi utilizada a linguagem Python 3 implementada sobre a IDE PyCharm. Por fim, o sistema supervisorio foi implementado utilizando a IDE Android Studio com a linguagem de programação Java. Cada um dos subsistemas centrais, como: subsistema pseudo-consciente, subsistema de sensoriamento e controle responsivo e, subsistema atuador tem suas próprias compartimentações modulares distribuídas em arquivos com finalidades específicas. A Figura 37 apresenta a estrutura de softwares relativos à cada um dos subsistemas. As setas laterais indicam o fluxo de dados em ambos os sentidos.

Subsistema supervisorio e de controle remoto				
MainActivity	Era3cidiConectados	SupervisorActivity	Controlador	Task
Subsistema pseudo-consciente				
__init__	RoboMonitor	UPS2	Ecolocalizacao	ServerUDP
Imagem	VideoStream	WebcamVideoStream	PiVideoStream	ServerTCP
AutoSnap	Arduino	RoboConfig	Arquivista	ClientSocketEyeRobot
RoboSocketMonitor	RoboSocketController	RoboSocketImagem	ServicoArquivista	AutoControleMonitor
RoboController	Robo	Olho	PDI	Machine
Subsistema de sensoriamento e controle responsivo				
era3cidi_controle	controle	motion	queue	sensores
Subsistema atuador				
era3cidi_atuadores	bombas	motion	queue	servos

Figura 37 – Arquitetura de *software* do ERA3CIDI.

3.10.1.1 Subsistema atuador

Este sistema age para que os movimentos e atuações pré-definidas e aqueles solicitados pelos subsistemas superiores possam ocorrer da forma esperada sem haja dano na parte física do robô.

Os movimentos das patas do robô permitem diversos modos de configuração e trajetórias. Para que isto seja possível as patas foram numeradas de 1 a 4 de forma que do lado esquerdo da base do robô estão as patas com numeração ímpar e do lado direito as pares conforme convenção já preconizada para o desenvolvimento deste tipo de dispositivos (BARASUOL, 2013). A Figura 38 enfatiza esta definição. Na prática ela facilita na implementação em *software* das funcionalidades de locomoção esperadas para o robô de forma a realizar a determinação de movimento utilizando laço de repetição *For...Do* com verificação do número referente a sequência corrente, se é par ou ímpar.

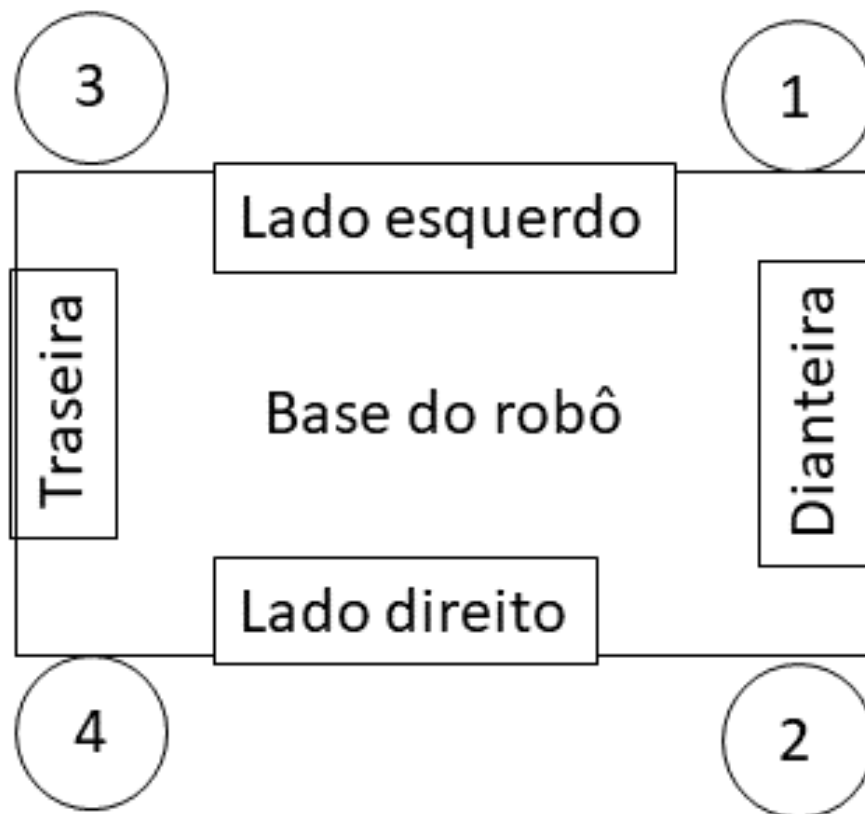


Figura 38 – Interface gráfica do sistema supervisorio.

Para realizar os movimentos esperados de forma concorrente, passando a impressão de que todas as juntas estão se movendo ao mesmo tempo foi criado uma matriz multidimensional de 14 linhas por 6 colunas. Cada linha da matriz corresponde a uma posição física de controle do servomotor e cada uma das colunas corresponde a:

1. Posição atual

2. Posição desejada
3. Posição mínima possível
4. Posição central do servo
5. Posição máxima possível
6. *Flag* de necessidade de inversão do sinal PWM.

O Algoritmo 1 mostra como este processo se dá na prática. O procedimento denominado *passadaX* é do tipo sobrecarga. Esta característica é bastante utilizado na programação dentro do paradigma da Orientação a Objetos. Na versão apresentada aqui o procedimento recebe um parâmetro denominado como *frente* e de tipo booleano. Quando seu valor é verdadeiro ele realiza a trajetória das patas de modo a resultar em um movimento do dispositivo robótico para frente, de outra forma para trás. Todo o procedimento engloba todas as patas, primeiramente concentrando-se nas patas dianteiras 1 e 2 e, posteriormente, nas traseiras 4 e 3. O parâmetro *direção* determina se a direção de movimento do robô será para a esquerda, puramente para frente ou para trás ou para a direita dependendo dos valores recebidos para esta variável que pode ser, respectivamente, 0, 1 ou 2.

Outra questão importante é que cada uma das patas é composta de três juntas articuladas com seus ângulos determinados e sustentados pelos servomotores. Essas juntas foram nomeadas com as letras A, B e C, sendo A a junta que conecta a pata a base do robô e a C a que interage diretamente com a superfície do solo.

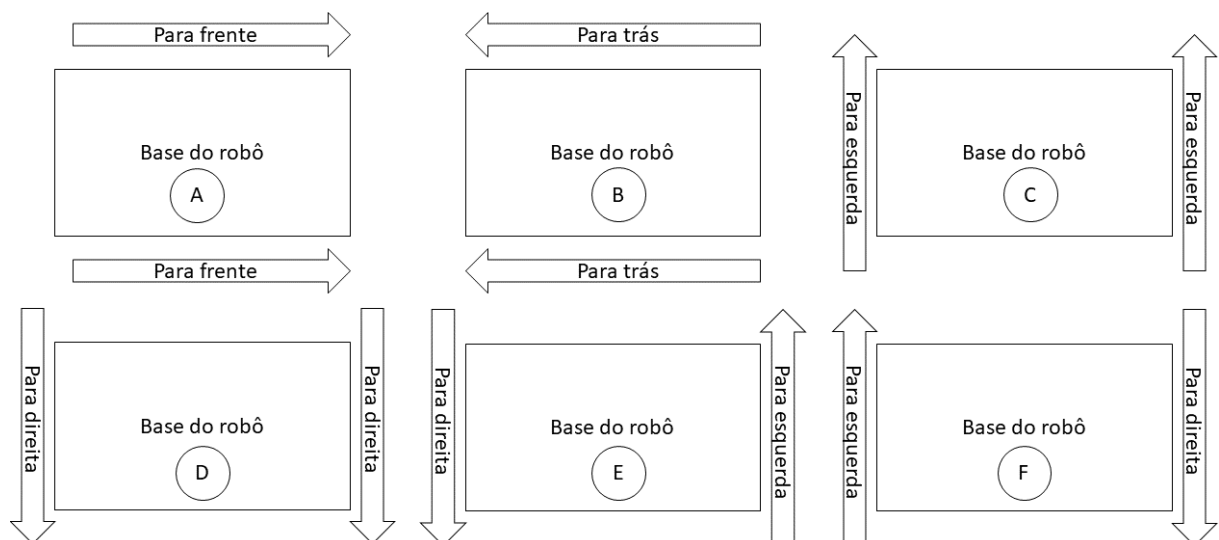


Figura 39 – Movimentação paralela ao solo.

Eletronicamente o circuito do *Shield* de controle dos servomotores (Figura 30) realiza a conexão em terminais enumerados de 0 a 15. Para que os acionamentos ocorram de modo direcionado é necessário realizar uma conversão de posição da articulação referente

a uma determinada pata em um número congruente ao terminal que o servomotor está conectado. Assim, a função apresentada no Algoritmo 2 recebe como parâmetro o número da pata (1, 2, 3 e 4) e da junta (A = 1, B = 2 e C = 3) que se quer acionar. O resultado da equação é devolvido pela função com o número da articulação. Esse número pode variar entre os números inteiros de 0 a 13, sendo 0 a 11 referente às articulações das patas e, 12 e 13 às do braço robótico.

A determinação do modo como cada passo é dado pelo robô se dá mediante o processamento da sobrecarga do procedimento passadaX (Algoritmo 3) que recebe como parâmetros o valor inteiro referente a pata que se quer mover, o valor booleano frente que determina se a movimentação será para frente ou para trás e a direção que se quer seguir.

Esse algoritmo basicamente define a posição que se deseja e posteriormente realiza a movimentação das juntas, 1 unidade por vez, com um tempo de *delay* de 0.1 ms. Para garantir que todos os servos se movimentem de modo sincronizado a movimentação ocorre dentro de um laço de repetição que abrange todas as portas físicas relacionadas aos servomotores, percorrendo, a cada comando de movimento valores de 0 a 13, até que a posição final de todas as juntas seja atingida.

O Algoritmo 4 recebe como parâmetro a junta que se quer mover.

Antes da realização de qualquer movimento, consolidada pelo envio de um sinal PWM para o terminal físico referente à junta é realizada uma verificação de se a posição atual do servomotor é maior que a posição definida, se isso for verdadeiro, a nova posição atual será decrementada em 1 unidade. Caso a posição atual seja menor que a posição definida a nova posição será acrescida de 1 unidade. É importante ressaltar que os valores extremos de PWM correspondentes a posição de cada servo são da ordem de 120 a 620, com estes valores podendo ter variações conforme a máxima e a mínima posição física possível de ser atingida por cada articulação do robô. Esta verificação é importante para que não ocorra danos na estrutura por conta da tentativa de se atingir um alvo estruturalmente impossível. Por esta razão é feita uma última verificação neste procedimento (Algoritmo 4) que verifica se a nova posição esperada está dentro dos valores permitidos para a articulação corrente, caso não esteja, o valor retornado será a extremidade mais próxima do valor desejado.

A função `setPWM` é responsável por enviar o sinal PWM para o terminal do circuito referente ao servomotor. Ele recebe o número do terminal (junta), quando o canal deve fazer a transição de baixo para alto, aqui definido como 0 e, quando o canal deve fazer a transição de alto para baixo, neste caso, seu valor corresponde à magnitude da variável `posicao_atual`.

As passadas ou pisadas do robô se dão de forma padronizada com pontos de estabilização e movimentação alternados na diagonal. A Figura 40 expressa essa paridade.

De modo alternado o movimento ocorre mantendo fixa as patas assinaladas com esferas preenchidas e movimentando as outras patas. Na imagem à esquerda primeiro as patas 2 e 3 mantem-se estendidas e estáticas para dar sustentação ao dispositivo enquanto as patas 1 e 4 se movem. Similar a isto é observado na figura à direita onde as patas 1 e 4 sustentam o dispositivo enquanto as patas 2 e 3 realizam o movimento. A sincronia dessas tarefas garante que o robô se desloque para frente, para trás e para as laterais.

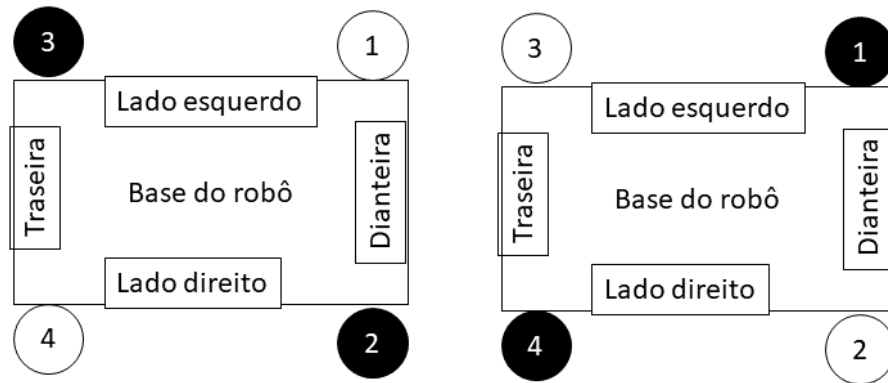


Figura 40 – Movimentação padronizada.

Quando é desejado que o robô se mova para frente ou para trás em direção curvilínea a pata que se move, mais a frente, na direção que se deseja, recebe apenas metade do valor definido para as demais. Desta forma é garantido um movimento no plano dorso-caudal mais acentuado no sentido lateral que se espera.

O Algoritmo 5 trata da realização de movimentos puramente laterais não cobrindo o deslocamento das juntas A de cada pata que, conforme o parágrafo anterior, trata da mobilidade dorso-caudal. Neste caso o procedimento recebe os valores booleanos para os parâmetros: puro, yaw e direita.

Quando a variável puro é assinalada com um valor afirmativo as juntas A de cada pata são movidas para a posição definida como central ($PWM = 370$), caso contrário os movimentos se darão conforme a última configuração dessa junta. Isso resulta na possibilidade de movimentos diversificados, conforme a necessidade do momento em tempo de execução.

Após o reposicionamento ou não das juntas A, procedesse o movimento sincronizado das outras articulações de cada uma das patas, de modo a permitir movimento de: giro à direita ou à esquerda (yaw = verdadeiro e direita = verdadeiro ou falso), puramente ou parcialmente lateral (yaw = falso e direita = verdadeiro ou falso).

Outros tipos de movimentos possíveis são aqueles ortogonais em relação à base de sustentação de cada uma das patas com alteração angular apenas da junta A de cada uma delas ou, em relação a base e solo, com movimentos de extensão e contração das patas (Figuras 41 a 43).

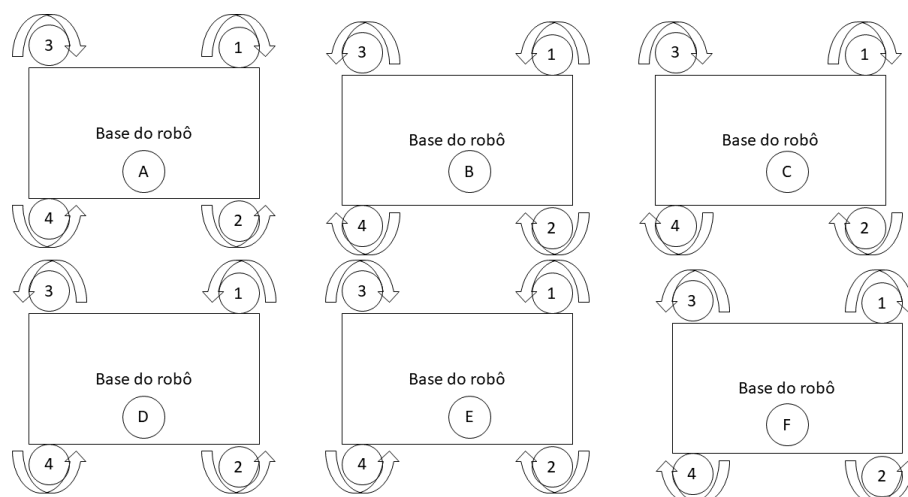


Figura 41 – Movimentações ortogonais ao solo em relação às bases de cada uma das patas, com mobilidade apenas das juntas A. A) As patas da lateral esquerda são movidas em sentido horário e as da lateral direita em sentido oposto; B) As patas da lateral esquerda são movidas em sentido anti-horário e as da lateral direita em sentido oposto; C) Todas as patas são movidas em sentido horário; D) Todas as patas são movidas em sentido anti-horário; E) As patas 1 e 4 são movidas em sentido anti-horário e as 2 e 3 em sentido horário; F) As patas 1 e 4 são movidas em sentido horário e as 2 e 3 em sentido anti-horário.

A posição final de cada uma das articulações que resultam nestes movimentos são recebidos pelo protocolo UART e executados continuamente, com uma unidade de deslocamento por vez até que se consiga a congruência de todas as articulações com a posição final pretendida.

Similar ao que ocorre com os movimentos de arfagem (*pitch*) apresentados na Figura 42 é possível realizar movimentos de rolagem (*roll*) por meio da compressão e extensão das patas lateralmente conforme é mostrado na Figura 43.

A estrutura básica do software para Arduino encontra-se no módulo `era3cidi_atuadores` com suas *procedures* `setup()` e `loop()`. Nele são realizadas também as predefinições de *structures* com a definição de tipos e a definição da taxa de transmissão pelo protocolo UART como sendo de 115200 e *timeout* de 6 ms. Foi mantida a configuração padrão `SERIAL_8N1` para 8 número de bits por transmissão, sem paridade e 1 *stop bit*.

O Algoritmo 6 primeiro verifica, pela função `convergencia()` se todas as posições finais para cada um dos servos foram atingidas. Quando isto for verdadeiro ele executa o método `passadas(passar)`, tendo como parâmetro o valor da variável `passar`. Estes valores correspondem a todos os movimentos padronizados definidos nos Algoritmos 1, 3 e 5. Seus valores podem ser:

5 Passo a frente;

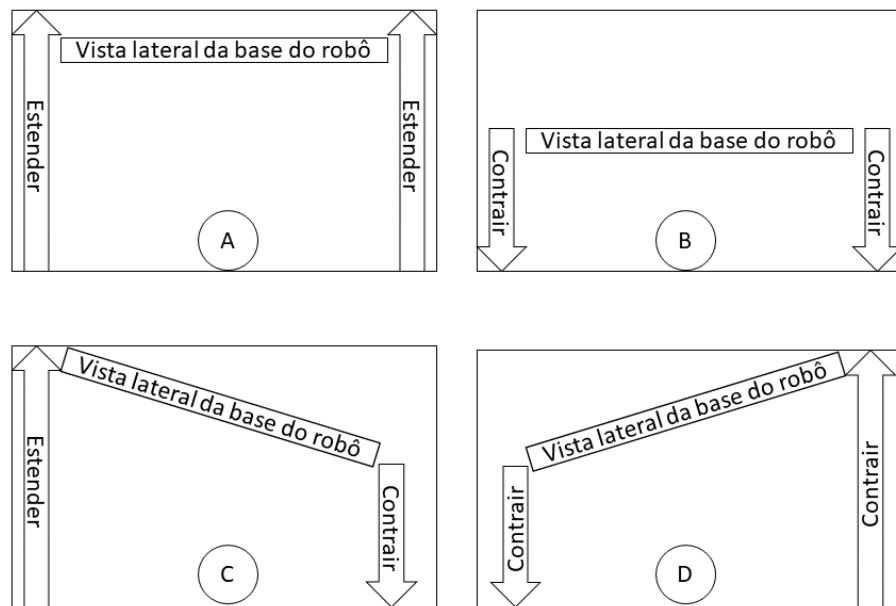


Figura 42 – Vista lateral dos movimentos ortogonais ao solo em relação à base. A) Extensão de todas as patas que resulta no distanciamento da base em relação ao solo; B) Contração de todas as patas que resulta na aproximação da base em relação ao solo; C) Movimento do tipo arfagem (*pitch*) com a frente do dispositivo ficando mais próxima ao solo enquanto a traseira fica mais distante; D) Também é um movimento do tipo arfagem (*pitch*), porém enquanto a parte traseira fica mais próxima ao solo a parte dianteira fica mais distante.

- 6 Passo a trás;
- 7 Passo a frente e à esquerda;
- 8 Passo a trás e à esquerda;
- 9 Passo a frente e à direita;
- 10 Passo a trás e à direita;
- 11 Passo similar a um deslocamento para a lateral esquerda, porém sem centralizar a junta A;
- 12 Passo similar a um deslocamento para a lateral direita, porém sem centralizar a junta A;
- 13 Passo similar a um giro no sentido anti-horário em torno do centro da base, porém sem centralizar a junta A;
- 14 Passo similar a um giro no sentido horário em torno do centro da base, porém sem centralizar a junta A;
- 15 Deslocamento lateral para a esquerda;
- 16 Deslocamento lateral para a direita;

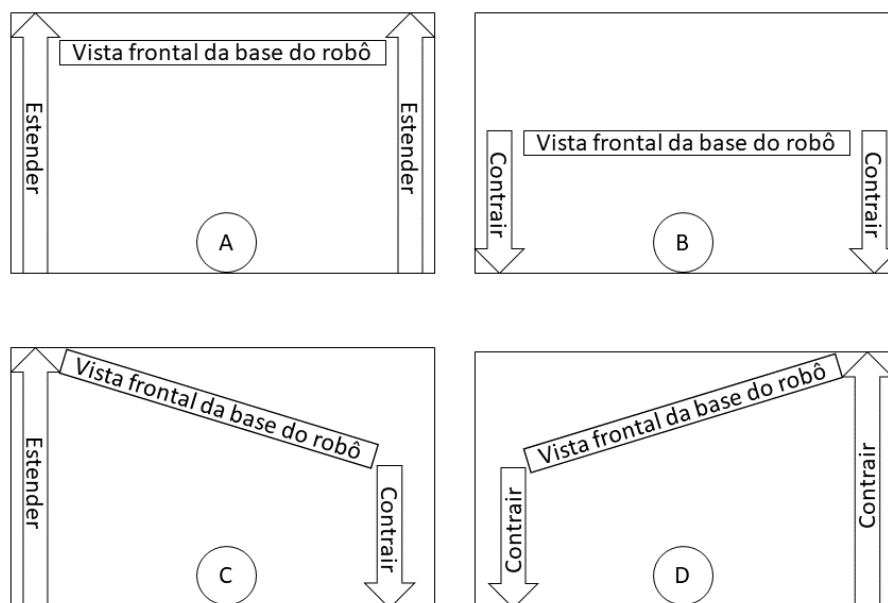


Figura 43 – Movimentações ortogonais ao solo direcionadas para frente em relação a base. A) Extensão de todas as patas que resulta no distanciamento da base em relação ao solo; B) Contração de todas as patas que resulta na aproximação da base em relação ao solo; C) Movimento do tipo rolagem (*roll*) com a lateral esquerda do dispositivo ficando mais próxima ao solo enquanto a direita fica mais distante; D) Também é um movimento do tipo rolagem (*roll*), porém enquanto a lateral direita fica mais próxima ao solo a lateral esquerda fica mais distante.

17 Giro em sentido anti-horário;

18 Giro em sentido horário.

A função `atualizaPosições()` faz a leitura dos dados de entrada recebidos pela porta serial. Estes dados podem ser de diferentes comprimentos e o carácter "n" é utilizado para definir o fim da cadeia. Cada comprimento compreende um tipo de ação a ser realizado pelo módulo atuador.

Caso a função `atualizaPosições()` retorne um valor positivo, o posicionamento de cada articulação é atualizado para os valores armazenados na Fila.

Após a efetiva movimentação dos servomotores é realizada a verificação de estado de cada uma das bombas, em relação ao volume de líquido aí presente.

3.10.1.1.1 Protocolo 45/3

Quando são recebidos 45 caracteres pela porta serial o algoritmo separa-os em blocos de 3 cadeias numéricas e as converte em números inteiros. O primeiro número corresponde ao comando enviado ao módulo e os outros 14 valores às posições em PWM para cada uma das articulações.

- 0** Se os valores de posição determinados na cadeia de caracteres for diferente da última recebida adiciona os valores a uma fila que é lida a cada iteração do procedimento *loop()*;
- 1** Força as articulações a se posicionarem imediatamente ao definido, ignorando qualquer outra determinação que esteja na fila aguardando para ser executada;
- 2** Atualiza em tempo de execução os valores mínimos possíveis fisicamente para cada uma das articulações;
- 3** Atualiza em tempo de execução os valores centrais para cada uma das articulações;
- 4** Atualiza em tempo de execução os valores máximos possíveis fisicamente para cada uma das articulações.

3.10.1.1.2 Protocolo 2

Ao receber apenas 2 caracteres o módulo atuador realizará os procedimentos padronizados como os de mobilidade e os de controle das bombas de dispersão. Além dos movimentos relacionados a mobilidade já apresentados nos parágrafos anteriores as ações em cada uma das bombas.

- 19** Aciona a bomba A para o processo de dispersão do conteúdo do recipiente;
- 20** Aciona a bomba A para o processo de sucção afim de preencher o recipiente com o insumo desejado;
- 21** Desliga a bomba A;
- 22** Aciona a bomba B para o processo de dispersão do conteúdo do recipiente;
- 23** Aciona a bomba B para o processo de sucção afim de preencher o recipiente com o insumo desejado;
- 24** Desliga a bomba B;

Cada uma das bombas é equipada com um sensor do tipo boia que emite um sinal informando que o nível máximo seguro de líquido do recipiente foi atingido. Ao atingir esse nível máximo a bomba que está realizando o processo de sucção é imediatamente desligada.

3.10.1.2 Subsistema de sensoriamento e controle responsivo

Este subsistema é confeccionado de modo a ser capaz de obter dados sensoriais, como: tensão fornecida pela fonte de potência, latitude, longitude, velocidade, orientação e as forças gravitacionais que interagem com o dispositivo.

Por ser implementado sobre a plataforma de hardware Arduino Mega 2560 sua capacidade de memória permite a implementação de um *software* mais robusto se comparado ao do Arduino Uno R3. Dentre outras características é importante enfatizar a capacidade de trabalhar com 4 portas Seriais. Isso permitiu a configuração da porta Serial 0 para troca de dados com o Subsistema pseudo-consciente, com taxa de transmissão de 9600 e tempo de espera de 3 milissegundos; a porta Serial 1 para troca de dados com o módulo GPS NEO-6M com taxa de transmissão de 9600 e tempo de espera de 1 milissegundo; e a porta Serial 2 para comunicação com o subsistema atuador a uma taxa de transmissão de 115200 e tempo de espera de 1 milissegundo. Para ambas as portas foram mantidos o número de 8 bits por transmissão, sem paridade e 1 *stop bit SERIAL_8N1* que é o padrão para as versões do Arduino utilizadas.

A robustez deste subsistema realiza o controle de envio de comandos para o módulo atuador mediante a avaliação de tempo. Este fator é importante para assegurar que os comandos enviados na iteração anterior tenham sido executados completamente. Esse tempo é definido a partir a partir da Equação 3.87. Sua formulação foi obtida a partir de informações obtidas a partir de valores nominais de velocidade dos servomotores, tempo de espera da porta Serial do subsistema atuador, tempo médio de leitura dos sensores e por fim, a avaliação do resultado prático obtido diante da utilização das variáveis utilizadas.

$$\begin{aligned}TEFM &= 0.1 \\VMASM &= 620 - 120 \\VMASM &= 500 \\QS &= 14 \\TMLS &= 1 \\TO &= 6 \\TIME_{LIMIT} &= \frac{TEFM \cdot VMASM \cdot QS}{1000} + TO - TMLS \\TIME_{LIMIT} &\approx 5.7\end{aligned}\tag{3.87}$$

Onde, $TEFM$ é o tempo de espera na função mover do subsistema atuador (Algoritmo 4), $VMASM$ é o valor máximo de amplitude de movimento do servomotor em PWM, QS é a quantidade de servomotores existentes no dispositivo robótico, TO é o tempo de espera para leitura de dados da porta serial do subsistema atuador, $TMLS$ é o tempo máximo gasto para realizar a leitura dos sensores integrados ao subsistema de sensoriamento e controle.

Os valores resultantes da multiplicação ($TEFM \cdot VMASM \cdot QS$) foram divididos por 1000 de forma a normalizar os valores a um valor máximo dentro de uma amplitude de 1000 microssegundos. O valor 1000 também foi obtido por meio da avaliação dos resultados práticos obtidos.

O Algoritmo 7 mostra como o processo iterativo ocorre. Inicialmente é obtido o tempo em milissegundos em que a iteração corrente tem início. Em seguida são lidos os valores dos sensores de forma escalonada. Deste modo a cada iteração a variável sensor varia de 0 a 3, onde:

- 0** obtém dados de pressão barométrica e pressão estimada conforme a altitude em relação ao nível do mar;
- 1** obtém dados de altitude estimada, conforme a pressão barométrica e a altitude real com base no sensor de altitude;
- 2** obtém a orientação em relação ao polo Norte magnético geográfico;
- 3** obtém a latitude e longitude, quantidade de satélites, data e hora da leitura e a precisão da leitura do sensor GPS.

Este escalonamento foi necessário para evitar que a leitura dos sensores tivessem uma duração muito elevada. Com a estratégia utilizada, a cada iteração o tempo utilizado para a obtenção dos dados dos sensores foi normalizada em $\approx 70ms$. Neste procedimento também é realizada a leitura do estado dos tanques com dados obtidos do subsistema atuador por meio da leitura da porta Serial relacionada ele. Este processo tem um tempo de espera de 1 milissegundo e assim como ocorre com a aquisição dos dados de inclinação em relação aos eixos cartesianos x, y e z que são obtidos quase que instantaneamente com tempo inferior a 1.0 milissegundo, tem a atualização de seus valores na variável estruturada grandeza atualizada em todas as iterações.

Após a leitura dos sensores são lidos, caso existam, os dados enviados pelo subsistema pseudo-consciente. Esses dados podem ser discriminados em protocolos com diferentes magnitudes, como:

- 2** Se o valor for maior que 0 o robô dará um passo à frente, caso contrário será dado um passo para trás;
- 3** Quando o valor recebido é 130 a fonte de potência dos servomotores é desligada. De outra forma, se o valor é 131 ela é ligada;
- 6** Neste protocolo são informados o número da junta que deverá ser deslocada nos dois primeiros caracteres e o ângulo final esperado com valores que variam de -135° e $+135^\circ$.

- 18** O protocolo recebe 9 pares de valores no padrão *SVSVSVSXSYSZSLSPSC*. A letra S corresponde aos sinais aritméticos + e - e, V ao valor em si. X, Y e Z fazem referência aos eixos cartesianos de mesmo nome. L, P e C são respectivamente, Lateral, Pescoço e Cabeça. Ao receber dados em conformidade com este protocolo a cadeia de caracteres é armazenada em uma fila a ser lida nas próximas iterações e produzem como resultado a movimentação do dispositivo robótico em torno dos eixos X *pitch* (Algoritmo 12), Y *roll* (Algoritmo 13), Z *yaw* (Algoritmo); na direção dos eixos X (mobilidade para frente ou para trás) (Algoritmo), Y (altera o posicionamento da junta A de cada pata) (Algoritmo 21) e Z (realiza o movimento de contração ou extensão das patas) (Algoritmo 14); L movimenta o robô lateralmente (Algoritmo 17). Este movimento lateral pode ser puro com a centralização das juntas A ou impuros, em que a lateralidade depende da posição em que as juntas A se encontram; P movimenta o braço robótico para cima ou para baixo (Algoritmo 18) e por fim C que movimenta a extremidade do braço robótico (Algoritmo 19), onde estão a câmera e o sensor ultrassônico para a direita ou para a esquerda.
- 45** Este protocolo recebe nos 3 primeiros caracteres a ação desejada e os caracteres restantes correspondem a cada uma das juntas com valores PWM que podem variar de 120 a 620; esses valores podem se zeros, indicando que não se deseja nenhum deslocamento angular. Essas ações podem ser:
- 1** Define a posição final que cada uma das juntas deve estar conforme os valores corrente na cadeia de caracteres;
 - 2** Atualiza o valor mínimo possível para cada junta;
 - 3** Redefine o valor referente ao centro de cada junta;
 - 4** Atualiza o valor máximo possível para cada junta;
- 19, 20, 21, 22, 23 e 24** repassa a cadeia de caracteres recebida diretamente para o subsistema atuador resultando no acionamento ou desligamento da bomba dos reservatórios.

O procedimento `atualizaComBaseNaFila()` verifica se existe alguma informação armazenada na Fila e o executa caso o `acumuladorTempo` seja maior ou igual ao do estabelecido na constante `TIME_LIMIT`. Sua execução estabelece as posições que cada uma das juntas deverão estar ou basicamente envia para o atuador os comandos relativos à mobilidade padrão descritos pelos Algoritmos 1 e 5.

O Algoritmo 8 mostra a interface dos procedimentos que podem ocorrer quando a função `setMotion()` é chamada. Ela pode receber vários, um ou nenhum valor de entrada, sendo valores zero considerado para esta última possibilidade.

Primeiramente, ao receber o valor 10 para o parâmetro *pitch* ele centraliza imediatamente todas as juntas (Algoritmo 9), fazendo com que o robô fique com as Juntas A de cada pata centralizadas e as patas estendidas.

Caso os valores recebidos sejam outros, eles são divididos por um fator de 10 para os parâmetros *pitch*, *roll*, *yaw*, *y* e *z* e, são multiplicados por 10 para pescoço e cabeça. Esses fatores tem a função de dar suavidade aos movimentos realizados pelas juntas e foram obtidos por meio de tentativas e observação dos resultados na prática.

Os Algoritmos de 12 a 14 fazem uso dos procedimentos *estender()* e *contrair()* (Algoritmos 15 e 16) para a realização dos respectivos movimentos em torno dos eixos cartesianos X, Y para os dois primeiros e elevação ou rebaixamento da base do robô.

Para a definição da posição de cada junta é utilizado o procedimento *setJoints()* que recebe como parâmetros a junta, o valor desejado e a informação de se será um deslocamento a partir do centro da junta ou será com posicionamento absoluto (Algoritmo 10).

A função *extremeVerify()* é utilizada para a certificação de que a posição desejada para a junta esteja dentro do intervalo possível pré-definido (Algoritmo 11).

3.10.1.3 Subsistema pseudo-consciente

Este subsistema emula a capacidade de seres vivos interpretar informações sensoriais. No caso do ERA3CIDI essas informações são, visuais, ultrassom, inclinação, geo-localização, estado dos tanques e energia disponível. Além desta capacidade ele também recebe comandos provenientes do sistema supervisor e de controle remoto.

O software desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python 3 tem sua estrutura implementada sobre a versão do ERACI já percorrido em (Cardoso et al., 2020) que agora recebeu a capacidade de medir distâncias e decidir se a bomba de dispersão de insumos será acionada ou não durante o deslocamento do dispositivo.

Conforme já apresentado na Figura 37 o conjunto de seus módulos de software se integram com os subsistemas vizinhos. Esta integração diz respeito a sua capacidade de receber informações e comandos, tomar decisão sobre eles e enviar informações e comandos formatados e que melhor se adequam para a obtenção do resultado pretendido.

Basicamente, o módulo *init* inicializa o sistema com o carregamento dos outros módulos. De todos, os únicos que sofreram alterações consideráveis em relação à sua versão anterior, foram *RoboController* que agora está integrado com os módulos *Arduino*, *Ecolocalizacao* e *UPS2*; e *RoboMonitor* integrado com os módulos *Arduino*, *Ecolocalizacao* e *Olho*. Nesta versão são integrados ao sistema os módulos *Arduino*, *UPS2* e *Ecolocalizacao*.

Primeiramente, o módulo *Arduino* permite a integração com o subsistema de senso-

riamento e controle responsivo com comunicação pela porta Serial e protocolo UART. Ele recebe as informações deste subsistema sob um protocolo estruturado em cadeias de 170 caracteres, em que a cada 10 existe um dado diferente na seguinte sequência: data, hora, latitude, longitude, satélites, velocidade, temperatura, pressão obtida pelo sensor e estimada em relação à altitude, altitude obtida pelo sensor, orientação, inclinações em torno do eixo X, Y e Z cartesiano, tensão, estado dos tanques A e B. As informações recebidas em cada pacote é lida e atribuída às variáveis correspondentes para auxiliar na tomada de decisão e envio aos subsistemas adjacentes. Após receber estes dados e distribuí-los às variáveis ele concatena com as informações obtidas pelo próprio subsistema pseudo-consciente, como: se o subsistema de monitoramento, regulação e suplementação energética está tendo energia fornecida por um *Power Bank*, bem como qual a capacidade da bateria no momento corrente e qual a tensão fornecida por este subsistema; uso da CPU, qualidade da energia fornecida, distância mensurada pelo sensor de ultrassom, se o olho ou o robô estão operando no modo automático, coordenadas de trajeto definidas para o posicionamento do dispositivo pelo usuário por meio do Subsistema supervisor e de controle remoto foram excluídas da memória. Todas estas informações são enviadas continuamente ao subsistema supervisor e de controle remoto. Este módulo também configura e envia os comandos a serem enviados para o subsistema de sensoriamento e controle responsivo dentro de um dos protocolos entendidos por ele.

O módulo UPS2 monitora a capacidade do subsistema de monitoramento, regulação e suplementação energética em fornecer a energia necessário para o Subsistema pseudo-consciente. As informações foram mostradas no paragrafo anterior.

Por fim, o módulo *Ecolocalizacao* realiza a leitura e estimação da distância entre o sensor de ultrassom e um objeto a frente dele com acurácia de $\approx 99.0\%$. Este valor para a acurácia mencionada foi obtida por meio de 100 testes supervisionados e valores comparados com um objeto inserido na distância de 50 cm. Distância essa medida por meio de uma régua escolar simples de um metro. Está medida é considera no projeto para a tomada de decisões que dizem respeito a locomoção do dispositivo robótico no que tange à aplicação de insumos e desvio de crateras e obstáculos.

Quando o usuário aciona o modo automático para o robô ele verifica as coordenadas existentes na memória para percorrer uma determinada trajetória. Essas definições são definidas pelo próprio usuário por meio do Subsistema supervisor e de controle remoto. Assim, o subsistema pseudo-consciente verifica sua posição atual e compara com a posição desejada de latitude e longitude. De modo iterativo ele busca uma nova localização que apresente uma diminuição da diferença entre emitida pelo receptor de gps do robô e a inserida desejada. Entre uma iteração e outra é verificada se existe algum obstáculo ou uma cratera à frente na direção que se deseja.

O usuário também pode definir que as ações do dispositivo sobre uma determinada

planta seja automática. Caso isso seja definido o dispositivo, a cada iteração verifica se o que está a frente é uma planta cultivada ou não e, aciona a bomba de dispersão do insumo apropriado.

3.10.1.4 Subsistema supervisor e de controle remoto

Este subsistema é desenvolvido para funcionar sobre a plataforma Android. A IDE utilizada é a Android Studio e a linguagem é Java.

Assim como o Subsistema pseudo-consciente ele também manteve sua estrutura de software em conformidade com a sua versão anterior já discorrido em (Cardoso et al., 2020).

A modificação mais consistente se deu na interface do sistema supervisor que agora apresenta mais informações e permite a inserção de coordenadas a serem enviadas para o robô, definição de modos de trabalho como automático ou controlado tanto para o robô e para a câmera, bem como a movimentação remota do robô e sua câmera. Outra mudança é o monitoramento em tempo real de seu posicionamento, orientação, inclinações, utilização da CPU e capacidade energética (Figura 36). Foi dada à este módulo a capacidade de reconhecer um controle *Joystick* e permitir que todas as ações disponibilizadas na interface sejam executadas por meio dele.

3.10.2 Teste do protótipo em diferentes texturas

Os primeiros testes tem o objetivo de avaliar as capacidades motoras de cada uma das patas relativas ao Protótipo 1 com seus servos conectados ao Subsistema atuador, bem como avaliar a capacidade do software em entregar um resultado que permita o controle destes servos de maneira congruente ao que se espera no que tange ao tempo de resposta, velocidade, congruência de posicionamento em relação ao que foi estipulado e força. Após estes testes foram realizadas a avaliação da capacidade motora da configuração, primeiramente com a estrutura robótica suspensa por uma haste metálica e depois, sustentando a si mesma sobre piso liso de cerâmica (Figura 44).

O protótipo 2, ainda sob a configuração A, foi submetido a testes similares de modo a fornecer informações sobre a capacidade do software, tempo de resposta, velocidade, congruência e força, pata a pata, estrutura suspensa e também sustentando o próprio peso sobre piso liso cerâmico (Figura 45).

Após a realização dos testes estruturais e de software diretamente envolvidos na mobilidade do dispositivo foram realizados testes de integração de todos os subsistemas com ações sobre eles determinadas em tempo de execução pelo subsistema supervisor e de controle com *Joystick* conectado por *Bluetooth*. O objetivo deste teste foi de forma qualitativa verificar se a comunicação entre os vários módulos e subsistemas esta ocorrendo

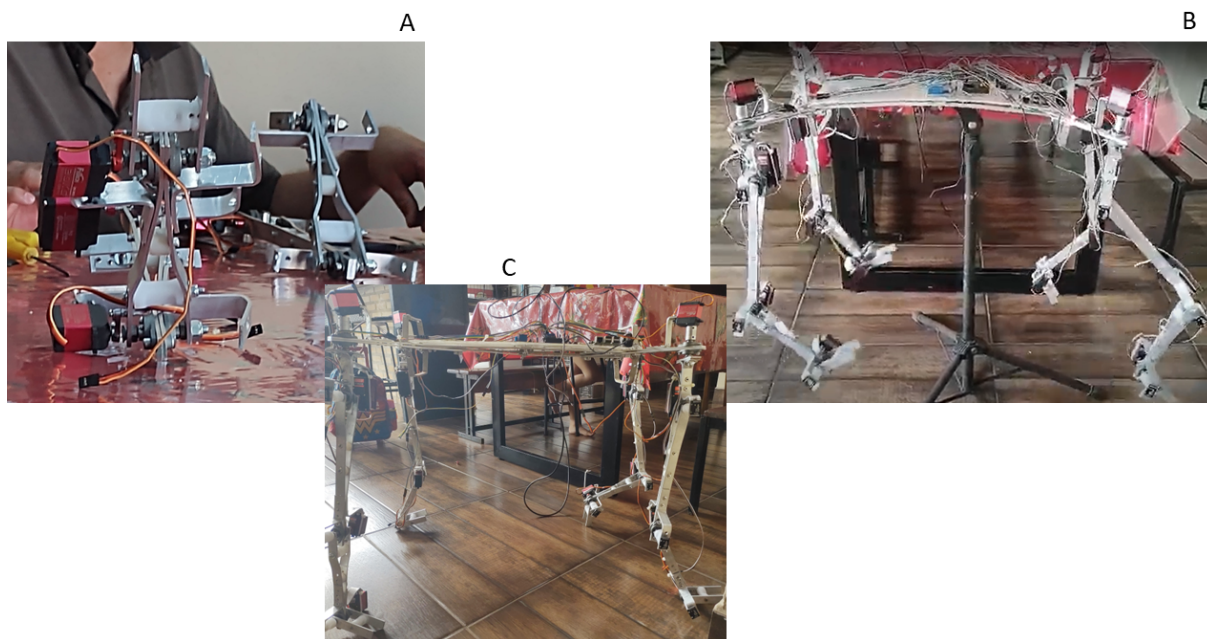


Figura 44 – Teste de capacidade motora e de resposta do *Software* relativos ao Protótipo 1. A) Teste das patas; B) Teste da estrutura suspensa por haste metálica; C) Teste da estrutura sustentando o próprio peso.

de forma satisfatória, tanto no sentido de enviar as informação sensoriais ao subsistema supervisor e de controle, quanto, em se fazer os comandos proveniente deste último para os diversos módulos e subsistemas integralizados (Figura 46).

A utilização do referido teste realizado por duas crianças em idade escolar teve o propósito de permitir a avaliação da Interface Humano Máquina (IHM) no que tange principalmente facilidade de uso.

Até aqui os testes foram apenas qualitativos e os resultados avaliados de modo a mostrar se os requisitos básicos, como congruência de posição em relação ao estipulado em software (Tabela 8), capacidade de movimento sincronizado e concorrente (Tabela 9) e, capacidade de movimento sincronizado e concorrente com sustentação do próprio peso. Esses requisitos são denotados como V para verificado quando o objetivo é atingido ou F para falha em seu cumprimento, acompanhados de uma observação sobre o porque da consideração da falha e uma possível sugestão de como resolve-la. Esses valores são apresentados com o preenchimento das Tabelas , 9 e 10.

Para a Tabela 8 foi considerada como verificado com sucesso a convergência de cada junta com o definido em comandos enviados por terminal de comunicação Serial (disponível na Arduino IDE), bem como a segurança de não ultrapassagem das extremidades definidas como máximo e mínimo para cada articulação. Deste modo a tabela avaliativa teve em cada coluna a referência ao ângulo mínimo (AMINS) e máximo (AMAXS) nominal de cada servo, ângulo mínimo (AMINP) e máximo (AMAXP) definido como permitido para cada Junta, ângulo central de cada junta (ACENJ). Estes valores foram normalizados para que

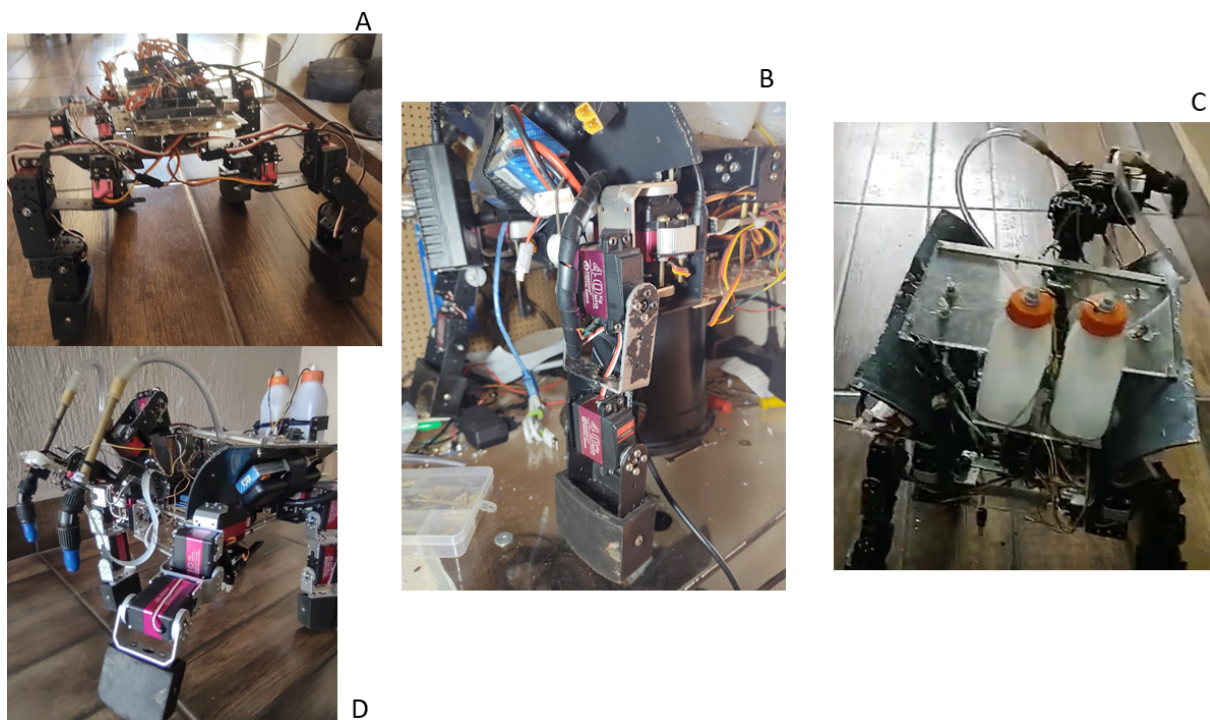


Figura 45 – Teste de capacidade motora e de resposta do *Software* relativos ao Protótipo 2. A) Teste referente a configuração A; B) Teste pata a pata da estrutura sob a configuração B suspensa por haste metálica; C) Teste referente a configuração B sustentando o próprio peso; D) Teste referente a configuração C sustentando o próprio peso.

o ângulo central de cada servo seja 0° e a partir dele decresça para o lado esquerdo e cresça para o lado direito. Cada linha corresponde ao servo que está sendo testado, com este número variando de 1 a N, onde, N corresponde a 16 para o Protótipo 1 e 14 para o Protótipo 2.

Tabela 8 – Tabela para avaliação de mobilidade e segurança de cada junta.

junta	AMINS	AMAXS	AMINP	AMAXP	ACENJ
1	V F	V F	V F	V F	V F
:	V F	V F	V F	V F	V F
N	V F	V F	V F	V F	V F

Para verificar a viabilidade dos protótipos para o cumprimento dos objetivos nos ambientes a que se destina, após a integração dos *hardwares* e *softwares*, foram realizados diversos testes em quantidade, textura e locais diferentes dentro Campus Agrícola do campus Barretos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo localizado na Estrada Vicinal Nadir Kenan, nas coordenadas -20.5010006,-48.5671069 para Latitude e Longitude, respectivamente (Figura 47).

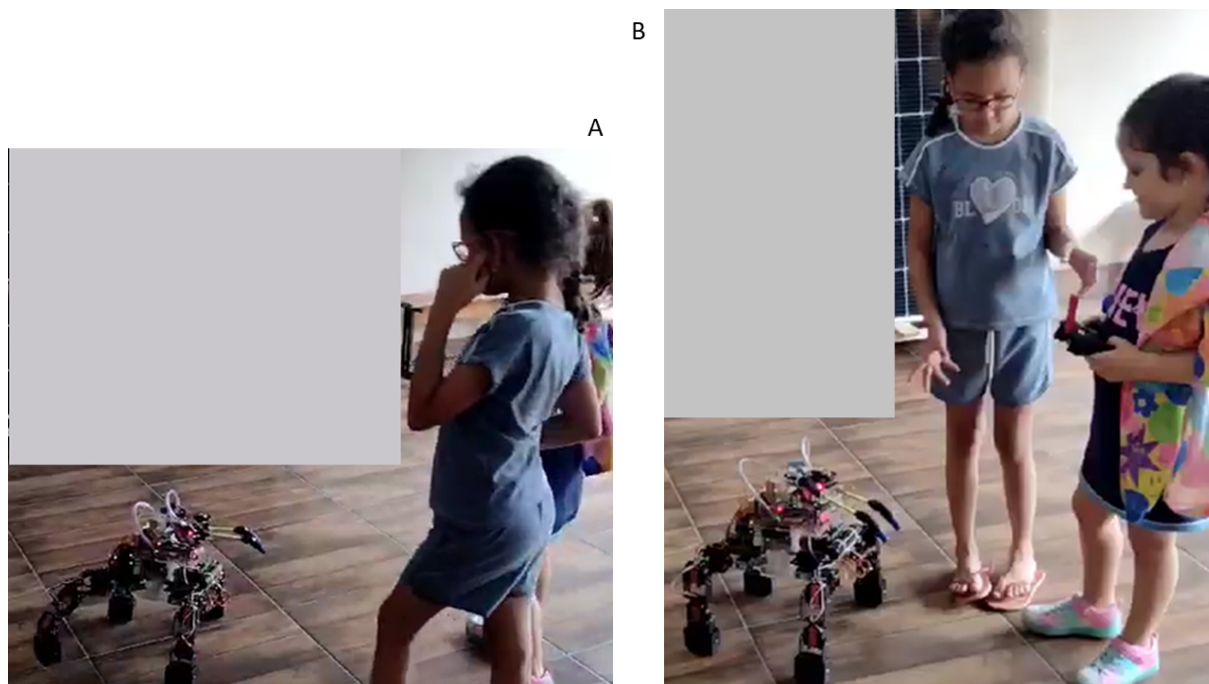


Figura 46 – Teste de capacidade motora e de resposta do *Software* relativos ao Protótipo 2. A) Teste referente a configuração A; B) Teste pata a pata da estrutura sob a configuração B suspensa por haste metálica; C) Teste referente a configuração B sustentando o próprio peso; D) Teste referente a configuração C sustentando o próprio peso.

Tabela 9 – Tabela modelo para avaliação da capacidade motriz sincronizada dos Protótipos sob a estrutura suspensa.

Protótipo	Capacidade motriz sincronizada?
1	V F
2	V F

Tabela 10 – Tabela para avaliação da capacidade de auto-sustentação.

Protótipo	Capaz de auto-sustentar?
1	V F
2	V F

Esses testes de mobilidade ocorreram sobre piso de cimento com textura porosa e áspera e, solo compactado. Para isso foram definidas uma distância de 2.0 metros a ser percorrida nestes locais (Figura 48). Esta distância, relevos e texturas foram escolhidas para assegurar que o dispositivo não sofresse danos entre o início e a finalização dos testes devido ao estresse em que ele está submetido e fosse possível coletar as informações quantitativas de tempo necessárias para aferição da capacidade de se realizar a tarefa



Figura 47 – Local onde os testes do protótipo foi realizado. A) Área lisa; B) Relevos planos com pequenos acidentes e textura baseada em solo batido e levemente poroso.

básica de mobilidade. Esses valores são inseridos nas intersecções da tabela utilizada para a anotação dos resultados dos testes de mobilidade (Tabela 11). Os tipos de movimentos utilizados neste teste foram para frente e para trás pois estes são movimentos básicos, com capacidade de modificar a direção apenas pela diferenciação da variação angular da junta A para o lado em que se deseja mover em relação às juntas A (primeira junta de cada pata) das outras patas (Figura 39).

Avaliou-se para cada um dos protótipos o custo para a implementação. Esses valores são incluídos ao final de cada avaliação, descrita no item observação.

Para este trabalho de pesquisa não foram realizados os testes de locomoção automática e de acionamento automático das bombas de dispersão.



Figura 48 – Amostra de marcação realizada para a realização dos testes sobre textura áspera em cimento.

Tabela 11 – Tabela modelo para avaliação de mobilidade e segurança do dispositivo em diferentes texturas e relevos.

Textura:				
Relevo:				
Tipo de movimento:				
Modelo	Grandeza	1	...	5
B	Tempo (s)			
	Tensão (V)			
C	Tempo (s)			
	Tensão (V)			

4 Resultados e Discussão

Os resultados relativos a avaliação da mobilidade das juntas e patas, primeiro com elas separadas da base e depois com todas integradas entre si, afixadas à base do robô resultaram na congruência das posições em relação ao objetivo expresso em software conforme os valores de verificação apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Tabela com os valores qualitativos relativos a verificação da mobilidade e congruência de cada junta do Protótipo 1.

junta	AMINS	AMAXS	AMINP	AMAXP	ACENJ
1	V	V	V	V	V
2	V	V	V	V	V
3	V	V	V	V	V
4	V	V	V	V	V
5	V	V	V	V	V
6	V	V	V	V	V
7	V	V	V	V	V
8	V	V	V	V	V
9	V	V	V	V	V
10	V	V	V	V	V
11	V	V	V	V	V
12	V	V	V	V	V
13	V	V	V	V	V
14	V	V	V	V	V
15	V	V	V	V	V
16	V	V	V	V	V

Esse resultado denotou que a configuração utilizada integrada com o software para controle dos servos é capaz de realizar as tarefas básicas de congruência e resposta de forma eficaz. O termo eficaz aqui denota tão somente o caráter qualitativo da avaliação até o momento.

Após a realização deste teste foram realizados os mesmos testes para o Protótipo 2 que também apresentou resultado congruente com o esperado. O que denota que ele é capaz de realizar movimentos em conformidade com o estipulado em software, conforme apresenta a Tabela

Com os resultados positivos apresentados nestes primeiros testes procedeu-se para aqueles relativos a capacidade de se realizar os movimentos de forma próxima ao que o senso comum interpreta como paralelo ou concorrente, de modo a dar a impressão perceptiva de que ambas as juntas envolvidas estão se movendo ao mesmo tempo. Desta

Tabela 13 – Tabela com os valores relativos a verificação da mobilidade e segurança de cada junta do Protótipo 2.

junta	AMINS	AMAXS	AMINP	AMAXP	ACENJ
1	V	V	V	V	V
2	V	V	V	V	V
3	V	V	V	V	V
4	V	V	V	V	V
5	V	V	V	V	V
6	V	V	V	V	V
7	V	V	V	V	V
8	V	V	V	V	V
9	V	V	V	V	V
10	V	V	V	V	V
11	V	V	V	V	V
12	V	V	V	V	V
13	V	V	V	V	V
14	V	V	V	V	V

vez os testes foram realizados em conjunto com os os resultados qualitativos propiciados pelos dois Protótipos inseridos na Tabela 14.

Tabela 14 – Tabela para avaliação da capacidade motriz sincronizada dos Protótipos sob a estrutura suspensa.

Protótipo	Capaz de auto-sustentar?
1	V
2	V

Conforme os resultados apresentados tanto o Protótipo 1 quanto o 2 apresentam valores qualitativos satisfatórios, atendendo os objetivos de mobilidade sincronizada e concorrente.

Essas duas tabelas demonstram que quando ambos os robôs estão suspensos no ar eles conseguem executar todos os movimentos solicitados pelo usuário dentro de uma precisão e segurança aceitável definida nominalmente para cada um dos servos.

Depois disso foram realizados os testes para verificar se ambos os Protótipos são capazes de realizar os movimentos especificados em software de modo congruente, sincronizado e concorrente quando suas patas estão sustentando o próprio peso da estrutura física. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 15.

Percebe-se que o Protótipo 1 apresenta falha neste teste. Essa falha é resultante da incapacidade das juntas em realizar a sustentação da estrutura sob o seu peso e estando

Tabela 15 – Tabela para avaliação da capacidade de auto-sustentação.

Protótipo	Capaz de auto-sustentar?
1	F
2	V

apresentando deslocamento extra nas conexões entre o servo e a estrutura metálica. Essas falhas podem ser corrigidas pela utilização de servomotores com capacidade de torque mais adequada. Conforme o gráfico de torque mostrado na Figura 22 esse valor seria da ordem de 160 kgf.cm (modelo D1601H) para cada uma das juntas, o que elevaria o custo do projeto para 18.592,68 Reais (\$ 3.578,89 dólares americanos sob cotação do dia 30/04/2024). Esse fato levou a escolha de uma estrutura mais enxuta, que exija menos juntas e servomotores com os torques na ordem de aproximadamente a metade do necessário para o Protótipo 1. A solução pensada para este problema foi dar sequência nos testes com o Protótipo 2 que emula a estrutura de um lagarto, com sua característica mais rasteira e com seu dorso-cranial e dorso-caudal auxiliando no equilíbrio durante sua locomoção. Para este Protótipo foi considerado apenas o apoio para esse equilíbrio o braço robótico que se movimenta na direção da pata frontal que está estendida. O custo desta primeira implementação variou conforme sua configuração denotada como A, B e C entre os valores de foi de 664,55 reais (\$ 127,91), 824,65 reais (\$ 158,73) e 2.160,95 reais (\$ 415,94), respectivamente, com os valores entre parêntesis em dólares americanos sob a cotação no dia 30/04/2024 pelo *Google Finance*.

Embora a configuração A do Protótipo 2 tenha sido satisfatória os testes nos ambientes com características rurais foram realizadas apenas com as configurações B e C que, devido a capacidade motriz dos servos utilizados apresentam maiores capacidades de torque e sua estrutura metálica apresenta maior resistência e consequente segurança.

Tabela 16 – Tabela para avaliação de mobilidade em textura áspera e relevo plano com inclinação lateral leve para o Protótipo 2 com movimento para frente

Textura:	áspera					
Relevo:	plano com leve inclinação lateral de $\approx 5^\circ$					
Tipo de movimento:	mover para frente					
Modelo	Grandeza	1	2	3	4	5
B	Tempo (s)	58.0	63.0	70.0	71.0	76.0
	Tensão (V)	8.32	8.31	8.30	8.29	8.27
C	Tempo (s)	34.0	39.0	30.0	52.0	58.0
	Tensão (V)	8.4	8.3	8.1	7.9	7.8

Quando se analisa os resultados apresentados para o Protótipo 2 é observado uma locomoção concernente ao que é estipulado no objetivo deste trabalho de pesquisa e

Tabela 17 – Tabela para avaliação de mobilidade em textura áspera e relevo plano com inclinação lateral leve para o Protótipo 2 com movimento para trás.

Textura:	áspera					
Relevo:	plano com leve inclinação lateral de $\approx 5^\circ$					
Tipo de movimento:	mover para trás					
Modelo	Grandeza	1	2	3	4	5
B	Tempo (s)	56.0	59.0	61.0	66.0	68.0
	Tensão (V)	8.30	8.29	8.23	8.2	8.15
C	Tempo (s)	32.0	48.0	41.0	52.0	56.0
	Tensão (V)	8.4	8.3	7.9	7.7	7.6

Tabela 18 – Tabela para avaliação de mobilidade em textura de solo batido e relevo plano com pequenas ondulações do Protótipo 2 com movimento para frente.

Textura:	solo batido					
Relevo:	plano com leves ondulações da ordem de 3.0 a 10.0 cm de altura					
Tipo de movimento:	mover para frente					
Modelo	Grandeza	1	2	3	4	5
B	Tempo (s)	62.0	78.0	93.0	101.0	105.0
	Tensão (V)	8.3	8.29	8.28	8.27	8.27
C	Tempo (s)	46.0	75.0	84.0	93.3	94.0
	Tensão (V)	8.33	8.32	8.31	8.3	8.2

Tabela 19 – Tabela para avaliação de mobilidade em textura de solo batido e relevo plano com pequenas ondulações do Protótipo 2 com movimento para trás.

Textura:	solo batido					
Relevo:	plano com leves ondulações da ordem de 3.0 a 10.0 cm de altura					
Tipo de movimento:	mover para trás					
Modelo	Grandeza	1	2	3	4	5
B	Tempo (s)	66.0	86.0	100.0	104.0	115.0
	Tensão (V)	8.35	8.30	8.27	8.26	8.25
C	Tempo (s)	50.0	85.0	93.0	103.3	110.0
	Tensão (V)	8.33	8.29	8.28	8.27	8.25

desenvolvimento. Embora a velocidade de movimento possa parecer constante, ela oscila conforme a tensão e ao estresse elétrico ao qual o servomotor é submetido. O estresse está relacionado às diferentes nuances de ondulação do solo e a temperatura ambiente ao qual está submetido. No momento em que os testes estavam sendo realizados a temperatura oscilou entre 35° e 37° graus. A exposição direta ao sol e os momentos em que estava sob a sombra, contribuíram para fazer com que a velocidade e torque também oscilassem dentro do especificado nominalmente. Essas oscilações ocorreram devido a velocidade e

torque proporcionado por cada motor de corrente contínua ser inversamente proporcional à potência fornecida pela fonte de energia.

Dessa forma, pode-se afirmar que, o protótipo 2 apresenta melhor viabilidade de construção frente ao seu antecessor. Isto está relacionada com o custo e com a capacidade móvel do dispositivo.

5 Conclusão

Conforme os resultados apresentados é possível observar que o protótipo 2 teve um melhor custo benefício de implementação em relação ao protótipo 1. Este fato não inviabiliza o primeiro protótipo que possui uma estrutura e configuração capaz de suprir as necessidades de mobilidade e suporte de carga, quando é equipado com motores mais adequados e um sistema de controle de equilíbrio mais robusto. A necessidade de que o protótipo 1 possua um sistema de controle de equilíbrio mais robusto que o primeiro, é devido a disposição e comprimento de suas patas que fazem com que a base do robô fique mais distante do solo. Esses fatores influem de forma direta na escolha do protótipo 2 em detrimento ao protótipo 1 que exige um custo de implementação significativamente superior.

O projeto em si entrega uma estrutura robótica completa e contribui diretamente com o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a área agrícola. A partir dela é possível investir no desenvolvimento de um sistema de controle capaz de variar os ângulos das juntas e, assim, incrementar a adaptabilidade do sistema em diferentes superfícies de solo resultando na melhoria de sua eficiência. Por esta razão é importante o estudo e implementação de novas tecnologias voltadas para melhorar a produtividade no campo. Para isso, existem várias tecnologias que podem ser integradas para permitir que diferentes dispositivos, tanto da área da computação, elétrica e mecânica possam ser integrados para formar estruturas, tanto lógicas, quando se avalia apenas os softwares envolvidos, e mecatrônicas onde existe a premissa de se criar tecnologias que atuam diretamente sobre o ecossistema que se quer interferir. Neste sentido, é importante que se tenha um cuidado extra para que o custo benefício supere os riscos inerentes à sua aplicação *in loco*.

Os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento relacionados com o tema abordado aqui devem ser incentivados e exauridos para permitir sempre a otimização propiciada pela atualização de métodos e dispositivos que permitem uma melhor confiabilidade atrelada ao um custo financeiro, tecnológico e social intrínsecos a temática da automação do processo produtivo aplicada diretamente no campo.

A integração entre os diversos segmentos com a evolução da robótica tem demonstrado grande eficiência e propiciado a evolução de estudos afins. Especialmente na atividade agrícola há um grande número de adaptações da robótica em diversos maquinários e equipamentos.

Assim, este trabalho de pesquisa buscou apresentar alternativa baseada na avaliação da evolução das estruturas vertebrais de animais para a confecção de dispositivo com propósito de que possa ser utilizado em diferentes tipos de ambientes agrícola ou similar.

Para reduzir os custos de produção do protótipo algumas estratégias foram tomadas,

sem que com isso sua intensão de versatilidade, durabilidade e leveza fossem prejudicadas. Isto resultou na confecção de um protótipo do esqueleto do dispositivo em alumínio.

A utilização de softwares para fins algébricos e geométricos, como Geogebra e Matlab, propiciaram a realização de diversos testes que viabilizaram a construção da estrutura.

Por fim, entende-se que é justificado o desenvolvimento de um sistema de controle que implemente os modelos matemáticos descritos até aqui e permita o teste da estrutura física no ambiente a que se destina.

Referências

- BARASUOL, V. *Um sistema de controle reativo para locomoção de robôs quadrúpedes*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 54.
- BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um latossolo vermelho distroférrico. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 6, n. 2, p. 331–336, mar. 2022. Disponível em: <<http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v6i2a882>>. Citado 3 vezes nas páginas 3, 4 e 14.
- CAMPOS, A.; GUENTHER, R.; MARTINS, D. Differential kinematics of serial manipulators using virtual chains. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online], Rio de Janeiro, RJ, v. 27, n. 4, p. 345–356, 2005. Citado na página 25.
- Cardoso, J. R. F. et al. Development of a robotic structure for acquisition and classification of images (eraci) in sugarcane crops. *Revista Ciencia Agronomica*, Revista Ciencia Agronomica, v. 51, 2020. ISSN 1806-6690. Citado 4 vezes nas páginas 13, 51, 65 e 67.
- CORKE, P. I.; JACHIMCZYK, W.; PILLAT, R. *Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB*. [S.l.]: Springer, 2011. v. 73. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- CRAIG, J. J. *Robótica*: Tradução heloísa coimbra de souza; revisão técnica reinaldo augusto da costa bianchi. São Paulo, BRA: Pearson, 2012. Título original: Introduction to robotics: mechanics and control. ISBN 978-85-8143-128-4. Citado 5 vezes nas páginas 8, 25, 26, 28 e 30.
- DAMé, M. C. F. Sanidade dos bubalinos no extremo sul do brasil. Citado na página 17.
- FEINER, N. et al. Plasticity and evolutionary convergence in the locomotor skeleton of greater antillean anolis lizards. *Elife*, eLife Sciences Publications Limited, v. 9, p. e57468, 2020. Citado na página 2.
- FREECAD. 0.19.24291 (Git). FreeCad Team, 2022. Disponível em: <<https://www.freecadweb.org/>>. Citado na página 33.
- GETTY, R. *Sisson/Grossman: anatomia dos animais domésticos*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado 5 vezes nas páginas 3, 4, 6, 7 e 8.
- INSTITUTE, I. G. *GeoGebra - Dynamic Mathematics for EveryoneGeo. Gebra Classic 5.0.730.0-d*. Linz, Austria: International GeoGebra Institute, 2023. Disponível em: <<http://www.geogebra.org/>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 33 e 36.
- KÖNIG, H. E.; LIEBICH, H.-G. *Anatomia dos animais domésticos-: Texto e atlas colorido*. [S.l.]: Artmed Editora, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 4, 5 e 6.
- LI, Y.; WANG, L. Kinematic model and redundant space analysis of 4-dof redundant robot. *Mathematics*, MDPI, v. 10, n. 4, p. 574, 2022. Citado na página 11.

LI, Y.; WANG, L. Kinematic model and redundant space analysis of 4-dof redundant robot. *Mathematics*, v. 10, n. 4, 2022. ISSN 2227-7390. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-7390/10/4/574>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.

MATLAB. 9.13.0.2320565 (R2022b) Update 6. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2022. Citado 4 vezes nas páginas 26, 28, 30 e 40.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 375–470, 2007. Citado na página 3.

MIHELJ, M. et al. *Robotics*. [S.l.]: Springer, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 10.

NIKU, S. B. *Introdução à robótica: análise, controle, aplicações*: Tradução e revisão técnica sérgio gilberto taboada. Rio de Janeiro, BRA: LTC, 2013. Tradução de: Introduction to robotics: analysis, control, applications. ISBN 978-85-216-2237-6. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 30.

RAIJ, B. V. *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. 2. ed. International Plant Nutrition Institute: [s.n.], 2017. Citado na página 3.

RESENDE, M. *Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações*. 2. ed. Lavras: [s.n.], 2011. Citado na página 3.

ROSS, C. N. *Manual de Estrutura e Dinâmica do Cão*. [S.l.], 2013. Disponível em: <https://cbkc.org/application/views/imagens/noticias/pdf-noticias_9.pdf>. Citado na página 17.

SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. *Modelling and control of robot manipulators*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2001. Citado na página 25.

SICILIANO, B. et al. *Robotics: Modeling, Planning and Control*. London, British: Springer, 2009. ISBN 978-1-84628-641-4. Citado na página 20.

TING, H. Z. et al. Kinematic analysis for trajectory planning of open-source 4-dof robot arm. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.

VISLOBOKOVA, I. A. et al. An unexpected record of an extinct water buffalo *bubalus murrensis* (berckhemer, 1927) in the last glacial in europe and its implication for dispersal pattern of this species. *Quaternary International*, v. 574, p. 127–136, 2021. ISSN 1040-6182. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040618220308417>>. Citado na página 2.

APÊNDICE A – Algoritmos

Algoritmo 1: passadaX(frente, direcao)

Input: frente
for $pata = 1; pata < 3; pata++$ **do**
 | passadaX(pata, frente, direcao)
end
for $pata = 4; pata > 2; pata--$ **do**
 | passadaX(pata, frente, direcao)
end

Algoritmo 2: getJunta(pata, junta)

Input: pata, junta
return $pata \cdot 3 - (3 - junta)$

Algoritmo 3: passadaX(pata, frente, direcao)

Input: pata, frente, direcao
 setJunta($junta = 1..14$, posicao_determinada)
while $posicao_atual \neq posicao_determinada$ **do**
 | mover($junta = 1..14$)
end

Algoritmo 4: mover(junta)

Input: junta
if $posicao_atual > posicao_definida$ **then**
 | $posicao_atual = posicao_atual - 1$
end
else if $posicao_atual < posicao_definida$ **then**
 | $posicao_atual = posicao_atual + 1$
end
 $posicao_atual = verifica_extremos(junta, posicao_atual)$
 setPWM(junta, 0, $posicao_atual$)
 espera(0.1)

Algoritmo 5: passadaY(puro, yaw, direita)

```
Input: puro, yaw, direita
if puro then
  setJunta(junta = 1, 4, 7, 10)
  while posicao_atual  $\neq$  posicao_determinada do
    | mover(junta = 1, 4, 7, 10)
  end
end
if yaw  $\wedge$  direita then
  | setJunta(junta = 1...14)
end
else if yaw  $\wedge$   $\neg$ direita then
  | setJunta(junta = 1...14)
end
else if  $\neg$ yaw  $\wedge$  direita then
  | setJunta(junta = 1...14)
end
else if  $\neg$ yaw  $\wedge$   $\neg$ direita then
  | setJunta(junta = 1...14)
end
while posicao_atual  $\neq$  posicao_determinada do
  | mover(junta = 1...14)
end
```

Algoritmo 6: loop()

```
if convergencia() then
  | passadas(passar)
  | if atualizaPosicoes() then atualizarPosicoesConformeAFila() ;
end
moveJuntas()
verificaBombas()
```

Algoritmo 7: loop()

```
inicio_tempo = milissegundos()
grandezas = leDadosDosSensores(sensor > 3? sensor = 0 : sensor ++ )
recebeComandos()
atualizacaoComBaseNaFila();
tempo_decorrido = (milissegundos() - inicio_tempo);
if (acumuladorTempo < TIME_LIMIT) then
  | acumuladorTempo += tempo_decorrido
end
if (acumuladorTempo >= TIME_LIMIT) then
  | if (contadorTempo < 1000) then
    | contadorTempo += acumuladorTempo
  | end
  | moveJuntas()
  | acumuladorTempo = 0
end
```

Algoritmo 8: bool setMotion(pitch, roll, yaw, x, y, z, lateral, pescoco, cabeca)

Input: pitch, roll, yaw, x, y, z, lateral, pescoco, cabeca**Output:** Verdadeiro|Falso**if** $pitch == 10$ **then**

centralizar()

Result: Verdadeiro**end****else** $pitch = \frac{pitch}{10}$ $roll = \frac{roll}{10}$ $yaw = \frac{yaw}{10}$ $y = \frac{y}{10}$ $z = \frac{z}{10}$ $pescoco = pescoco \cdot 10$ $cabeca = cabeca \cdot 10$ **if** $pitch \neq 0$ **then**

motionPitch(pitch)

Result: Verdadeiro **end** **else if** $roll \neq 0$ **then**

motionRoll(roll)

Result: Verdadeiro **end** **else if** $yaw \neq 0$ **then**

motionYaw(yaw)

Result: Verdadeiro **end** **else if** $x \neq 0$ **then**

motionX(x)

end **else if** $y \neq 0$ **then**

motionY(y)

Result: Verdadeiro **end** **else if** $z \neq 0$ **then**

motionZ(z)

Result: Verdadeiro **end** **else if** $lateral \neq 0$ **then**

motionLateral(lateral)

end **else if** $pescoco \neq 0$ **then**

motionPescoco(pescoco)

end **else if** $cabeca \neq 0$ **then**

motionCabeca(cabeca)

end**end****Result:** Falso

Algoritmo 9: centralizar()

```
for Inteiro  $i = 1; i < (TOTAL\_JUNTAS+1); i++$  do
|   setJoints( $i, jValue[i-1][CENTRO]$ , false)
end
```

Algoritmo 10: setJoints(junta, valor, relativo)

```
if relativo then
|   valor = jValue[junta][MEIO] + valor;
end
jValue[junta][POSICAO_DESEJADA] = extremeVerify(junta, valor)
```

Algoritmo 11: extremeVerify(junta, valor)

```
Input: junta, valor
resultado = valor
if resultado < jValue[junta][MINIMO] then
|   resultado = jValue[junta][MINIMO]
end
if resultado > jValue[junta][MAXIMO] then
|   resultado = jValue[junta][MAXIMO]
end
Result: resultado
```

Algoritmo 12: motionPitch(pitch)

```
Input: pitch
if sentido > 0 then
|   estender(1..2, abs(sentido), Falso)
|   contrair(3..4, abs(sentido), Falso)
end
else
|   contrair(1..2, abs(sentido), Falso)
|   estender(3..4, abs(sentido), Falso)
end
```

Algoritmo 13: motionRoll(roll)

```
Input: roll
if sentido > 0 then
|   estender(1..3, abs(sentido), Falso)
|   contrair(2..4, abs(sentido), Falso)
end
else
|   contrair(1..3, abs(sentido), Falso)
|   estender(2..4, abs(sentido), Falso)
end
```

Algoritmo 14: motionZ(valor)

Input: valor
if *sentido* > 0 **then**
| estender(1..4, abs(valor), Falso)
end
else
| contrair(1..4, abs(valor), Falso)
end

Algoritmo 15: estender(junta, valor)

Input: junta, valor
juntaB = getJunta(pata, 2)
juntaC = getJunta(pata, 3)
valorB = *abs(jValue[juntaB][POSICAO_DESEJADA])* · *valor*
valorC = *abs(jValue[juntaC][POSICAO_DESEJADA])* · *valor*
resultado = 0
if *valorB* != 0 || *valorC* != 0 **then**
| **if** *jValue[juntaB][POSICAO_DESEJADA]* > *jValue[juntaB][MEIO]* **then**
| | *valorB* = *jValue[juntaB][POSICAO_DESEJADA]* - *valorB*
| | **if** *valorB* < *jValue[juntaB][MEIO]* **then**
| | | *valorB* = *jValue[juntaB][MEIO]*
| | **end**
| | setJoints(juntaB, *valorB*, false)
| **end**
| **else if** *jValue[juntaB][POSICAO_DESEJADA]* < *jValue[juntaB][MEIO]* **then**
| | *valorB* = *jValue[juntaB][POSICAO_DESEJADA]* + *valorB*
| | **if** *valorB* > *jValue[juntaB][MEIO]* **then**
| | | *valorB* = *jValue[juntaB][MEIO]*
| | **end**
| | setJoints(juntaB, *valorB*, false)
| **end**
| **if** *jValue[juntaC][POSICAO_DESEJADA]* > *jValue[juntaC][MEIO]* **then**
| | *valorC* = *jValue[juntaC][POSICAO_DESEJADA]* - *valorC*
| | **if** *valorC* < *jValue[juntaC][MEIO]* **then**
| | | *valorC* = *jValue[juntaC][MEIO]*
| | **end**
| | setJoints(juntaC, *valorC*, false)
| **end**
| **else if** *jValue[juntaC][POSICAO_DESEJADA]* < *jValue[juntaC][MEIO]* **then**
| | *valorC* = *jValue[juntaC][POSICAO_DESEJADA]* + *valorC*
| | **if** *valorC* > *jValue[juntaC][MEIO]* **then**
| | | *valorC* = *jValue[juntaC][MEIO]*
| | **end**
| | setJoints(juntaC, *valorC*, false)
| **end**
end
end

Algoritmo 16: contrair(pata, valor)

Input: pata, valor

juntaB = getJunta(pata, 2)

juntaC = getJunta(pata, 3)

valorB = $abs(jValue[juntaB][POSICAO_DESEJADA] - jValue[juntaB][MINIMO]) \cdot valor$

valorC = $abs(jValue[juntaC][POSICAO_DESEJADA] - jValue[juntaC][MINIMO]) \cdot valor$

if valorB $\neq 0$ **//** valorC $\neq 0$ **then**

 valorB = jValue[juntaB][POSICAO_DESEJADA] - valorB

if valorB < -30 **then**

 | valorB = -30

end

 setJoints(juntaB, valorB, false);

 valorC = jValue[juntaC][POSICAO_DESEJADA] + valorC

if valorC > 30 **then**

 | valorC = 30

end

 setJoints(juntaC, valorC, false)

end

Algoritmo 17: motionLateral(valor)

```
Input: valor
value =
switch valor do
  case -1 do
    | value = getMotion(11)
  end
  case 1 do
    | value = getMotion(12)
  end
  case -2 do
    | value = getMotion(13)
  end
  case 2 do
    | value = getMotion(14)
  end
  case -3 do
    | value = getMotion(15)
  end
  case 3 do
    | value = getMotion(16)
  end
  case -4 do
    | value = getMotion(17)
  end
  case 4 do
    | value = getMotion(18)
  end
end
moveJoints(value)
```

Algoritmo 18: motionPescoco(valor)

```
if jValue[PESCOCO][POSICAO_DESEJADA] > jValue[PESCOCO][MEIO] then
  valor = jValue[PESCOCO][POSICAO_DESEJADA] - valor
  if valor < jValue[PESCOCO][MEIO] then
    | valor = jValue[PESCOCO][MEIO]
  end
  setJoints(PESCOCO, valor, false)
end
else if jValue[PESCOCO][POSICAO_DESEJADA] < jValue[PESCOCO][MEIO] then
  valor = jValue[PESCOCO][POSICAO_DESEJADA] + valor
  if valor > jValue[PESCOCO][MEIO] then
    | valor = jValue[PESCOCO][MEIO]
  end
  setJoints(PESCOCO, valor, false)
end
```

Algoritmo 19: motionCabeca(valor)

```
Input: valor
if jValue[CABECA][POSICAO_DESEJADA] > jValue[CABECA][MEIO] then
    valor = jValue[CABECA][POSICAO_DESEJADA] - valor
    if valor < jValue[CABECA][MEIO] then
        | valor = jValue[CABECA][MEIO]
    end
    setJoints(CABECA, valor, false)
end
else
    | If jValue[CABECA][1] < jValue[CABECA-1][MEIO]
end
valor = jValue[CABECA][POSICAO_DESEJADA] + valor
if valor > jValue[CABECA][MEIO] then
    | valor = jValue[CABECA][MEIO]
end
setJoints(CABECA, valor, false)
```

Algoritmo 20: motionX(valor)

```
Input: valor
value =
switch valor do
    case -1 do
        | value = getMotion(6)
    end
    case 1 do
        | value = getMotion(5)
    end
    case -2 do
        | value = getMotion(8)
    end
    case 2 do
        | value = getMotion(7)
    end
end
moveJoints(value)
```

Algoritmo 21: motionY(valor)

```
for pata = 1; pata < 5; pata++ do
    juntaA = getJunta(3)
    valorA = 0
    if valor > 0 then
        valorA = abs(jValue[juntaA][MAXIMO] -
            jValue[juntaA][POSICAO_DESEJADA]) * valor
    end
    else if valor < 0 then
        valorA = abs(jValue[juntaA][MINIMO] - jValue[juntaA][POSICAO_DESEJADA])
            * valor
    end
    setJoints(juntaA, jValue[juntaA][POSICAO_DESEJADA] + valorA, true)
end
```
