

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ANTÔNIO PEDRO DE FREITAS BARBOSA CATULÉ

**DESAFIOS E SOLUÇÕES DE CONTROLE E
ESTABILIZAÇÃO DE ROBÔS BÍPEDES**

**SÃO CARLOS -SP
2021**

ANTÔNIO PEDRO DE FREITAS BARBOSA CATULÉ

DESAFIOS E SOLUÇÕES DE CONTROLE E ESTABILIZAÇÃO DE ROBÔS BÍPEDES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: João Vitor de Carvalho Fontes



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 35/2021/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANTÔNIO PEDRO DE FREITAS BARBOSA CATULÉ

DESAFIOS E SOLUÇÕES DE CONTROLE E ESTABILIZAÇÃO DE ROBÔS BÍPEDES

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 06 de dezembro de 2021

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	João Vitor de Carvalho Fontes
Membro da Banca 1	Luis Antonio Oliveira Araujo
Membro da Banca 2	Sidney Bruce Shiki



Documento assinado eletronicamente por **João Vitor de Carvalho Fontes, Docente**, em 06/12/2021, às 15:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 06/12/2021, às 15:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Antonio Oliveira Araujo, Docente**, em 06/12/2021, às 15:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0550608** e o código CRC **62F087BD**.

RESUMO

O emprego de robôs no cotidiano do ser humano tem sido cada vez mais frequente, seja na realização de um serviço doméstico ou na execução de tarefas que envolvem riscos. Com isso, existe a necessidade constante da busca por novas possibilidades e tecnologias que proporcionem a realização de tais atividades. Dentre os inúmeros campos de pesquisa, os robôs bípedes são um dos mais estudados, sendo o problema da estabilidade um dos mais comuns. O trabalho visa realizar uma revisão bibliográfica a respeito dos aspectos construtivos e de controle de robôs bípedes, além da análise das vantagens e desvantagens de elementos que caracterizam o desenvolvimento e a operacionalização dos movimentos, a fim de propor melhorias no robô que está sendo desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. Assim, conclui-se que apesar de ser um campo de estudo amplo e em constante evolução, traz-se como proposições a adição de mais graus de liberdade, sensores de força e remoção da cauda para implementação do robô bípede, possibilitando assim, métodos construtivos e de locomoção mais eficientes que os utilizados atualmente.

Palavras-chave: Robô Bípede. Estabilização. Revisão bibliográfica. Robô com contra peso.

ABSTRACT

The use of robots in the human being's daily life has been more and more frequent, whether in the performance of household chores or in the execution of tasks that involve risks. Thus, there is a constant need to search for new possibilities and technologies that provide the realization of such activities. Among the countless fields of research, biped robots are one of the most studied, with the problem of stability being one of the most common. The work aims to carry out a literature review regarding the constructive and control aspects of bipedal robots, in addition to the analysis of the advantages and disadvantages of elements that characterize the development and operationalization of movements, in order to propose improvements in the robot being developed by Department of Mechanical Engineering at UFSCar. Thus, it is concluded that despite being a wide field of study and in constant evolution, it brings as propositions the addition of more degrees of freedom, force sensors and tail removal for the implementation of the biped robot, thus enabling constructive methods and more efficient mobility than those currently used.

Keywords: Biped Robot. Stabilization. Literature review. Robot with counterweight.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Estudos encontrados conforme ano, autor, título e características dos robôs, São Carlos - SP 2021	17
Quadro 2 - Distribuição dos estudos encontrados por categorias, São Carlos - SP, 2021	22
Quadro 3 - Síntese dos trabalhos analisados nesta monografia	39
Figura 1 - Evolução do robô ASIMO da Honda no decorrer dos anos	10
Figura 2 - Robô bípede da UFRJ (a), USP (b) e UNICAMP (c)	11
Figura 3 - Ilustração do modelo 3D do robô bípede que será estudado	23
Figura 4 - (a) Esquema cinemático desenvolvido por Venâncio (2016), com as respectivas identificações sem a estrutura da cabeça; (b) Protótipo do robô	29
Figura 5 - À esquerda (a) tem-se a primeira versão da estrutura bípede e à direita (b), a segunda versão	31
Figura 6 - À esquerda (a) tem-se o modelo desenvolvido para o robô bípede e à direita (b), o projeto mecânico	34

LISTA DE SIGLAS

CG - Centro de Gravidade

CM - Centro de massa

FT - Função de transferência

GDL - Graus de liberdade

HZD - Hybrid Zero Dynamics

ICGS - Centro de Gravidade Interno Shifter

IMU - Inertial Measurement Unit

LIPM - Linear Inverted Pendulum Method

PID - Proporcional Integral Derivativo

PWM - Pulse Width Modulation

RBA - Robôs bípedes antropomórficos

TTL - Lógica Transistor-Transistor

ZMP - Zero-Moment Point

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivos gerais	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	METODOLOGIA	12
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1	Análise Qualitativa das Condições de Contorno para a Programação do Robô de Bragaia (2020)	19
4.2	Análise do Grupo 1 - Estudo da Arte de Trabalhos com Soluções Divergentes das Desejadas.	21
4.3	Análise do Grupo 2 - Estado da Arte de Trabalhos envolvendo Construção, Design e Programação de Robôs Bípedes	23
4.4	Proposições para o robô de Bragaia (2020)	36
5	CONCLUSÃO	38
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

A robótica tem se tornado ao longo dos anos um ramo de grande desenvolvimento e estudo para aplicações de robôs no dia a dia do ser humano para desempenharem diversos tipos de atividades como: transporte, entretenimento, realização de atividades perigosas para o ser humano, locomoção em lugares de difícil acesso, entre outros. Para que muitas dessas atividades sejam realizadas, é necessário que os robôs se desloquem sozinhos de um lugar para outro. Tal deslocamento pode ser feito através de rodas, pernas ou algum outro tipo de mecanismo (BEZZERA, 2002).

Dentre os diversos modos utilizados para possibilitar a locomoção dos robôs, os que utilizam pernas chamam a atenção por se assemelharem a animais ou ao ser humano. Os robôs que possuem duas pernas e se assemelham ao homem, são chamados de robôs bípedes. Esses robôs também são chamados de humanoides e são capazes de se deslocar por ambientes acidentados além de se adaptarem a diversos tipos de terreno, nos quais outros robôs móveis não seriam capazes de se locomover (GARCIA et al., 2007).

As pesquisas nesse ramo estão passando por uma enorme evolução tanto construtiva quanto de controle. Mesmo com todo o desenvolvimento científico desenvolvido nos últimos anos, ainda é um campo particularmente desafiador e complexo. Para que seja possível o caminhar do robô, é necessário controlar seu deslocamento e sua geometria fazendo com que seja possível terminar um passo em condições de iniciar o passo seguinte (GONÇALVES, 2004).

Como o caminhar humano e de alguns animais envolvem uma complexidade em sua representação, ainda é um campo com muitos desafios que envolvem desde impacto da perna com o solo até a estabilização (HURMUZLU et al., 2004). Esses problemas são frequentes mesmo com toda pesquisa já realizada até o presente momento com diversos métodos de controle e modelagem, que possibilitam atingir resultados satisfatórios em análises computacionais em tempo real e segurança (FOREST, 2006).

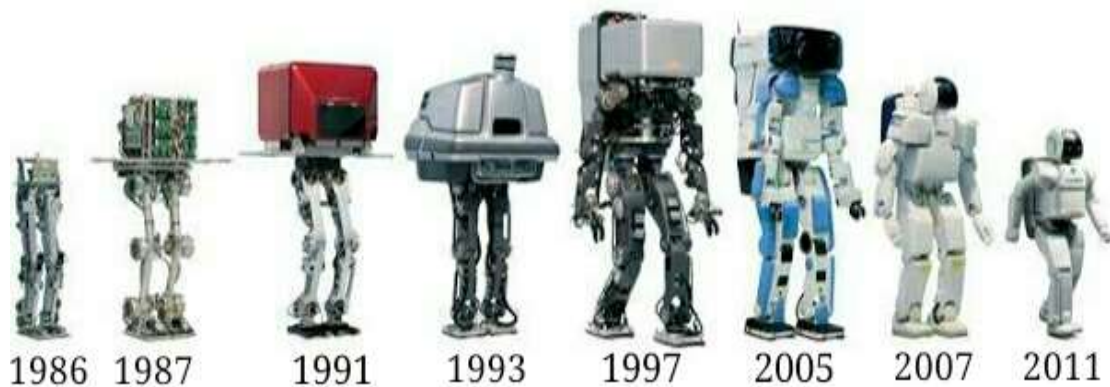
Na robótica não existe um padrão ou única maneira de se modelar, seja em relação ao projeto, quantidade de graus de liberdade e de controlar os robôs. Todavia, alguns conceitos como maior eficiência, segurança, computação em tempo real e gerenciamento de energia são tidos como requisitos necessários (FABISCH et al., 2019).

Desse modo, existem os mais variados grupos de pesquisa que buscam atender esses requisitos, além de desenvolver robôs capazes de imitar o caminhar humano (DE WAARD; INJA; VISSER, 2013). Um desses grupos de pesquisa é o grupo Honda, que desenvolve um

dos robôs bípedes mais famosos do mundo. Esse projeto iniciou-se em 1986 com o nome de ASIMO, e permanece até os dias atuais com constantes modificações e implementações. A evolução do robô é apresentada na Figura 1.

No decorrer do tempo a Honda adotou como pré-requisitos, para o desenvolvimento do robô, a capacidade de subir e descer escada, caminhar em terrenos acidentados e desviar de obstáculos (HIRAI et al., 1998).

Figura 1: Evolução do robô ASIMO da Honda no decorrer dos anos.

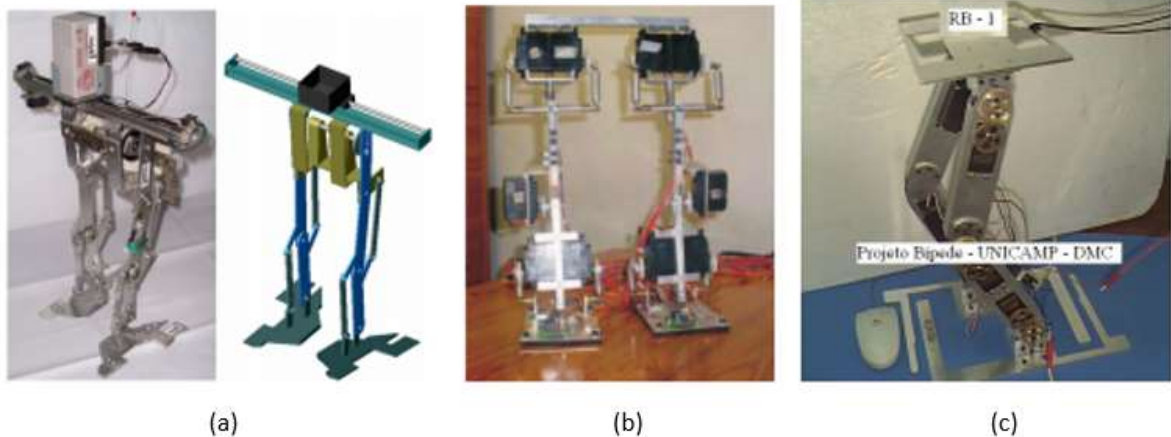


Fonte: HONDA INC., 2020.

As principais mudanças realizadas desde o modelo de 1986 até o de 2011 foram: alteração da caminhada estática para a caminhada dinâmica, ganhar a habilidade de subir e descer escadas, uso de sensores que possibilitam mapear o ambiente, ganhou braços que serviam para ajudar no equilíbrio durante o caminhar e para manipular objetos, além de passar a possuir detector de colisão e ainda conseguir se locomover por terrenos acidentados. Muitas melhorias ainda estão em andamento, como reconhecimento de fala, gestual e facial, gerenciamento do consumo de energia e mapeamento de visão (SAKAGAMI et al., 2002).

O ASIMO é um entre tantos robôs bípedes espalhados pelo mundo como Wabian, HRP, KHR, entre outros, que também são referências nesse cenário e que pertencem a diversos grupos de pesquisa. No Brasil, existem alguns grupos de pesquisa também, entre eles estão os robôs bípedes da UFRJ, USP e UNICAMP, sendo mostrados na Figura 2 a seguir.

Figura 2: Robô Bípedes da UFRJ (a), USP (b) e UNICAMP (c)



Fonte: TORRES, 2006 (a); SANTANA, 2005 (b); BEZERRA, 2002 (c).

O robô ATLAS, por sua vez, foi desenvolvido pela empresa Boston Dynamics, e apresenta habilidades dinâmicas que o permite andar por terrenos acidentados, manter o equilíbrio mesmo em condições adversas do ambiente, e manipular objetos (DYNAMICS, 2018). O robô HRP-4 é um instrumento para pesquisa e desenvolvimento de robôs humanoides desenvolvidos pela KAWADA Industries em conjunto com a AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) (“Humanoid Robot HRP-4”, [S.d.]). Finalmente, o robô Hubo, desenvolvido pela Korea Advanced Institute of Science and Technology’s Humanoid Robot Research Center, é capaz de caminhar sem manter os joelhos curvados, que apesar de ser dinamicamente mais estável, é menos natural do que a forma como os seres humanos caminham (GUIZZO, 2010).

As dimensões teóricas ideais dos elos e juntas necessários para o movimento bípede possuem inspiração nos exemplos encontrados nos seres bípedes (CHEVALLERAU, et al., 2008 apud BRASIL, 2017). Uma das opções de modelagem da cinemática e dinâmica das diversas partes e ou do sistema como um todo de um robô bípede é a aproximação por um mecanismo quatro barras (BRASIL, 2017).

Este trabalho se caracteriza como um aprofundamento teórico do projeto de Bragaia (2020), em que foi desenvolvido o projeto mecânico conceitual e detalhado, de uma proposta de robô bípede composto por um par de pernas e quadril com cinco elos e quatro graus de liberdade (GDL) para mobilidade, assim como um elo e um grau de liberdade adicional para estabilização do centro de gravidade. Espera-se que este robô seja capaz de gerenciar a estabilidade durante o andar em diferentes tipos de terrenos, e enfrentando diferentes tipos de obstáculos. Este trabalho propôs o uso do alumínio 306 na construção do protótipo e preza pelo

uso de componentes de baixo custo, como Arduino, potenciômetros e servomotores, para controle do movimento do robô.

A partir disso, este trabalho propõe-se a realizar uma revisão bibliográfica a fim de subsidiar a otimização da programação do caminhar de um robô bípede previamente projetado por Bragaia (2020), com o intuito de garantir o menor tempo possível de caminhada e a estabilidade do robô.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

- Desenvolver um material apoio para o desenvolvimento do projeto de robô bípede dentro do Departamento de Engenharia Mecânica

2.2 Objetivos específicos

- Realizar um estudo abrangente do estado da arte de forma metódica e reproduzível;
- Analisar os aspectos construtivos e de controle dos robôs bípedes desenvolvidos e aplicáveis na programação do movimento rápido e estável.
- Definir as características comuns dos estudos selecionados;
- Propor melhorias no projeto desenvolvido pelo departamento.

3 SELEÇÃO DOS TRABALHOS

Para selecionar os artigos que embasaram a discussão teórico-metodológica dos aspectos construtivos e de programação de robôs bípedes, foram realizadas buscas em 3 plataformas, restringindo o período de 2000 a 2021. A primeira busca foi realizada no Catálogo de Teses e Dissertações da Capes (CAPES, 2021) e a sentença de busca utilizada foi “Robô Bípede”, encontrando 21 referências.

A segunda plataforma utilizada foi o Google Scholar e as sentenças de busca utilizadas foram "robô bípede" AND (equilíbrio OR estabilização)", tendo como resultado 34 artigos.

Por fim, a última plataforma utilizada foi a IEEE e as sentenças de busca utilizadas foram “(((“All Metadata":“walking robot”) AND (“All Metadata":biped)) AND (“All Metadata":balance) OR (“All Metadata":stabilization))”, encontrando assim 47 resultados, dos quais 26 foram selecionados por se assemelhar mais com o objetivo proposto pelo presente trabalho.

A partir dos resultados encontrados, definiu-se um método de filtragem para definir quais bibliografias que abordassem a relação entre os elementos mecânicos construtivos (ou uma modelagem) e os aspectos relativos à simulação e programação que fomentem as necessidades do protótipo. Buscou-se robôs que se assemelham ao máximo com o robô estudado. Para isso, foram definidas as seguintes frentes de estudo:

- Andar somente em linha reta e em terrenos planos;
- Análise de um robô bípede com poucos graus de liberdade (próximo de 10 GDL);
- O tema do estudo ser direcionado a um robô simples (sem sensores de visão, sensores de terreno, entre outros);
- Ter como foco do artigo/tese o estudo do caminhar e da estabilização do robô.

Entende-se também que essas frentes de estudos definidas aqui limitam momentaneamente que se vislumbre adaptações mais robustas, entretanto acredita-se que tais restrições atendam às necessidades do projeto no momento atual.

Essas frentes de estudos serviram para nortear quais literaturas seriam selecionadas. Diante disso, foram realizadas leituras de todos os 81 resumos das referências encontradas, a fim de selecionar os que satisfazem as frentes de trabalho e/ou que abordem soluções que possam ser consideradas relevantes para o projeto em questão.

Realizada a leitura dos resumos e a filtragem da literatura, foram selecionadas 20 referências que atendem aos requisitos estabelecidos anteriormente. Após a filtragem, se tornou

necessário diferenciar e realizar uma nova seleção, adotando como único critério a aplicabilidade do estudo desenvolvido na bibliografia no robô de Bragaia (2020).

Diante dessa nova seleção, foram identificadas 14 literaturas que apresentam propostas mais robustas ou de difícil implementação no projeto atual. Portanto, essas literaturas foram agrupadas na tabela 1 e são apresentadas de forma mais superficial, apontando componentes construtivos, de controle e uma breve menção sobre o desenvolvimento do trabalho. A tabela 1 é apresentado a seguir:

Quadro 1 – Estudos encontrados conforme ano, autor, título e características dos robôs, São Carlos – SP, 2021.

Ordem dos artigos	Ano	Autor(es)	Título	Plataforma	Materiais	Componentes	Graus de liberdade	Tipos de juntas, elos e componentes
1	2001	Filipe Miguel Teixeira Pereira da Silva	Análise dinâmica e Controle de sistemas robóticos de locomoção bípede	CAPES	-	-	Analisa robôs com quantidades diferentes de GDL.	-
2	2002	Koichi Osuka, Yasuhio Sugimoto	Stabilization of quasi-passive-dynamic-walking based on delayed feedback control	IEEE	Não informado	Não informado	5	Não informado
3	2003	Yu Okumura, Tetsuo Tawara, Ken Endo, Tkayuki Furuta and Masaharu Shimizu	Realtime ZMP compensation for biped walking robot using adaptive inertia force control	IEEE	Aço e Alumínio	Sensores de posição, sensores de força, giroscópios, acelerômetros, sensor de magnetismo, sensor de voltagem e sensor infravermelho	Não informado	Não informado
4	2004	Kyung-Kon Nohl, Jin-Geol Kim, Uk-Youl Hu	Stability experiment of a biped walking robot with inverted pendulum	IEEE	Aço, alumínio	Oito servos motores e redutores AC e um controlador DSP.	12 Graus de Liberdade	Junta prismática e juntas de rotação

5	2007	Ching-Long Shih, J.W. Grizzle, C. Chevallereau	Asymptotically Stable Walking of a Simple Underactuated 3D Bipedal Robot	IEEE	Não informado	Quatro atuadores	6	3 Elos. Duas pernas sem joelhos e um torso.
6	2008	J.W. Grizzle, Christine Chevallereau, and Ching-Long Shih	HZD-based control of a five-link underactuated 3D bipedal robot	IEEE	Não informado	Seis atuadores	8	3 elos, um torso, joelhos rotativos, pés pontiagudos passivos (não acionados), quadril atua como junta de rotação e joelhos rotativos
7	2008	Luiz Ricardo Douat	Estabilização do caminhar de um robô bípede de 5 elos com compensação do movimento dorsal	Google Scholar	-	Estrutura variável, podendo ser considerado como um sistema chaveado, na medida em que o impacto com o solo determina uma alternância dos estados do sistema	Não informado	Juntas de revolução, prismáticas, elétrica, hidráulica, pneumática

8	2009	Christine Chevallereau, J. W. Grizzle, Ching-Long Shih	Asymptotically Stable Walking of a Five-Link Underactuated 3-D Bipedal Robot	IEEE Transactions on Robotics	Não informado	Seis atuadores	8	5 elos, um torso, joelhos rotativos, pés pontiagudos passivos (não acionados), quadril atua como junta de rotação e joelhos rotativos
9	2010	K. Mitobe;M. Satoh;G. Capi	A ZMP control of a powered passive dynamic walking robot	IEEE	Método para diversos robos	Método para diversos robos	Método para diversos robos	Método para diversos robos
10	2011	Meiqiang Zhu, Jun Wang, Ming Li, Yajing Lin	Static Gait Analysis and Planning of Biped Robot	IEEE	Não informado	Não informado	23	Não informado
	2012	Pedro Jorge Ribeiro Barbosa	Otimização de locomoção bípede	Google Scholar	Liga de magnésio	Sensores de força, servo motores	20	Juntas esféricas
11	2014	Ashwin Sushil Kumar, Aswin G Krishnan, Akshay Sridhar,	Design and fabrication of bipedal robot	IEEE	Não informado	Servo motores de 30kgcm, hastes e atuadores nos braços.	12	Não informado

		Kiruthika N, N. Krishna Prakash						
12	2015	Fábio Bobrow	Controle de um pêndulo invertido com 6 graus de liberdade e rodas de reação	Google Scholar	Aço, alumínio	Hastes, rodas de reação, motor elétrico, giroscópio	6	Juntas esféricas
13	2015	Alysson R. da Silva, Alexei M. C. Machado	Robôs bípedes - Design e controle utilizando trajetórias paramétricas e arquitetura amórfica	CAPES	Alumínio, madeira	Servo motores, arduinos, acelerômetro, giroscópio	16	Juntas de revolução
14	2019	Akshay Dhonthi Ramesh Babu, B.B Kotturshettar, Arunkumar C. Giriapur	Investigate Feasibility of Model-Based Design Approach to Develop a Biped Walking Robot	IEEE	Não informado	Sensor de força, sensor de eletromiografia e marcadores	12	Não informado

Fonte: Autoria própria (2021).

Após o processo de análise de conteúdo de cada artigo, foi possível agrupá-los de acordo com preceitos de funcionamento e configurações semelhantes que se destacaram, sendo eles a estabilização, equilíbrio, método matemático e utilização de algoritmos.

Quadro 2 - Distribuição dos estudos encontrados por categoria.

Categoria	Síntese dos temas	Estudos
Estabilização	Aborda conceitos de absorção de impacto com o solo e características geométricas que possibilitam uma melhor estabilização	1, 2, 3, 6, 12
Equilíbrio	Traz reflexões sobre métodos matemáticos e de controle que possibilitam o equilíbrio durante o caminhar	7, 10, 11
Método Matemático	Desenvolvimento e análise e de modelagens matemáticas	4, 5, 8, 9, 14
Utilização de Algoritmos	Uso de algoritmo para programação da estabilização e equilíbrio do robô	13

Fonte: Autoria própria (2021).

Já os artigos que apresentam uma maior compatibilidade relacionada às necessidades do robô de Bragaia (2020), foram selecionados para uma abordagem mais completa dos métodos construtivos, de controle, estabilidade e equilíbrio, sendo agrupados no Grupo 2. Esse estudo mais aprofundado é exposto na seção 4.3 do presente trabalho, sendo considerado como resultados e discussão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo traz discussões mais aprofundadas sobre os estudos relatados anteriormente. A seção 4.1 refere-se a uma análise aprofundada sobre o robô de Bragaia (2020), robô que serviu de inspiração para toda a busca literária realizada no presente trabalho, a fim de solucionar problemas e propor melhorias.

A seção 4.2 traz uma análise referente ao Grupo 1, de literaturas selecionadas na tabela 1. Essa seção traz um estudo superficial por entender que no presente momento os trabalhos ali listados divergem das soluções buscadas para proposições a serem realizadas no robô de Bragaia (2020), mas podendo ser utilizados em etapas posteriores para se alcançar o caminhar em terrenos irregulares por exemplo. Tais divergências se dão por fatores construtivos mais robustos ou métodos de controle e estabilização não condizentes com os desejados aqui.

Já a seção 4.3 traz um estudo mais aprofundado sobre bibliografias que foram consideradas como pertinentes, que atendem os interesses do projeto e que podem ser replicadas no robô de Bragaia (2020). As soluções adotadas nos referidos trabalhos demonstram-se eficazes, com um custo relativamente baixo e de fácil implementação.

Por fim, a seção 4.4 traz algumas sugestões de possíveis melhorias a serem realizadas no robô.

4.1 - Análise Qualitativa das Condições de Contorno para a Programação do Robô de Bragaia (2020)

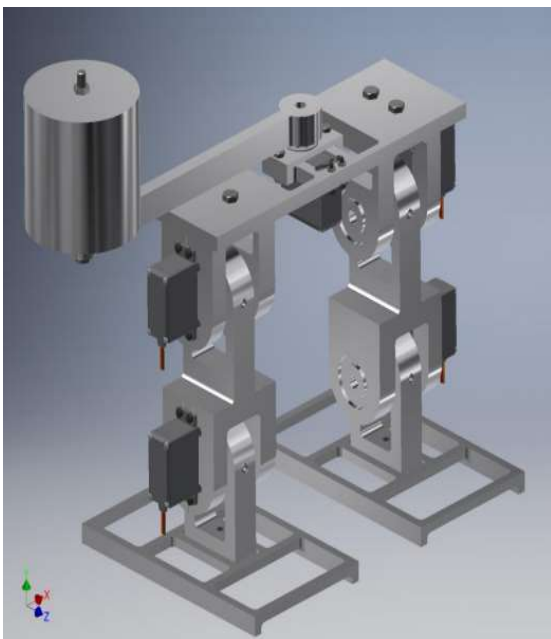
Na história das pesquisas relacionadas à caminhada bípede, um dos trabalhos mais relevante e que é uma referência até os dias atuais é o de Vukobratovic e Stepanenko (1972), no qual se desenvolveu um critério para a avaliação da estabilidade dinâmica de um robô humanoide durante a realização do seu movimento. Este conceito é conhecido como ZMP (do inglês *Zero-Moment Point*, ou Ponto de Momento Zero).

Além dos graus de liberdade ativos que um robô humanoide normalmente possui, existe ainda um grau de liberdade adicional e está localizado entre o chão e o pé do robô. Este grau de liberdade tem grande importância para seu equilíbrio, uma vez que não é desejado que o robô gire em direção do chão, ou seja, que ele caia durante o seu movimento de caminhada. Dessa forma, um dos maiores focos para se atingir a estabilidade durante a locomoção está relacionada à capacidade de controlar a ação deste GDL, e isso só pode ser feito indiretamente, por meio do controle da dinâmica da

interferência e/ou controle na dinâmica do robô, através da escolha de trajetórias que atendam ao ZMP (VUKOBRATOVIĆ; BOROVIAC, 2004).

Considerando as observações supracitadas, um dos problemas comumente observados é que um robô bípede, ao levantar um pé, fica sem equilíbrio e não consegue realizar o passo. Para que isso seja solucionado, propõe-se que seja considerado um contrapeso que atue como uma cauda. Nesse contexto, a cauda é fixa no topo do quadril e possui um peso significativo no modelo, tendo como função a mudança do lugar do centro de gravidade do robô. Esse deslocamento do CG faz com que o robô adquira o equilíbrio, possibilitando, assim, a sua movimentação ou apenas se manter em pé quando sua sustentação se der por apenas um pé. A ilustração do modelo cuja movimentação e estabilidade necessita de aprofundamento de estudos é apresentada na Figura 3 a seguir.

Figura 3: Ilustração do modelo 3D do robô bípede que será estudado.



Fonte: Bragaia (2020).

Nesse trabalho de Bragaia (2020), foi desenvolvido o projeto mecânico conceitual e detalhado, de uma proposta de robô bípede composto por um par de pernas e quadril com cinco elos e quatro graus de liberdade para mobilidade, assim como um elo e um grau de liberdade adicional para estabilização do centro de gravidade.

As técnicas de controle comumente utilizadas consideram um modelo completo ou parcial do robô para se obter uma melhor representação real do sistema. Neste trabalho,

deve ser levado em consideração somente a modelagem do movimento pendular do robô e o deslocamento angular de sua cauda.

O movimento pendular ocorre quando um pé é levantado e a gravidade exerce sua força no centro de gravidade do robô fazendo com que o robô tende a tombar. Já o deslocamento angular da cauda como contrapeso se dará a fim de gerar o equilíbrio no sistema. Como esses dois deslocamentos são variáveis independentes, torna-se possível a representação do comportamento dinâmico através de um conjunto de equações (SICILIANO et al., 2010). Portanto, infere-se que seja adequado trabalhar, inicialmente, a programação com duas variáveis independentes, que também são chamadas de graus de liberdade (GDL).

A análise dinâmica do modelo facilita a compreensão da relação entre os movimentos realizados e as forças que estão atuando no robô. Por outro lado, a cinemática possibilita o estudo da aceleração, velocidade e deslocamento das pernas do robô e de seu contra peso (FU; GONZALEZ; LEE, 1987).

No estudo dinâmico é levado em consideração o peso dos membros que constituem o corpo e geram momento, assim como em sistemas estáticos, e abrange ainda o momento gerado pela rotação de translação desses mesmos membros do robô, viabilizando assim o uso do balanço dos membros para obter uma maior eficácia (SANTANA, 2005).

Consideradas as condições para a proposição e execução do algoritmo de movimentação e controle do robô bípede, serão apresentados trabalhos correlatos e que podem contribuir no aprimoramento do estudo deste robô.

4.2 - Análise do Grupo 1 - Estado da Arte de Trabalhos com Soluções Divergentes das Desejadas.

A priori, tratando-se da análise de métodos de estabilização, o estudo de Da Silva (2001) analisa essa característica pela articulação do tornozelo do robô ao realizar o impacto ao solo com uma rotação longitudinal relacionando com a orientação da planta do pé. Ademais, Bobrow (2015) faz uso de um sistema complexo de controle não linear utilizando hastes e rodas de reação, que por sua vez possuem como componentes motores elétricos, trabalhando em conjunto para realizar um controle não linear e garantindo uma dinâmica de estabilização mais ágil. Osuka e Sugimoto (2002) focam o seu estudo em um controle que utiliza atuadores para manter um andar passivo do robô com o uso de feedback atrasado. O estudo 3 utiliza o método ZMP para controlar a inércia e ajustar os

parâmetros do feedback de acordo com um índice de estabilidade, assim há uma alteração na velocidade da marcha sem mexer em seu padrão de caminhada. Por fim desta categoria, o autor Grizzle et al (2008) utiliza um controle por meio de feedback para haver uma dinâmica natural do robô, atingindo assim o equilíbrio durante a sua caminhada. Assim, a estabilização é garantida sem o uso de um controlador baseado em eventos.

Ao se tratar de equilíbrio do robô bípede, os artigos selecionados se diferem nesse quesito. Já Douat (2008) utiliza como estratégia a utilização da energia mecânica para trazer o equilíbrio ao robô e a partir disso recombina a trajetória do movimento dorsal sem relacioná-lo com o eixo vertical, além de retirar a hipertensão do joelho na qual atribuía uma função de transferência da junta. Kumar et al (2014) utilizaram em seu estudo a regulação do centro de gravidade, no qual os componentes do robô (quadril, joelho e pé), alcançando assim 12 GDL e controlado por um microcontrolador. Por fim, o estudo de Zhu (2011) conta com o ajuste das juntas do robô para corresponder a uma trajetória determinada e que elas corroboram com a análise do equilíbrio proposta.

Partindo para a categoria do uso de métodos matemáticos no projeto de construção do robô bípede foi encontrado no estudo de Nohl (2004) a utilização de controle pelo método ZMP para modelar uma equação diferencial não homogênea de segunda ordem em condições de contorno. Além disso, é aplicado um equalizador diferencial linearizado e uma trajetória do peso do equilíbrio que pode ser calculada de forma direta. Assim, pode-se aplicar o ZMP em vários tipos de situações e em movimentos complexos. Ademais, Long Shih et al (2007) traz a aplicação do método de HZD para calcular de forma simultânea uma órbita periódica e um controlador de feedback autônomo responsável pela órbita. Já o estudo de Chevallereau et al (2009) aborda a união de duas ferramentas para calcular a órbita periódica e um controlador de feedback autônomo: extensão do método de restrições virtuais e a dinâmica zero híbrida (HZD). São utilizados 3 tipos de estratégias para produzir uma caminhada estável: impor condições de estabilidade durante a busca de uma marcha periódica por otimizar, o uso de controlador baseado em eventos que modificam os autovalores e a seleção de saída na dinâmica zero, tudo isso levando a uma estabilização sem usar controlador suplementar baseado em eventos. Mitobe et al (2010) traz um contraste com o uso dos métodos usuais no qual o ZMP é controlado por um planejamento de movimentos em termos de trajetórias de articulação, além do ZMP ser monitorado sem associação com uma mudança da posição do centro de massa. Além disso, é um método de baixo custo sem qualquer aplicação de movimentos complexos, tendo como resultado a potência do motor bastante reduzida ao

ser comparado com os robôs mais comuns. Por fim, o estudo Babu (2019) implementa uma metodologia de design baseada em um modelo no desenvolvimento do algoritmo de estabilidade ZMP. A marcha do robô é desenvolvida por um modelo de planta no software *Simulink* no qual os ângulos das articulações são testados em uma plataforma de simulação virtual.

Na categoria de algoritmo, há o estudo de Silva e Machado (2015) que aplica um sistema anamórfico utilizando algoritmos *Ajttr* e *Fabrikrt* que vão gerar as trajetórias já adaptadas para funcionar em tempo real. A característica de arquitetura amórfica proporciona uma hibridização completa com integração de várias técnicas construtivas, transformando-o em um sistema complexo e com um controle eficaz com redução de perturbações causadas na parte inferior do robô.

4.3 - Análise do Grupo 2 - Estado da Arte de Trabalhos envolvendo Construção, Design e Programação de Robôs Bípedes

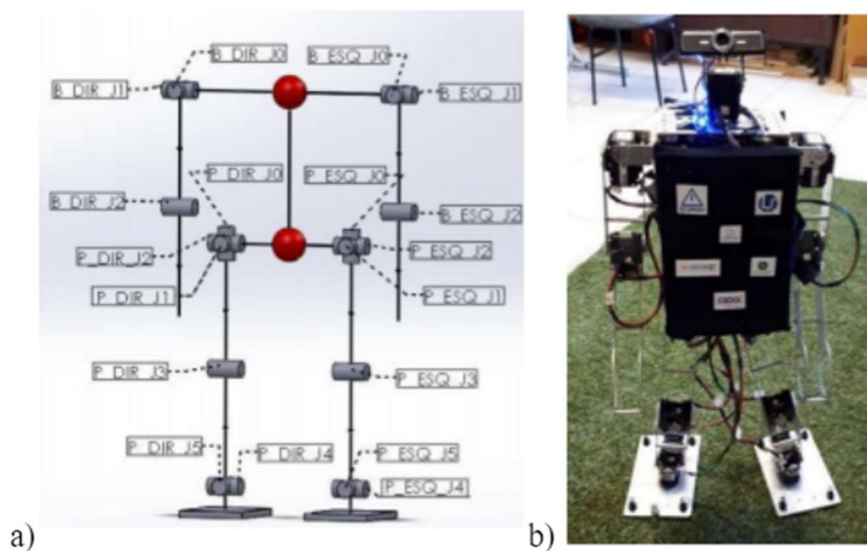
O trabalho de Venâncio (2018) apresenta técnicas de locomoção humanoide, com a aplicação da estratégia de estabilização da locomoção humanoide e implementou uma abordagem nova na área de detecção de terrenos durante a caminhada humanoide.

Para a geração das trajetórias de caminhada foi utilizado o método do pêndulo invertido linear em que o robô tem sua dinâmica simplificada como a de um pêndulo invertido. Este método mostrou capacidade de geração de trajetórias estáveis para o modelo simulado do robô humanoide, já para o robô real, foram necessárias algumas adaptações do método para o ajuste da postura do robô e do período do tempo de cada passo.

Em seguida, foi feito um estudo a respeito do controle de impedância mecânica, no qual se observou que a modificação da constante de rigidez do controle PID (Proporcional Integral Derivativo) referente às articulações tem a capacidade de melhorar a qualidade da caminhada do robô mesmo em diferentes tipos de terrenos. Por fim, foi proposta uma nova técnica de identificação de terreno, onde uma assinatura em formato de imagem monocromática do terreno é gerada por meio das informações dos sensores de torque e do sensor inercial presentes no robô humanoide. Por meio dessa assinatura, uma rede neural convolucional é utilizada para a classificação de seis diferentes tipos de terrenos.

O esquema cinemático do robô utilizado por Venâncio (2018) é apresentado na Figura 4. O robô tem 89 centímetros de altura e pesa 7,2 quilogramas. Em relação aos graus de liberdade, são seis em cada perna, três em cada braço e dois para os movimentos da cabeça. Foram usados motores do modelo MX-106 para os membros superiores e inferiores e do modelo MX-64 para o movimento da cabeça, ambos da fabricante Dynamixel (ROBOTIS, 2018). Esses motores são do tipo servo motor digital, que permitem sua operação por meio de comunicação TTL com o controlador. O controlador utilizado foi o Mini PC Intel® NUC que possui um processador Intel Core i5 de 1.6 GHz e 4GB de memória RAM. A estrutura mecânica do robô foi feita em maior parte de alumínio. O robô conta ainda com um IMU (unidade de medição inercial, do inglês *Inertial Measurement Unit*) localizado próximo ao seu centro de massa, que se trata de um sensor de inércia que fornece informações de velocidade angular e aceleração linear do ponto em que é instalado (STEPHANIE et al., 2018). Além do robô real, foi utilizado um modelo simulado para os testes de caminhada, da mudança no controle de impedância e para os testes de identificação do terreno, a fim de evitar a depreciação do robô real durante os experimentos.

Figura 4: (a) Esquema cinemático do robô desenvolvido por Venâncio (2016), com as respectivas identificações sem a estrutura da cabeça; (b) Protótipo do robô.



Fonte: Venâncio (2018).

Segundo Venâncio (2018), algumas limitações mecânicas do robô real foram observadas, tais como folgas mecânicas, torque insuficiente para alguns movimentos e algumas deficiências do próprio controle interno dos motores, aspecto que tornou a

transposição modelo-realidade bastante desafiadora com os recursos que eram disponíveis. Para contornar tais limitações, foram priorizadas simulações em detrimento a testes com o robô, além de algumas alterações no método de trajetórias de caminhada, além da adição de elementos estáticos em algumas articulações para a redução de folgas mecânicas.

O robô foi simulado em 6 terrenos diferentes, e foram obtidos parâmetros tanto cinemáticos, quanto de rigidez do controle PID que pudessem proporcionar um comportamento dinâmico que consiga manter o equilíbrio durante a caminhada por estes diferentes terrenos. No entanto, não houve garantia de estabilidade para a locomoção para ambientes diferentes dos simulados, e, portanto, segundo o autor, uma melhor robustez da caminhada e eficiência energética seriam propiciadas por meio da classificação do terreno e adequação das estratégias de controle.

Neste projeto o método LIPM foi testado tanto em um robô real quanto no robô virtual, e algumas modificações, como as posturais e na frequência de execução, mostraram resultados positivos para uma caminhada com geração online de movimento tanto para o robô real quanto para o robô simulado. O método LIPM utiliza a modelagem dinâmica de um pêndulo invertido para representar a dinâmica do robô. A massa do robô é totalmente concentrada em seu centro de massa (CM), e a perna de apoio funciona como o pêndulo invertido que deve fazer o trabalho de manter a altura do CM constante,

As modificações feitas por Venâncio (2018) aprimoraram um trabalho do próprio autor (2016) baseado em Kajita et al. (2001), que trazia limitações da aplicação do LIPM no robô real, apresentando instabilidades devido às folgas mecânicas das articulações, das imprecisões mecânicas de construção, das limitações de hardware e principalmente da variação das características do terreno.

O autor concluiu que, no ambiente de simulação, com a ausência das folgas mecânicas, é possível observar uma caminhada mais estável, com menos quedas e menos ajustes dos parâmetros adicionais aos originais do LIPM. Esse fato, permitiu inferir que o método de geração de trajetória apresenta eficácia, porém, ao mesmo tempo, foi necessário implementar algum mecanismo de estabilização da caminhada para pequenos distúrbios, principalmente para aqueles causados por mudanças nas características do terreno. A implementação que se mostrou adequada foi a mudança nos valores da constante proporcional (Kp) do controle PID, a partir de embasamento teórico e prático em trabalhos na área de robótica móvel com pernas, onde a alteração desta constante está

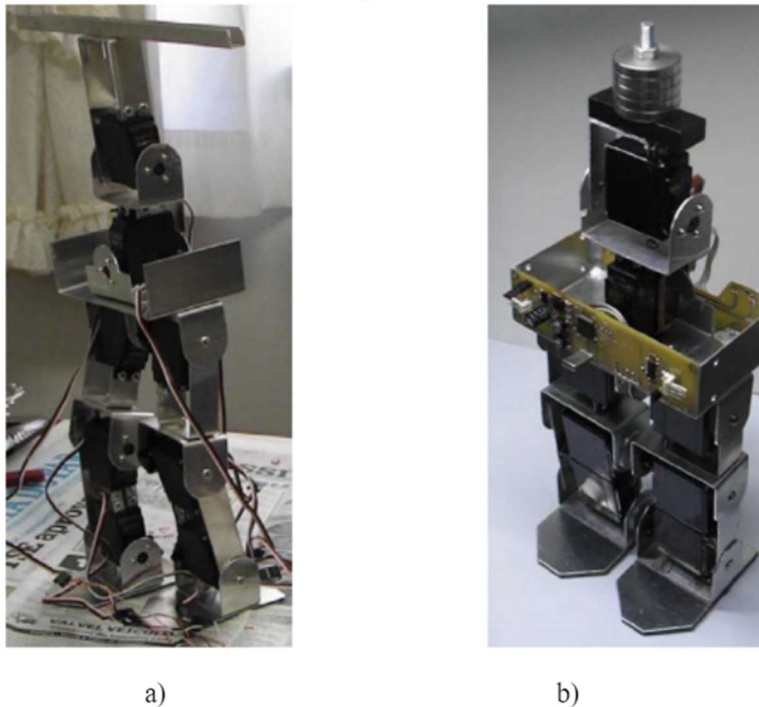
relacionada com o controle de impedância, que tem o potencial de reduzir o efeito de impactos quando o robô interage com o ambiente.

Miyadaira (2011) desenvolveu, construiu e controlou um robô bípede dotado de 8 Graus de Liberdade, sendo três GDL para cada perna e dois para o tronco. As características desta estrutura permitiram realizar uma marcha dinâmica no plano sagital, cuja trajetória das pernas foi definida por um modelo matemático baseado na geometria da estrutura. Em relação a sua estrutura física, esta foi constituída por nove corpos rígidos, os quais estão conectados por juntas rotacionais de 1 GDL cada, sendo 3 GDL para cada uma das pernas e 2 GDL para o tronco, totalizando 8 GDL. As juntas foram distribuídas da seguinte forma:

- Uma junta rotacional conectada no último elo do tronco que possibilita o movimento no plano sagital;
- Uma junta rotacional conectada no primeiro elo do tronco possibilitando o movimento no plano frontal;
- Duas juntas rotacionais localizadas na pelve, sendo uma delas alocada para o movimento do quadril direito e a outra para o esquerdo, permitindo o movimento no plano sagital;
- Uma junta rotacional bilateral para os joelhos que possibilita o movimento no plano sagital;
- Uma junta rotacional bilateral para os tornozelos possibilitando o movimento no plano sagital.

A estrutura robótica desenvolvida para a realização dos experimentos de bancada passou por duas versões, que podem ser observadas na Figura 5.

Figura 5: À esquerda (a) tem-se a primeira versão da estrutura bípede e à direita (b), a segunda versão.



Fonte: Miyadaira (2011).

Em relação à simulação, primeiramente, foi desenvolvido o planejamento da trajetória das pernas e, em seguida, foi proposta a trajetória do ZMP no plano YZ. Na sequência, foi obtida a trajetória do tronco para que o robô apresentasse uma marcha dinamicamente estável e finalmente as forças generalizadas. Após a simulação, foi realizada a etapa experimental com o intuito de validar a modelagem da estrutura bípede, reproduzir a trajetória das juntas obtidas nas simulações, testar e analisar a importância da atuação do tronco para o equilíbrio do sistema e checar o conceito de ZMP.

Durante os experimentos, foi observada a necessidade da aplicação de antiderrapante nas solas dos pés para que a direção do movimento fosse mantida, uma vez que a aceleração da perna de balanço resultou em uma força de rotação na estrutura em relação ao eixo normal à superfície de apoio.

A marcha foi reproduzida por meio de controle em malha aberta, uma vez que os movimentos rotacionais das juntas foram realizados por servomotores compostos por um conjunto de engrenagens e um controlador PID embarcado no próprio servomotor. Ainda que os servomotores tenham fornecido torque suficiente para a realização de todos os movimentos requeridos, não foi possível reduzir as folgas apresentadas em seus eixos e alterar os ganhos do controlador interno de modo a otimizar o sistema. Desta forma, para aumentar a robustez da estrutura física e a autonomia no controle do movimento, o autor

recomendou substituir os servomotores por motores DC associados a um conjunto de engrenagens com encoder óptico acoplado em cada junta, possibilitando assim, uma maior autonomia no controle da posição, velocidade e aceleração.

Neste trabalho, o controle da posição dos servomotores foi realizado por um microcontrolador ARM LPC2138 de 32bits capaz de fornecer 8 sinais de PWM (*Pulse Width Modulation*) simultaneamente, capazes do controle de todos os movimentos das juntas. O mesmo microcontrolador também foi usado para calcular a inclinação da pelve fornecida por um acelerômetro MMA7260 de três eixos e para transferir os dados para um programa em LabVIEW, o qual possibilitou observar pequenas variações na inclinação da pelve ocasionadas por falhas verificadas nas juntas. Este programa também permitiu observar a instabilidade gerada pela movimentação inicial do tronco durante a transição do pé de apoio e, por conta disso, foi inserido um movimento intermediário para ele, o qual reduziu consideravelmente as oscilações da estrutura causadas pelo deslocamento acentuado do tronco. O autor também inferiu, a partir de seus resultados, que se dois GDL forem adicionados na movimentação das pernas do robô bípede, este poderia realizar uma marcha dinamicamente estável sem a necessidade da atuação do tronco, resultando em movimentos mais rápidos e suaves conforme observado em alguns robôs bípedes atuais. Contudo, sabe-se que a adição de graus de liberdade aumenta consideravelmente a complexidade do problema e, conseqüentemente o esforço computacional, exigindo assim, o emprego de técnicas de controle mais sofisticadas, nas quais uma série de padrões de movimento do pé pode ser previamente armazenada em um banco de dados, cujo pré-cálculo do ZMP garante a estabilidade da estrutura, cujo valor real poderia ser obtido por sensores de força localizado nos pés.

Prado (2015) utilizou materiais reciclados ou em desuso para a construção de seu robô bípede, com a finalidade de reduzir o custo de montagem. Dentre os materiais, utilizou rolamentos de drives de disquete 5 1/4" e CD-ROM, retalhos de placas e perfis de alumínio entre outros materiais.

O autor justificou que o uso dos perfis de alumínio reciclados a partir de ferro velho teve como intuito aproveitar de sua leveza, de sua boa resistência mecânica, sua maleabilidade, entre outros, atendendo as necessidades do protótipo e a facilidade na montagem. Com isso, o uso do alumínio permitiu a redução das dimensões das peças de modo a reduzir o peso no modelo final. Além disso, optou-se por utilizar um número reduzido de peças diferentes, tanto para simplificar o projeto, quanto para minimizar a força de torque exercida pelos servos motores.

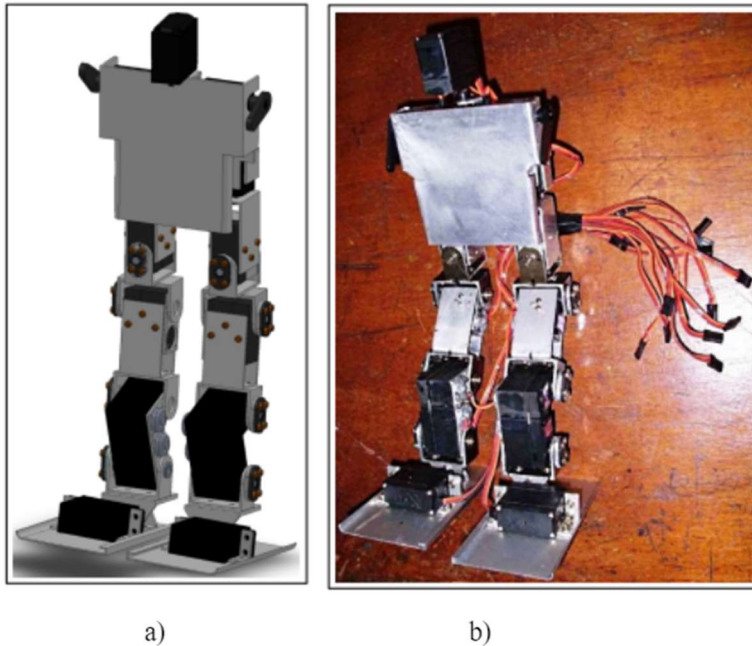
Para a base dos pés, Prado (2015) utilizou um apagador de quadro branco e uma cantoneira de suporte de isoladores de cerca elétrica. O autor também se utilizou de rolamentos adaptados junto aos tornozelos, proveniente do cabeçote de leitura de dois discos rígidos.

Segundo o autor, foi necessário adquirir várias peças via importação devido a seu alto custo no Brasil, como o microcontrolador, servomotores, osciladores, memória, entre outros. A limitação é que o trâmite aduaneiro, o cálculo e recolhimento de tributos e a liberação final das peças e materiais pelos órgãos fiscalizadores atrasaram a execução do projeto.

Neste estudo foi observado que a etapa mais desafiadora foi a montagem do joelho, devido ao número de articulações. A largura e a altura desta peça em relação à proporção desejada sem a alteração significativa do centro de massa do robô. Para esta adequação, as tampas originais dos servomotores foram removidas e, manualmente desenvolvidas com a finalidade de se reduzir o tamanho total do conjunto. Ainda segundo o autor, foi utilizada uma pá de alumínio de um ventilador de teto como a proteção peitoral e um dissipador de calor de um aparelho amplificador. A proteção de pá de alumínio teve como finalidade comportar as baterias de polímero de íon lítio (Li-Po) e a chapa do dissipador de calor utilizado para a fixação das demais partes junto ao tórax do robô. Na região do tronco foi utilizado outra chapa de alumínio proveniente de um dissipador de calor de transistor de um aparelho amplificador, o qual foi utilizado na fixação dos demais servos do tronco e, a cabeça foi fixada por um pedaço de cantoneira de alumínio.

Na Figura 6 são apresentados o modelo desenvolvido em SolidWorks (a) e o robô real construído com os materiais anteriormente citados (b).

Figura 6: À esquerda (a) tem-se o modelo desenvolvido para o robô bípede e à direita (b), o projeto mecânico.



Fonte: Prado (2015).

Em relação à programação, foi utilizado um software embarcado dedicado a um microcontrolador específico. Foi definido um microcontrolador de forma genérica como sendo um conjunto de circuitos lógicos integrados em um único chip de silício cujas conexões e comportamento podem ser especificados e posteriormente alterados, por meio do programa em sua memória quando necessário. A grande vantagem está no fato de mudar a estrutura do circuito e sua operação, bastando apenas uma mudança no programa e algumas pequenas modificações no circuito físico, quando necessário. Como resultado, houve a determinação da oscilação do centro de massa do robô de maneira empírica, por meio de tentativa e erro, e simplificações que foram feitas na montagem do protótipo permitiu facilitar a execução do projeto. Segundo o autor, a utilização de equações matemáticas específicas dos movimentos bípedes e simuladores de computação gráfica poderá melhorar a naturalidade dos movimentos (PRADO, 2015).

Foresti (2006) desenvolveu um sistema robótico de baixo custo e que tinha a finalidade de ser usada para realizar testes exaustivos de algoritmos de Inteligência Artificial, validação de estudos estáticos e dinâmicos da movimentação de bípedes e pesquisas na área de bioengenharia e próteses robóticas, o MNERIM. Para sua montagem foi utilizado como ligações das juntas o polietileno (coxas, perna e pé). O material é extremamente leve e os tubos construídos apresentavam rigidez satisfatória. Para formar

as juntas, motores de corrente contínua foram fixados em um extremo de cada ligação por meio de resina epóxi e foram acoplados a caixas de redução, que apresentavam um conjunto de engrenagens formado por três coroas de 36 dentes e três pinhões de 10 dentes. Dessa forma, cada par pinhão-coroa contribui com um fator de redução de 1 para 3,6. Como estavam montados em série, a caixa de redução apresentava um fator de 1 para 46,6. Uma vantagem observada foi que o fator de redução foi suficiente para a perna se movimentar com velocidade e torque satisfatórios. Entretanto, houve a limitação do sistema não apresentar resistência suficiente para prover rigidez quando parado. Quando os motores não estavam em movimento a junta não se mantinha estática devido à força exercida pelo próprio peso do sistema.

Segundo o autor, foi feita uma nova tentativa de aumentar a resistência das juntas com uma montagem com fusão de rosca sem fim e engrenagem a partir de chapas de aço galvanizado usinadas. O novo sistema apresentava fator de redução muito maior que arranjos de coroa e pinhão e a transferência de movimento ocorria em apenas um sentido, ou seja, a força angular aplicada à engrenagem não produzia movimento no fusão, apenas o contrário. Os mancais de sustentação foram confeccionados em bronze.

Novamente o autor optou por utilizar um novo sistema, a fim de aprimorar a sua robustez. Dessa vez, as ligações foram feitas a partir de barras de alumínio maciças com 5 mm de espessura e 25 mm de largura. Observou-se que essas barras conferiram mais rigidez, um suporte mais preciso para os motores, e possibilitou substituir peças que pudessem se danificar, uma vez que utilizou parafusos em detrimento à colagem de peças, como ocorreu nos dois primeiros projetos anteriormente citados. O sistema físico, por fim, se mostrou bastante satisfatório, no entanto foi observado o surgimento de pequena folga nas juntas decorrente do desgaste nos eixos dos motores. Foi observada, também, além da cintura, coxas, pernas e pés, a necessidade de uma ligação para o pêndulo responsável pelo deslocamento do centro de massa.

Em relação ao processamento, o sistema implementado também apresentou um funcionamento dentro do esperado, capaz de executar os algoritmos de controle e inteligência artificial exigidos pelos requisitos do sistema. Os softwares desenvolvidos apresentaram um desempenho satisfatório, atendendo aos requisitos levantados pelo projeto. Foresti (2006) infere que seu projeto apresentou vantagens como: baixa complexidade construtiva devido a processos simples, facilidade para encontrar componentes, componentes reaproveitáveis, simplicidade de programação sem perda de

flexibilidade, código aberto e liberdade de uso e distribuição, aperfeiçoamento contínuo e baixo custo.

Toscano (2011) desenvolveu um gerador de trajetórias quase-estáticas estáveis, segundo o critério do *Zero-Moment Point* (ZMP), a partir do modelamento cinemático de robôs bípedes antropomórficos (RBA), utilizando o conceito de base flutuante. O pesquisador, inicialmente, construiu o modelo 3D de um RBA para realizar o levantamento dos parâmetros físicos e estruturais do robô bípede, por meio de uma ferramenta CAD. A base flutuante consiste em uma técnica na qual se aloca um sistema referencial local em uma estrutura, a qual pode se movimentar livremente no espaço com quaisquer orientação e posição em relação a um referencial inercial considerado.

Segundo o autor, um RBA possui juntas atuadas em todas as suas articulações as quais podem ser controladas de maneira direta. No, a região de contato entre o pé do robô e a superfície de apoio, onde ocorre a interação entre o robô e o ambiente, é considerada como uma junta passiva - tendo como eixos de rotação ou o calcanhar ou os dedos quando os mesmos estão apoiados no chão - a partir do momento que não pode ser controlada diretamente, a não ser a partir do controle da estrutura robótica acima dela.

Esta área de contato é muito importante para a realização do movimento porque a posição do robô em relação ao ambiente depende da posição e orientação da base flutuante em relação ao referencial inercial considerado (SENTIS, 2007).

Por meio dos modelos 3D desenvolvidos e da análise cinemática, foram determinadas as restrições da locomoção bípede, além da parametrização do gerador de trajetórias espaciais quase-estáticas proposto no trabalho (TOSCANO, 2011). Ao final, as trajetórias geradas foram validadas, por meio de simulação espacial, pelo critério do ZMP tridimensional. Outra contribuição desta pesquisa foi a utilização do método geométrico com restrições para o desenvolvimento do gerador de trajetórias, a partir do modelo de um RBA, utilizando o conceito da base flutuante; a estrutura antropomórfica é composta por braços, pernas e tronco, os quais foram considerados na geração da locomoção bípede.

Figuerola (2014) desenvolveu a modelagem cinemática e estática de um robô bípede plano, com o objetivo de otimizar padrões de marcha quase-estática. Os padrões de marcha foram avaliados e otimizados utilizando algoritmos genéticos para minimizar a relação entre a energia consumida pelos motores do robô e o deslocamento obtido em cada passo, sempre garantindo equilíbrio estático dentro de uma margem de segurança. A evolução dos diferentes ângulos das juntas do robô para os padrões de marcha

resultantes foi armazenada indiretamente ajustando os coeficientes de funções polinomiais ou trigonométricas.

Foram exploradas duas abordagens para os algoritmos genéticos: uma visando a otimização de um passo completo da marcha, e outra para otimizar de forma independente os sub-passos dentro de cada passo. O robô físico foi representado no software “Matlab” nas primeiras simulações com quatro elos retos rígidos e quatro motores com ângulos chamados de α . Segundo Figueroa (2015), foram ajustados os parâmetros de controlador com o bloco “*Pidcontroller*” de “Simulink” e mediante algoritmos genéticos para malhas de controle cinemático, onde o melhor comportamento no ajuste dos parâmetros foi o PID auto ajustado. Geraram-se padrões de marcha com algoritmos genéticos visando quatro diferentes opções de configuração do cromossomo: indiretamente com o ajuste de funções polinomiais e trigonométricas; e diretamente com passo completo e subpasso. O autor concluiu que o melhor padrão de marcha obtido diminuiu a relação energia/deslocamento em até 18% em relação a outros padrões de caminhada não otimizados. O melhor padrão obtido foi programado em um robô Bioloid GP para validação física da estabilidade da marcha sobre uma superfície plana sem obstáculos. Além disso, sugeriu também utilizar programação genética para ampliar o número de funções como gerador de padrões de marcha, permitindo ampliar as possíveis soluções e não limitar as funções conhecidas como polinômios e cossenos, as quais foram utilizadas em seu trabalho.

Na tabela 3 os artigos, dissertações e teses discutidos neste trabalho estão resumidos, com vantagens observadas e aprimoramentos, e desvantagens e limitações.

Quadro 3: Síntese dos trabalhos analisados nesta monografia, São Carlos - SP, 2021.

Autor	Graus de Liberdade	Vantagens e aprimoramentos	Desvantagens e limitações
Venâncio (2018)	20	A testes com o robô, além de algumas alterações no método de trajetórias de caminhada, além da adição de elementos estáticos em algumas articulações para a redução de folgas mecânicas	Folgas mecânicas, torque insuficiente para alguns movimentos e algumas deficiências do próprio controle interno dos motores
Miyadaira (2011)	8	Inferiram que substituir os servomotores por motores DC	Não foi possível reduzir as folgas

		<p>associados a um conjunto de engrenagens com encoder óptico acoplado em cada junta, possibilitando assim, uma maior autonomia no controle da posição, velocidade e aceleração.</p> <p>Permitiu observar a instabilidade gerada pela movimentação inicial do tronco durante a transição do pé de apoio e, por conta disso, foi inserido um movimento intermediário para ele, o qual reduziu consideravelmente as oscilações da estrutura causadas pelo deslocamento acentuado do tronco.</p> <p>Observaram que se dois GDL forem adicionados na movimentação das pernas do robô bípede, este poderia realizar uma marcha dinamicamente estável sem a necessidade da atuação do tronco.</p>	<p>apresentadas em seus eixos e alterar os ganhos do controlador interno de modo a otimizar o sistema.</p> <p>Adição de graus de liberdade aumenta consideravelmente a complexidade do problema e, conseqüentemente o esforço computacional, exigindo assim, o emprego de técnicas de controle mais sofisticadas.</p>
Prado (2015)	Não informado	<p>Materiais reciclados ou em desuso para a construção de seu robô bípede, com a finalidade de reduzir o custo de montagem.</p> <p>Estrutura de alumínio: leveza, de sua boa resistência mecânica, sua maleabilidade.</p> <p>Software embarcado dedicado a um microcontrolador específico, que permite mudar a estrutura do circuito e sua operação, bastando apenas uma mudança no programa e algumas pequenas modificações no circuito físico.</p> <p>Determinação da oscilação do</p>	<p>O trâmite aduaneiro, o cálculo e recolhimento de tributos e a liberação final das peças e materiais pelos órgãos fiscalizadores atrasaram a execução do projeto.</p>

		centro de massa do robô de maneira empírica, por meio de tentativa e erro, e simplificações que foram feitas na montagem do protótipo permitiu facilitar a execução do projeto.	
Foresti (2006)	Não informado	<p>Projeto Inicial: foi utilizado como ligações da juntas o polietileno (coxas, perna e pé).</p> <p>Material extremamente leve e tubos construídos apresentavam rigidez satisfatória e fator de redução suficiente para a perna se movimentar com velocidade e torque satisfatórios.</p> <p>Segundo Projeto: aumentar a resistência das juntas com uma montagem com fuso de rosca sem fim e engrenagem a partir de chapas de aço galvanizado usinadas.</p> <p>Terceiro Projeto: nessa vez, as ligações foram feitas a partir de barras de alumínio maciças com 5 mm de espessura e 25 mm de largura. Observou-se que essas barras conferiram mais rigidez, um suporte mais preciso para os motores, e possibilitou substituir peças que pudessem se danificar, uma vez que utilizou parafusos em detrimento à colagem de peças.</p> <p>Software apresentou baixa complexidade construtiva devido a processos simples, facilidade para encontrar componentes, componentes reaproveitáveis, simplicidade de programação sem perda de flexibilidade, código aberto e</p>	<p>Projeto Inicial: Houve a limitação do sistema não apresentar resistência suficiente para prover rigidez quando parado.</p> <p>O sistema físico, por fim, se mostrou bastante satisfatório, no entanto foi observado o surgimento de pequena folga nas juntas decorrente do desgaste nos eixos dos motores.</p>

		liberdade de uso e distribuição, aperfeiçoamento contínuo e baixo custo.	
Toscano (2011)	Não informado	O gerador foi parametrizado de tal forma que possibilitasse a geração de trajetórias com características diferentes a partir da alteração de seus parâmetros.	Não informado
Figueroa (2015)	Não informado	O melhor padrão de marcha obtido diminuiu a relação energia/deslocamento em até 18% em relação a outros padrões de caminhada não otimizados. O melhor padrão obtido foi programado em um robô Bioid GP para validação física da estabilidade da marcha sobre uma superfície plana sem obstáculos.	Não informado

Fonte: Autoria própria (2021).

4.4 - Proposições para o robô de Bragaia (2020)

De posse do aprofundamento realizado no presente trabalho, é possível realizar proposições para o robô de Bragaia(2020), que são apresentadas a seguir:

- Utilização de sensores de força nos pés do robô, a fim de proporcionar um melhor controle de equilíbrio e estabilização;
- Inserção de mais graus de liberdade, facilitando o deslocamento menos brusco do robô e conseqüentemente um deslocamento mais ágil e estável;
- Remoção da “cauda”, tendo em vista que a mesma torna a estabilização e o equilíbrio lento, por possuir duas variáveis independentes e a cauda depender do feedback do deslocamento das pernas.

É importante enfatizar que as literaturas aqui mencionadas trazem diferentes abordagens e métodos para a obtenção de resultados que proporcionem equilíbrio, estabilidade, métodos construtivos e métodos de controle e que cada um dentro da sua respectiva frente de trabalho traz abordagens que se demonstram satisfatórias para os

objetivos esperados e que também podem ser utilizadas. Não é possível afirmar quais métodos seriam os ideais e mais eficientes, tendo em vista que o objetivo principal é o desenvolvimento intelectual e fomentar necessidades do segmento robótico.

Para que seja possível a obtenção da modelagem matemática, sugere-se que sejam adotadas algumas hipóteses simplificadoras para linearizar o sistema. De posse da modelagem, deve ser iniciada a implementação e aplicação de um controle que fará a movimentação da cauda para atingir o equilíbrio. Isso deve ser feito visando à condição de equilíbrio no decorrer do deslocamento da perna, até que o pé esteja apoiado no solo, sendo utilizado um mecanismo que atuará como contrapeso e possibilitará mover o centro de gravidade (CG) do protótipo, contribuindo com a estabilidade do caminhar.

Sugere-se que o projeto seja desenvolvido baseando-se nos conceitos matemáticos da dinâmica multi corpo, projetando-o com base na teoria de controle linear e simulando em um modelo não linear, buscando assim as melhores estratégias de controle.

Como o modelo físico do robô é um modelo não linear, deve ser elaborado um modelo esquemático do robô adotando algumas simplificações para transformar esse modelo não linear em um modelo linear e assim obter uma função de transferência (FT). Com essa FT, será projetado o controle em cima de critérios de desempenho.

Para a obtenção do controle, devem ser analisados o sobre sinal, o lugar das raízes, o ganho que torna o sistema estável e que forneça um tempo de resposta e acomodação que satisfaça os critérios de desempenho do projeto, além de medir e comparar o erro para diferentes análises. Essa medição e comparação do erro será feita utilizando a norma erro, que é comumente utilizada para esse tipo de problema.

Para a simulação feita no software MatLab, deve ser usado o modelo não linear que será realimentado pelo controle. As entradas e saídas serão inseridas no sistema de forma numérica. Com isso, espera-se analisar o sistema todo em sua forma não linear com o intuito de obter o resultado mais próximo possível do real. Essa simulação deve ser feita variando o ganho do sistema e analisando a sua estabilidade e tempo de reação para cada configuração adotada.

5. CONCLUSÃO

O objetivo principal do presente trabalho foi elaborar um material de apoio para o projeto de robô bípede atualmente em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. Pode-se afirmar ainda que a busca de materiais em português ainda é restrita a poucos estudos, tornando assim um campo de estudo promissor.

O material descrito apresenta estudos de metodologias de controle, aspectos construtivos, modelagem matemática, estabilização e equilíbrio de robôs bípedes. Desse modo, buscou-se a compreensão e a análise de diferentes estudos que proporcionaram a locomoção de robôs trazendo harmonia entre a dinâmica do mecanismo e o controle. Para o desenvolvimento e para a compreensão de métodos que pudessem trazer abordagens aplicáveis e de fácil implementação ao robô desenvolvido aqui, foram levantadas 81 literaturas, das quais foi possível descrever informações e técnicas abrangentes para que se possa replicar, como:

- Adicionar Graus de liberdade;
- Adicionar sensores de força;
- Remoção da "cauda".

É possível analisar e aproveitar os resultados obtidos no presente trabalho, contudo, o campo em estudo está em constante evolução e traz diferentes abordagens e soluções que podem ser pertinentes e diferentes das apresentadas neste trabalho. Nesta conformidade, as prospecções para trabalhos futuros são direcionadas em dois caminhos: Aproveitar os estudos aqui fornecidos para gerar trabalhos considerando o projeto já em desenvolvimento ou realizar uma busca mais aprofundada e detalhada para se identificar caminhos diferentes com o mesmo objetivo de estabilidade, equilíbrio, controle e modelagem.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BABU, Akshay Dhonthi Ramesh; KOTTURSHETTAR, B. B.; GIRIYAPUR, Arunkumar C. **Investigate Feasibility of Model-Based Design Approach to Develop a Biped Walking Robot**. In: 2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). IEEE, 2019. p. 871-875.

BEZZERA, C. A. D., **Desenvolvimento de um Robô Bípede Para Locomoção em Ambiente Desestruturado**, Tese de Doutorado, FEM - UNICAMP. 2002.

BOBROW, Fabio. **Controle de um pêndulo invertido com 6 graus de liberdade e rodas de reação**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BRAGAIA, G. F. **Projeto Conceitual de Robô Bípede**. 2020. 61 f. Monografia (Graduado em Engenharia Mecânica). Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

BRASIL, M. M. **Robô bípede com dez juntas atuadas em equilíbrio estático**. 2017. 47 p. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

CHEVALLEREAU, Christine; GRIZZLE, Jessy W.; SHIH, Ching-Long. **Asymptotically stable walking of a five-link underactuated 3-D bipedal robot**. IEEE transactions on robotics, v. 25, n. 1, p. 37-50, 2009.

DA SILVA, Alysson; MACHADO, Alexei. **Robôs bípedes-Design e controle utilizando trajetórias paramétricas e arquitetura amórfica**. In: Anais do XXXIV Concurso de Trabalhos de Iniciação Científica da SBC. SBC, 2015. p. 91-100.

DA SILVA, Filipe Miguel Teixeira Pereira. **Análise dinâmica e controlo de sistemas robóticos de locomoção bípede**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade do Porto

DE WAARD, Maarten; INJA, Maarten; VISSER, Arnoud. **Analysis of flat terrain for the atlas robot**. In: 2013 3rd Joint Conference of AI & Robotics and 5th RoboCup Iran Open International Symposium. IEEE, 2013. p. 1-6.

DOUAT, Luiz Ricardo et al. **Estabilização do caminhar de um robô bípede de 5 elos com compensação do movimento dorsal**. 2008.

DYNAMICS, Boston. Atlas **The World's Most Dynamic Humanoid**. Disponível em: <<https://ozrobotics.com/the-worlds-most-dynamic-humanoid-robot-by-boston-dynamics/>> . Acesso em: 11 jul. 2021.

FABISCH, A; PETZOLDT, C; OTTO, M; KIRCHNER, F. A Survey of Behavior Learning Applications in Robotics -- State of the Art and Perspectives. 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1906.01868>. Acesso em: 15 Nov. 2020.

FIGUEROA, A L. **Modelagem e otimização por algoritmos genéticos de padrões de marcha quase-estática de robôs bípedes planos** 12/09/2016 127 f. Mestrado em ENGENHARIA MECÂNICA Instituição de Ensino: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro Biblioteca Depositária: Divisão de Bibliotecas e Documentação

FORESTI, H. B. **Desenvolvimento de um Robo Bipede Autonomo**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco.

FU, K. S.; GONZALEZ, R. C.; LEE, C. S. G. **Robotics Control, Sensing, Vision and**

GARCIA, Elena et al. **The evolution of robotics research**. IEEE Robotics & Automation Magazine, v. 14, n. 1, p. 90-103, 2007.

GONÇALVES, J. B., **Desenvolvimento de um Sistema de Controle Adaptativo e Integrado para Locomoção de um Robô com Tronco**. Tese de Doutorado, FEM – UNICAMP. 2004.

GRIZZLE, Jessy W.; CHEVALLEREAU, Christine; SHIH, Ching-Long. **HZD-based control of a five-link underactuated 3d bipedal robot**. In: 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2008. p. 5206-5213.

GUIZZO, E. **Hubo II Humanoid Robot Is Lighter and Faster, Makes His Creator Proud**. Disponível em: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/033010-hubo-ii-90-humanoid-robot-is-lighter-and-faster> . Acesso em: 11 jul. 2021.

HIRAI, Kazuo et al. **The development of Honda humanoid robot**. In: Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146). IEEE, 1998. p. 1321-1326.

HONDA INC. **Asimo - History of Humanoids**. [S.l.], 2006. Web. Disponível em: <http://world.honda.com/ASIMO/history/history.html>. Acesso em Nov, 2020.

Humanoid Robot HRP-4. Disponível em: <http://global.kawada.jp/mechatronics/hrp4.html> . Acesso em: 11 jul. 2021.

HURMUZLU, Yildirim; GÉNOT, Frank; BROGLIATO, Bernard. **Modeling, stability and control of biped robots**—a general framework. Automatica, v. 40, n. 10, p. 1647-1664, 2004.

Intelligence. 2th. ed. [S.l.]: McGrawHill, 1987.

KAJITA, S. et al. The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A Simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation. IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, v. 1, n. 4, 2001. **Proceedings** p. 239–246.

KUMAR, Ashwin Sushil et al. **Design and fabrication of bipedal robot**. In: Fifth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT). IEEE, 2014. p. 1-6.

MITOBE, K.; SATOH, M.; CAPI, G. **A ZMP control of a powered passive dynamic walking robot**. In: 2010 World Automation Congress. IEEE, 2010. p. 1-7.

MIYADAIRA, Alberto Noboru. **Desenvolvimento, construção e controle de um robô móvel bípede com tronco**. 2011. 103 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/259581>>. Acesso em: 17 ago. 2021

MOUSSA, S. FUNDAMENTOS DE BIOMECANICA: APLICAÇÕES DA MECATRONICA NO CORPO HUMANO. [S.l.]: MOUSSA SALEN SIMHON, 2013.

NOH, Kyung-Kon; KIM, Jin-Geol; HUH, Uk-Youl. **Stability experiment of a biped walking robot with inverted pendulum**. In: 30th annual conference of IEEE industrial electronics society, 2004. IECON 2004. IEEE, 2004. p. 2475-2479.

OKUMURA, Yu et al. **Realtime ZMP compensation for biped walking robot using adaptive inertia force control**. In: Proceedings 2003 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS 2003)(cat. No. 03CH37453). IEEE, 2003. p. 335-339.

OSUKA, Koichi; SUGIMOTO, Yasuhiro. **Stabilization of quasi-passive-dynamic-walking based on delayed feedback control**. In: 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002. IEEE, 2002. p. 803-808.

PRADO, E. D., **Sistema de Controle para Bípede Microcontrolado**; 2015; Trabalho de Conclusão de Curso; (Graduação em Ciência da Computação) - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul.

ROBOTIS. **DYNAMIXEL**. Disponível em: <<http://www.robotis.us/dynamixel/>>. Acesso em: 11 jul. 2021.

SAKAGAMI, Yoshiaki et al. **The intelligent ASIMO: System overview and integration**. In: IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. IEEE, 2002. p. 2478-2483.

SANTANA, R. E. S. **Projeto de um robô bípede para a reprodução da marcha humana**. 2005. 188p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SENTIS, L. **Synthesis and control of whole-body behaviors in humanoid systems**. Tese (Doutorado), Stanford, CA, USA, 2007.

SHIH, Ching-Long; GRIZZLE, J. W.; CHEVALLEREAU, C. **Asymptotically stable walking of a simple underactuated 3D bipedal robot**. In: IECON 2007-33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2007. p. 2766-2771.

SICILIANO, Bruno et al. **Robotics: modelling, planning and control**. Springer Science & Business Media, 2010.

STEPHANIE, A et al. **EDROM Humanoid Teen Size 2018**. Team Description Paper for Robocup Humanoid 2018.

TORRES, S. O. A. **Avaliação de Protótipo Mecatrônico de Locomoção Bípede**. 2006. 111p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Toscano, Gustavo Sobral. **ANÁLISE CINEMÁTICA E GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS ESTÁVEIS PARA UM ROBÔ BÍPEDE ANTROPOMÓRFICO'** 01/09/2011 121 f. Mestrado em ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS Instituição de Ensino: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, FLORIANÓPOLIS Biblioteca Depositária: Biblioteca da Universidade Federal de Santa Catarina

VENÂNCIO, M. M. **Desenvolvimento de Técnicas de Estabilização de Caminhada para Robô Humanoide com Detecção de Diferentes Tipos de Terrenos**. 2018. 132 f., **Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica)** - Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

VENÂNCIO, M. M. **Estudo e Simulação de Geração de Trajetórias do Caminhar de um Robô Humanoide Utilizando o Método do Pêndulo Invertido Linear**. 2016. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

VUKOBRATOVIĆ, M.; BOROVIAC, B. Zero-Moment Point — Thirty Five Years of Its Life. **International Journal of Humanoid Robotics**, v. 01, n. 01, p. 157–173, 2004.

WESTERVELT, E. R. et al. **Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion**. [S.l.]: CRC Press, 2007.

ZHU, Meiqiang et al. **Static Gait Analysis and Planning of Biped Robot**. In: 2011 Seventh International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. IEEE, 2011. p. 113-116.