

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado-Doutorado

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR INTELIGENTE EM
SISTEMA EMBARCADO PARA CONTROLE DINÂMICO DE
VEÍCULO ELÉTRICO DE DUAS RODAS**

por

Gênnisson Batista Carneiro

*Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do Grau de Mestre*

GÊNNISSON BATISTA CARNEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR INTELIGENTE EM
SISTEMA EMBARCADO PARA CONTROLE DINÂMICO DE
VEÍCULO ELÉTRICO DE DUAS RODAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. Simplicio Arnaud da Silva

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C289d Carneiro, Gênnisson Batista.

Desenvolvimento de um controlador inteligente em sistema embarcado para controle dinâmico de veículo elétrico de duas rodas / Gênnisson Batista Carneiro. - João Pessoa, 2021.

84 f. : il.

Orientação: Simplício Arnaud da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia mecânica. 2. Segway. 3. Lógica Fuzzy - controle. 4. Veículo elétrico - controlador inteligente. I. Silva, Simplício Arnaud da. II. Título.

UFPB/BC

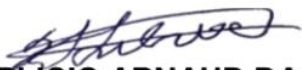
CDU 621(043)

DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR INTELIGENTE EM SISTEMA EMBARCADO PARA CONTROLE DINÂMICO DE VEÍCULO ELÉTRICO DE DUAS RODAS

por

GÊNNISSON BATISTA CARNEIRO

Dissertação aprovada em 23 de abril de 2021


Prof. Dr. SIMPLÍCIO ARNAUD DA SILVA
Orientador – UFPB


Prof. Dr. CICERO DA ROCHA SOUTO
Examinador Interno – UFPB


Prof. Dr. ISAAC SOARES DE FREITAS
Examinador Externo – UFPB

DEDICATÓRIA

Primeiro, a Deus toda honra e glória.

A minha esposa Roseane Araújo Pereira Carneiro, ao meu filho João Benjamin Pereira Carneiro, aos meus pais Genival Vieira Carneiro e Dilma Soares Batista, as minhas irmãs Gabrieli e Danielli e toda minha família, pelo tempo que deixamos de estar juntos...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e toda saúde para tornar possível aos meus familiares, amigos, colegas de curso e professores que contribuíram direta ou indiretamente na minha caminhada.

Ao professor Simplício Arnaud da Silva e Cícero Rocha Souto pelas orientações, disponibilidade, paciência e amizade durante realização deste trabalho.

Ao Professor Alexsandro José Virgínio dos Santos doações a este trabalho em forma de conselhos e componentes.

Ao Instituto Federal De Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte que possibilitou meu afastamento para conclusão deste trabalho.

Aos meus queridos amigos do LINC – Samuel, Diogo, Thalles, Rômulo, Gustavo e pelo companheirismo, amizade e ajuda sem a qual não conseguiria êxito neste trabalho.

Ao técnico de laboratório Sergio, que muito ajudou no desenvolvimento do protótipo.

Aos Professores desta Pós-Graduação que auxiliaram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR INTELIGENTE EM SISTEMA EMBARCADO PARA CONTROLE DINÂMICO DE VEÍCULO ELÉTRICO DE DUAS RODAS

RESUMO

A crescente necessidade de mobilidade em ambientes empresariais, com espaços e corredores reduzidos, tem levado as empresas ao desafio de proporcionar uma locomoção mais ágil para alguns funcionários para promover menor desgaste físico e consequentemente, aumento da produtividade. Para atender à essas necessidades do segmento de transporte pessoal, foi criado o Segway. O Segway é um sistema dinâmico, semelhante ao sistema de pêndulo invertido, formado basicamente por uma plataforma apoiada por duas rodas com um guidão. Este trabalho tem por objetivo implementar uma estratégia de controle baseado em Lógica Fuzzy, para comandar um protótipo tipo Segway para as diversas solicitações do usuário, mantendo a estabilidade dinâmica do veículo. O protótipo foi desenvolvido usando Raspberry, Arduino e outros componentes eletrônicos para controlar dois motores de corrente contínua mediante informações de um giroscópio MPU 6090. O controlador Fuzzy desenvolvido neste trabalho é do tipo PD Incremental. Foram realizados experimentos, com e sem usuário, com diversas manobras objetivando avaliar o comportamento do sistema de controle em relação ao equilíbrio e garantindo a manobrabilidade. Os resultados mostraram que o controlador Fuzzy foi capaz de transportar, satisfatoriamente, um usuário de 90kg conservando o equilíbrio do mesmo durante diferentes manobras.

Palavras chaves – Controle, Segway, Lógica Fuzzy.

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT CONTROLLER IN A BOARDED SYSTEM FOR DYNAMIC CONTROL OF TWO-WHEEL ELECTRIC VEHICLE

ABSTRACT

The growing need for mobility in business environments, with reduced spaces and corridors, has led companies to the challenge of providing more agile mobility for some employees to promote less physical wear and tear and, consequently, increase in productivity. To meet these needs in the personal transport segment, the Segway was created. The Segway is a dynamic system, similar to the inverted pendulum system, basically formed by a platform supported by two wheels with a handlebar. This work aims to implement a control strategy based on Fuzzy Logic, to command a Segway-type prototype for the different requests of the user, maintaining the dynamic stability of the vehicle. The prototype was developed using Raspberry, Arduino and other electronic components to control two direct current motors using information from an MPU 6090 gyroscope. The Fuzzy controller developed in this work is of the PD Incremental type. Experiments were carried out, with and without user, with several maneuvers in order to evaluate the behavior of the control system in relation to balance and ensuring maneuverability. The results showed that the Fuzzy controller was able to satisfactorily transport a 90kg user while maintaining his balance during different maneuvers.

Keywords – Control, Segway, Fuzzy Logic.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	V
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GERAL	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.2.3 MOTIVAÇÃO	3
1.2.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO II	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS DE MOBILIDADE PESSOAL (VEMP)	4
2.2 PENDULO INVERTIDO DE DUAS RODAS	8
2.3 LÓGICA FUZZY	12
CAPÍTULO III	16
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 INTRODUÇÃO	16
3.2 SEGWAY	17
3.3 LÓGICA FUZZY	19
3.3.1 Conjuntos Fuzzy	21
3.3.2 Variáveis linguísticas	21
3.3.3 Funções de Pertinência Fuzzy	22
3.3.4 Fuzzificação	23
3.3.5 Sistema de inferência	23
3.3.6 Defuzzificação	25

3.4	CONCLUSÕES	25
CAPÍTULO IV		27
MATERIAIS E MÉTODOS.....		27
4.1	INTRODUÇÃO	27
4.2	MATERIAL UTILIZADO.....	29
4.2.1	MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	29
4.2.2	PLACA ARDUINO UNO	30
4.2.3	RASPIBERRY PI 3 MODELO B	31
4.2.4	GIROSCÓPIO MPU 6050	32
4.2.5	PONTE H BTS 7960	32
4.2.6	CIRCUITO DIGITAL DE ACIONAMENTO DA PONTE	33
4.2.7	ENCODER DE VELOCIDADE	34
4.2.8	REGULADOR DE TENSÃO.....	35
4.2.9	BATERIA.....	36
4.3	DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO.....	37
4.4	CONCLUSÕES	38
CAPÍTULO V		39
PROJETO DO CONTROLADOR FUZZY		39
5.1	INTRODUÇÃO	39
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA.....	40
5.3	PROJETO DO CONTROLADOR.....	41
5.4	FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR	48
5.5	CONCLUSÕES	49
CAPÍTULO VI		50
RESULTADOS EXPERIMENTAIS		50
6.1	INTRODUÇÃO	50
6.2	EXPERIMENTO COM SISTEMA EM BALANÇO	51
6.3	EXPERIMENTO SEM O PESO DO USUÁRIO	53
6.4	EXPERIMENTO COM USUÁRIO SOBRE A PLATAFORMA	54
COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES		63
7.1	CONCLUSÃO.....	63
7.2	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	64
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....		65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Veículo móvel operado remotamente.....	5
Figura 2.2 – Veículo Elétrico EDWARD	5
Figura 2.3 – Veículo de Auto-Equilíbrio	6
Figura 2.4 – OminiRide 2	7
Figura 2.5 – Veículo elétrico Oteller	7
Figura 2.6 – Pêndulo invertido de duas rodas JOE.....	9
Figura 2.7 – Robô móvel para pesquisa e ensino	9
Figura 2.8 – Pêndulo invertido de duas rodas com PID auto ajustável	10
Figura 2.9 – Robô manipulador de duas rodas	10
Figura 2.10 – Pêndulo invertido de duas rodas.....	11
Figura 2.11 – Robô de duas rodas saltador com PID	11
Figura 2.12 – Transportador Pessoal Robótico auto-equilibrante	12
Figura 2.13 – Sistema robótico operado remotamente com Lógica Fuzzy	13
Figura 2.14 – Transportador humano sem guidão	13
Figura 2.15 – Pêndulo invertido de duas rodas com controle de ângulo e posição desacoplados.....	14
Figura 2.16 – Veículo elétrico controlado por lógica fuzzy	15
Figura 2.17 – Robô pêndulo invertido controlado por lógica fuzzy.....	15
Figura 3.1 Transportador humano Segway.....	17
Figura 3.2 Segway com guidão entre os joelhos	18
Figura 3.3 – Esquema básico do controlador Fuzzy	20
Figura 3.4 – Funções de pertinência	22
Figura 4.1 - Plataforma de testes	27
Figura 4.2 - Protótipo Segway	28
Figura 4.3 - Protótipo do veículo com o usuário	29
Figura 4.4 – Motor NPC – T74.....	30

Figura 4.5 – Arduino Uno.....	31
Figura 4.6 – Raspiberry PI 3 Modelo B.....	32
Figura 4.7 – MPU 6050	32
Figura 4.8 – Ponte H BTS 7960.....	33
Figura 4.9 – Circuito digital de acionamento da ponte H.....	34
Figura 4.10 – Encoder de velocidade	34
Figura 4.11 – Regulador de tensão CC-CC	35
Figura 4.12– Componentes do Veículo	36
Figura 4.13– Modelo de bateria utilizado para alimentar o sistema.....	36
Figura 4.14 – Lay-out básico dos componentes do sistema	37
Figura 5.1 – Ângulo do Segway	40
Figura 5.2 – Diagrama de blocos da estratégia de controle	41
Figura 5.3 – Variável de controle - <i>erro</i>	43
Figura 5.4 – Variável de controle – variação do erro (<i>derro</i>).....	44
Figura 5.5 – Variável de controle de saída – <i>pwmout</i>	45
Figura 5.6 – Controlador compensando descarga da bateria	47
Figura 6.1 – Gráfico de controle de rotação para 10 e 20 rpm.	51
Figura 6.2 – Gráfico de controle da rotação dos motores para uma excitação degrau escalonado.	53
Figura 6.3 –Gráfico do controle de rotação para veículo sem usuário	54
Figura 6.4 – Veículo em uso nos ambientes a) com espaço reduzido e b) com espaço amplo	55
Figura 6.5 – Gráfico do controle de movimentação para frente e para trás da Roda esquerda.....	56
Figura 6.6 – Gráfico do controle de movimentação para frente e para trás da Roda direita	57
Figura 6.7 – Gráfico de controle de movimentação para frente e para trás ambas rodas	58
Figura 6.8 – Movimento de giro em torno do próprio eixo	59
Figura 6.9 – Gráfico de controle de giro em torno do próprio eixo.....	59
Figura 6.10 – Percurso executado pelo veículo no experimento 6	60
Figura 6.11 – Gráfico de comportamento do veículo no percurso do experimento 6	61

Figura 6.12 – Gráfico de controle da roda esquerda no percurso	62
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Valores da variável de controle <i>erro</i>	42
Tabela 5.2 – Valores da variável de controle variação do erro	43
Tabela 5.3 – Valores da variável de controle de saída – <i>pwmout</i>	45
Tabela 5.4 – Base de Regras do controlador Fuzzy	46

LISTA DE SÍMBOLOS

C++	Linguagem computacional
CC	Corrente contínua
DAQ	Módulo de aquisição de dados
DERRO	Variável de entrada do controle Fuzzy referente a variação do erro
DSP	Processador de Sinal Digital
EDWARD	Veículo elétrico de duas rodas com amortecimento rotacional ativo
ERRO	Variável de entrada do controle Fuzzy referente ao erro
IDEAL	Função de pertinência do controlador Fuzzy
LINC	Laboratório de Instrumentação e Controle
LQR	Controlador Regulador Linear Quadrático
NEGMED	Função de pertinência do controlador Fuzzy
NEGPEQ	Função de pertinência do controlador Fuzzy
PC	Computador pessoal
PD	Controlador proporcional derivativo
PIC	Microcontrolador Controlador de Interface Periférica
PID	Controlador proporcional, integral e derivativo
PMWe	Saída do controlador para roda esquerda
POSMED	Função de pertinência do controlador Fuzzy
POSPEQ	Função de pertinência do controlador Fuzzy
PWM	Modulação por largura de pulso
PWMd	Saída do controlador para roda direita
PWMOUT	Variável de saída do controle Fuzzy referente ao incremento de pwm
Ref ω_d	Valor de referência gerado para roda 2
Ref ω_e	Valor de referência gerado para roda esquerda
RPM	Rotações por minuto
USB	Porta Serial Universal

VEMP	Veículo elétrico de mobilidade pessoal
α	Ângulo de inclinação do guidão
θ	Ângulo de inclinação da plataforma
ω_d	Valor de rotação referente a roda direita
ω_e	Valor de rotação referente a roda esquerda

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Atualmente observamos a crescente necessidade de mobilidade em diversos ambientes, sejam empresariais, com espaços e corredores reduzidos, ou em ambientes de mais abertos como praças e praias. Essa demanda tem levado empresas ao desafio de proporcionar uma locomoção mais ágil para seus funcionários para promover menor desgaste físico e, conseqüentemente, aumento da produtividade. Tal problema tem incentivado o uso de veículos elétricos de alta manobrabilidade, que facilitam o estacionamento e locomoção dos usuários sem emissão de gases poluentes, que em ambientes fechados, causariam danos à saúde. Atendendo as necessidades do segmento de mercado no transporte pessoal, foi criado o Segway. O Segway é um sistema dinâmico semelhante ao sistema do pêndulo invertido que, como mostra diversas literaturas, possui dinâmica incerta (ARNOLDO, 2012).

Segundo KIM *et al.* (2016), tem aumentado a demanda por veículos elétricos compactos de pequeno porte para viagens de curta distância, em áreas urbanas. KAMATA *et al.* (2006), afirma que a demanda por veículos elétricos de único passageiro, tem aumentado comprovando esta nova tendência no mercado de transporte pessoal.

O Segway é constituído basicamente por uma plataforma horizontal onde fica o piloto, e duas rodas laterais acionada por motores elétricos. Possui ainda um guidão vertical para controle. O objetivo principal do controle é manter o equilíbrio vertical do piloto, ou seja, posição horizontal da plataforma, de modo a impedir um acidente (BABAZADEH *et al.*, 2016). O objetivo secundário do controle é atender as solicitações do piloto de velocidade, frente e trás, como de direção, direita e esquerda. NAKAGAWA *et al.* (2009)

afirma que um veículo de mobilidade pessoal deve possuir as características de se mover em baixa velocidade, com elevada manobrabilidade e tamanho reduzido para que possa ser usado em espaços onde já transitam pedestres para que seja um meio de transporte prático e ambientalmente amigável.

Este trabalho tem por objetivo implementar um controlador inteligente baseado em Lógica Fuzzy, em sistemas embarcados tipo Arduino e Raspberry, para comandar um conjunto formado por dois motores de corrente contínua através de modulação PWM (*pulse with modulation*) e interface de potência, controlando as velocidades dos mesmos de forma independente, para as diversas solicitações do usuário, fazendo o controle da estabilidade dinâmica do veículo para condições não ideais que possam surgir durante o uso normal, garantindo a segurança do piloto. Utilizou-se também sensor do tipo giroscópio, MPU-6050, para fornecer ao controlador as informações de equilíbrio do sistema bem como as solicitações de direção feitas pelo usuário.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo implementar um controlador inteligente baseado em Lógica Fuzzy, para comandar um protótipo Segway para as diversas solicitações do usuário, fazendo o controle da estabilidade dinâmica do veículo para condições não ideais que possam surgir durante o uso normal, garantindo a segurança do piloto.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Promover a instrumentação embarcada do protótipo Segway;
- Elaborar estratégia de controle capaz de atender as diversas solicitações do usuário;
- Verificar a resposta do controlador a demandas sem carga;
- Verificar a resposta do controlador a demandas com operador;

1.2.3 MOTIVAÇÃO

Na literatura observa-se que o sistema de pêndulo invertido tem sido muito usado para testar robustez de controladores ou promover sistemas robóticos reduzidos de auto equilíbrio, porém sem o objetivo de transportar cargas ou pessoas.

O sistema de pêndulo invertido tipo Segway possui dinâmica complexa e de difícil modelagem tornando-se um excelente objeto de estudo para testar as características do controlador Fuzzy.

Esta pesquisa visa contribuir com a proposição de uma estratégia de controle e um arranjo de componentes eletrônicos que possibilite ser embarcado e capaz de controlar o sistema de forma robusta garantindo a estabilidade dinâmica do veículo para condições não ideais que possam surgir durante o uso normal e para diversos tipos de usuários.

1.2.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme apresentado a seguir:

No capítulo II apresenta-se uma revisão bibliográfica dos principais estudos produzidos com relação ao tema do trabalho, mostrando as concepções de veículos elétricos e as tecnologias empregadas.

No capítulo III é realizada a fundamentação teórica, onde se discute os principais conceitos necessários ao entendimento do trabalho. Discute-se a Lógica Fuzzy apontando as principais características e os motivos para sua utilização neste trabalho.

No capítulo IV é descrito o funcionamento do sistema, apontando os componentes que formam o protótipo e como eles se relacionam.

No Capítulo V é apresentado o projeto do controlador Fuzzy, apresentando as variáveis de entrada e de saída, bem como a estratégia de controle adotada no trabalho.

No capítulo VI são apresentados os resultados dos experimentos, apontando as atuações do controlador, nos diversos tipos de testes realizados.

No capítulo VII são apresentados os comentários finais e as conclusões do estudo, bem como algumas sugestões para impulsionar novos trabalhos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS DE MOBILIDADE PESSOAL (VEMP)

O desenvolvimento de uma mobilidade urbana sustentável onde há uma relação saudável entre o ser humano e o meio ambiente tornou-se parte fundamental da vida cotidiana. Visando este conceito, vários veículos elétricos de mobilidade pessoal têm sido desenvolvidos tentando atender as características de ser um transporte eficiente, confortável, de curto alcance e que possam transitar em harmonia com os pedestres (NAKAGAWA, 2010). Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica dos trabalhos mais recentes e relevantes da área de veículos elétricos de mobilidade pessoal (VEMP) mostrando as principais características de cada veículo desenvolvido.

LI (2007), desenvolveu um veículo de duas rodas tipo pêndulo invertido com o objetivo de transportar pessoas e outros bens. O VEMP possui as características mecânicas de ser pequeno, leve, com acionamento diferencial das rodas para possibilitar alta manobrabilidade. Este robô foi instrumentado com giroscópio de taxa TGF-160D e um acelerômetro TA-25 para medição do ângulo e velocidade angular da base onde fica o usuário, além de codificadores para medir a rotação das rodas.

O veículo é operado remotamente, ou seja, os comandos para ir para frente e para trás, por exemplo, são realizados através de um computador. A técnica de controle utilizada no projeto foi do tipo PID e o mesmo conseguiu manter o equilíbrio com oscilações de 2° da inclinação de referência da plataforma e com velocidades de 5 km/h com experimentos de passar por obstáculo e subir um auge de 15°. Na Figura 2.1 é mostrado o veículo desenvolvido e a tela de operação.



Figura 2.1 – Veículo móvel operado remotamente

Fonte: LI, 2007

Em 2009 estudantes de Engenharia Mecânica da Universidade de Adelaide, Austrália iniciaram o projeto e a construção de um veículo elétrico denominado de E.D.W.A.R.D. (Electric DiWheel with Active Rotation Damping). O veículo consiste em duas grandes rodas externas que abrange completamente a parte interna do veículo onde se localiza o passageiro. A parte interna gira livre dentro das rodas e é suportada por polias apoiadas nas rodas externas. O acionamento se dá por meio de motores CC que acionam uma roda menor acoplada na parte interna da roda externa possibilitando a movimentação do veículo controlado via *joystick* e lógica Fuzzy. O Controlador Fuzzy aplicado, trabalha com duas entradas produzidas pelo acelerômetro e giroscópio produzindo uma saída de controle, -48 V à 48 V, para acionamento dos motores. Observando a estrutura do veículo mostrada na Figura 2.2 pode-se ver que o mesmo não foi projetado para transitar em pequenos espaços.



Figura 2.2 – Veículo Elétrico EDWARD

Fonte: CAZZOLATO *et al.*, 2011

TSAI *et al.* (2010) desenvolveram um veículo de auto-equilíbrio de duas rodas (Figura 2.3). O sistema usa um único chip DSP TMS320LF2407 da *Texas Instruments* como controlador principal onde foi desenvolvido dois controles com base em rede neural adaptativa de base radial para os controles de equilíbrio e movimento de guinada desejado. Os controladores demonstraram ser úteis e eficazes para controlar e dirigir o veículo em baixa velocidade. Na instrumentação do projeto foram utilizados um potenciômetro para determinar as solicitações do operador no guidão e um giroscópio junto com um sensor de inclinação para detectar a posição da plataforma.



Figura 2.3 – Veículo de Auto-Equilíbrio
Fonte: TSAI *et al.*, 2010

TASUKU *et al.* (2016) desenvolveram um veículo elétrico de mobilidade pessoal de uma única roda esférica denominado OmniRide 2 (Figura 2.4); ele é semelhante a uma bicicleta e pesa cerca de 35 kg. A roda esférica é acionada por quatro rodas unidirecionais, onde através de um controlador de linearização parcial do *feedback*, o veículo promove estabilidade mecânica em todas as direções e pode ser movido em todas as direções, em contraste dos veículos de duas rodas. O veículo é testado com um operador humano que para guiar o veículo precisa apenas inclinar o corpo na direção desejada com auxílio do guidão. A inclinação do corpo é medida por uma unidade de medição inercial de 3 eixos AU7428N2100, onde todo processamento é feito por um PC/mini-TIX(Geode LX800).



Figura 2.4 – OminiRide 2
Fonte: TASUKU *et al.*, 2016

Os VEMP (Veículos Elétricos de Mobilidade Pessoal) têm atraído muita atenção pelo seu desempenho e por atender as necessidades de locomoção pessoal, no entanto, os custos associados a este tipo de equipamento tem dificultado a aquisição destes veículos. Observando isso, SAKATA *et al.* (2017) propôs um veículo com 3 rodas sendo duas para manter o equilíbrio e uma para tracionar o sistema chamado Oteller (Figura 2.5). O acionamento de apenas uma roda sem necessidade de controle de equilíbrio reduz os custos com sensores e motores. O operador controla a velocidade através de um manete colocado na parte superior com o auxílio de um controlador PD; e a movimentação do corpo do usuário possibilita o direcionamento para direita ou esquerda. O veículo atinge uma velocidade máxima de 6 km/h e os testes foram realizados com usuário de aproximadamente 71 kg.

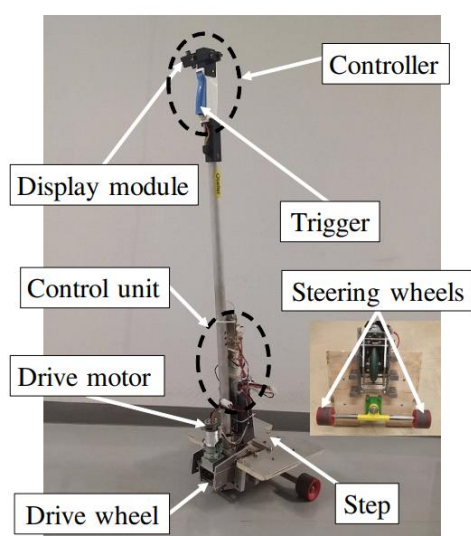


Figura 2.5 – Veículo elétrico Oteller
Fonte: SAKATA *et al.*, 2017

Como estes veículos não possuem autonomia para atender a demanda de deslocamento casa-trabalho, SAKATA (2019), aprimorou o Oteller para que ele pudesse ser um VEMP dobrável, sendo assim facilmente transportado em ônibus ou metrô. No modo de operação normal o veículo possui as dimensões de 40 cm de largura, 50 cm de profundidade máxima e 139 cm de altura máxima, no modo dobrado possui 40 cm de largura, 33 cm de profundidade máxima e 63 cm de altura pesando 7,8 kg.

2.2 PENDULO INVERTIDO DE DUAS RODAS

Segundo ARNOLDO (2012), o Segway é um sistema dinâmico que é comumente chamado de pêndulo invertido por possuírem dinâmicas semelhantes. As diferenças estão que na dinâmica do Segway os condutores formam um pêndulo invertido mais complexo de dinâmica incerta e variável no tempo enquanto que nos sistemas de pêndulo invertido o condutor é modelado como um corpo rígido. O pêndulo invertido é um problema clássico utilizado em sistemas de controle (AZIZAN *et al.*, 2010).

A forma mais comum de pêndulo invertido consiste em uma haste de massa desprezível fixada em uma plataforma que se move horizontalmente. A fixação da haste através de um pino que permite a mesma um movimento rotacional.

Já no pêndulo invertido de duas rodas a plataforma é fixada em duas rodas, montadas uma de cada lado, que giram independente, possibilitando fazer curvas e movimentos fora de um único eixo, apresentando oscilação do centro de massa em torno da posição de equilíbrio, possuindo como objetivo dos controladores desse tipo de sistema, a minimização do ângulo de inclinação bem como o controle de deslocamento do veículo (PEREIRA, 2017). REN *et al.* (2009) afirma que o controle de movimento de um pêndulo invertido de duas rodas é mais complexo que o controle do equilíbrio pois existe relações entre a velocidade de deslocamento e a inclinação que são difíceis de modificar.

Nas últimas décadas, o pêndulo invertido tem sido frequentemente utilizado para verificar a eficácia das estratégias e técnicas de controle devido à sua não-linearidade inerente e instabilidade (ASTROM e FURUTA, 2000).

GRASSER (2002) desenvolveu no Instituto Federal de Tecnologia de Lausanne da Suíça, um pêndulo invertido de duas rodas denominado JOE, Figura 2.6, medindo 65 cm com 12 kg com velocidade máxima de 1,5 m/s. O JOE é composto por dois controladores de espaço de estados desacoplados, que controla as rodas separadamente com o intuito de

manter o sistema em equilíbrio. O controlador foi colocado em uma placa de processamento de sinal digital (DSP) e as baterias são posicionadas na barra de modo a simular um operador.



Figura 2.6 – Pêndulo invertido de duas rodas JOE
Fonte: GRASSER, 2002

NAWAWI et al. (2007) desenvolveu um veículo de duas rodas baseado em pêndulo invertido para fins de pesquisa e ensino na Universidade de Tecnologia da Malásia. O protótipo montado, mostrado na Figura 2.7, utiliza como estratégia de controle a realocação de polos baseada em LQR implementado em um DSP. O veículo é instrumentado por giroscópio e acelerômetro e encoder de velocidade.

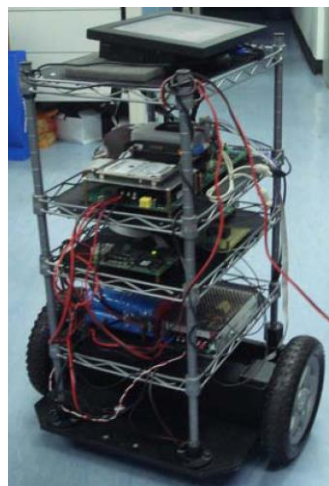


Figura 2.7 – Robô móvel para pesquisa e ensino
Fonte: NAWAWI, 2007

REN *et al.* (2008) construiu um veículo de duas rodas tipo pêndulo invertido controlado por um PID com parâmetros ajustados automaticamente para superar os distúrbios e variações causados pela não-linearidade do sistema. O protótipo, Figura 2.8, foi instrumentado com sensor de medição de ângulo, medidor de rotação, onde o controlador foi implementado em um DSP.



Figura 2.8 – Pêndulo invertido de duas rodas com PID auto ajustável
Fonte: REN *et al.* (2008)

HA *et al.* propôs um robô manipulador de duas rodas conforme mostrado na Figura 2.9 . O robô possui um sistema de visão com duas câmeras e um sistema manipulador com dois braços. No entanto o trabalho focou apenas no controle do equilíbrio do robô por meio de um modelo de controle preditivo.

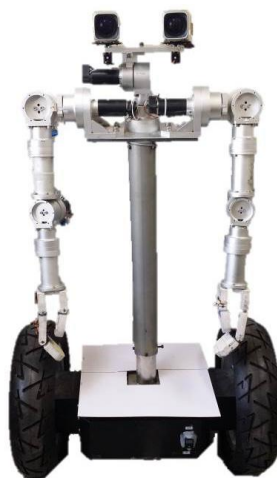


Figura 2.9 – Robô manipulador de duas rodas
Fonte: HA *et al.* (2015)

PEREIRA (2017), propôs a modelagem e o controle de um veículo de duas rodas do tipo pêndulo invertido, sem tripulante (Figura 2.10). O autor utilizou um controlador neuro-fuzzy com evolução diferencial para dar equilíbrio estático ao veículo. O veículo é composto por um conjunto de baterias, dois motores CC, instrumentado com IMU MPU6050 e controlado com Arduino Due que aciona os motores pelo driver L298N. O controlador apresentou grande capacidade de adaptação às restrições impostas à planta, garantindo assim estabilidade estática e a eficiência energética do sistema.



Figura 2.10 – Pêndulo invertido de duas rodas
Fonte: PEREIRA, 2017

ZHANG *et al.* (2018) propuseram um robô de duas rodas tipo pêndulo invertido de rodas saltador, mostrado na Figura 2.11, com o intuito de superar as limitações de superar os obstáculos que um pêndulo invertido de duas rodas comum teria. O salto é gerado por meio de um mecanismo de quatro barras que também auxilia no controle do equilíbrio.

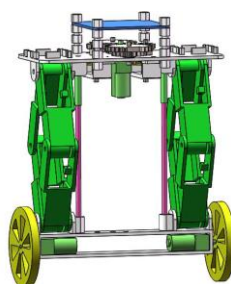


Figura 2.11 – Robô de duas rodas saltador com PID
Fonte: ZHANG *et al.*, 2018

O robô possui aproximadamente 170 mm de altura e 132 mm de largura é instrumentado com um sensor de deslocamento angular, MPU 6050, e com micro controlador STM32 onde um controlador do tipo PID ajustável controla a rotação dos

motores de corrente contínua das rodas para alcançar o equilíbrio do robô. A média de altura dos saltos é de 120 mm.

2.3 LÓGICA FUZZY

Nesta parte da revisão bibliográfica são mostrados os trabalhos sobre veículos elétricos que tenham como técnica de controle a Lógica Fuzzy. Esses veículos poderão ter configurações diversas das que forma mostradas até aqui. Eles também podem ter o objetivo de ser um transportador humano ou não. Nesta seção da revisão bibliográfica é mostrado como a Lógica Fuzzy foi aplicada com sucesso em diversos veículos elétricos.

MAMANI (2010) construiu um VEMP denominado de transportador pessoal robótico auto-equilibrante também com rodas paralelas que funciona a partir do equilíbrio do indivíduo que o utiliza, assemelhando-se ao funcionamento do clássico pêndulo invertido. Ele utilizou um acelerômetro e um girômetro para medir a velocidade de variação da inclinação e um potenciômetro deslizante no guidão para enviar os sinais de mudança de direção. Ele desenvolveu e comparou os resultados de controles PID, Fuzzy e Robusto, mostrando que os controles Fuzzy e Robusto possuem melhores resultados em relação ao PID devido a não-linearidade do sistema e que para o PID apresentar bons resultados seus parâmetros (ganhos) teriam que ser reajustados em tempo real. Na Figura 2.12 mostra-se o veículo desenvolvido.



Figura 2.12 – Transportador Pessoal Robótico auto-equilibrante
Fonte: MAMANI, 2010

SILVEIRA (2012), desenvolveu um sistema robótico operado remotamente via dispositivo *android* para aplicações em de detecção nuclear. O sistema é dotado de inteligência por meio de um controlador baseado em lógica Fuzzy para correção do centro de gravidade do veículo através do ajuste de três conjunto de suspensões, possibilitando que o mesmo se locomova em diversos terrenos e passe por diversos obstáculos. Na Figura 2.13 mostra-se o sistema robótico desenvolvido sendo experimentado na passagem por um obstáculo.



Figura 2.13 – Sistema robótico operado remotamente com Lógica Fuzzy
Fonte: SILVEIRA, 2012

CHIU e CHANG (2014) propuseram um transportador humano elétrico de duas rodas sem guidão para áreas urbanas controlados por Lógica Fuzzy, mostrado na Figura 2.14 , com inferência tipo Mandani em um microprocessador de baixo nível. Os resultados obtidos mostraram que o veículo conseguiu se mover de forma estável.

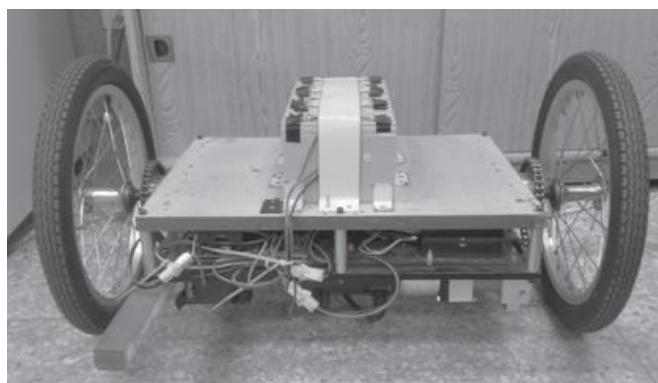


Figura 2.14 – Transportador humano sem guidão
Fonte: CHIU e CHANG, 2014.

O veículo é instrumentado com codificadores de rotação nas rodas e um giroscópio mede as variações de posição da plataforma provocadas pelo usuário; as informações são processadas por um microprocessador e, via modulação PWM, aciona os motores CC para equilibra-lo. Os ensaios foram realizados com um usuário de aproximadamente 85 kg e o veículo pesa 35 kg.

CHIU e PENG (2017) propuseram um pêndulo invertido de duas rodas, mostrado na Figura 2.15, com controle de ângulo e posição desacoplados e baseados em Lógica Fuzzy. O sistema funciona de forma a priorizar o controle de ângulo (o equilíbrio) e posteriormente conduzi-lo para a posição determinada. O controlador Fuzzy utiliza inferência do tipo Mandani e 5 funções de pertinência do tipo triangular para erro e variação do erro com funções de pertinência singleton na saída. O controlador mostrou-se eficaz nos resultados simulados e experimentais.

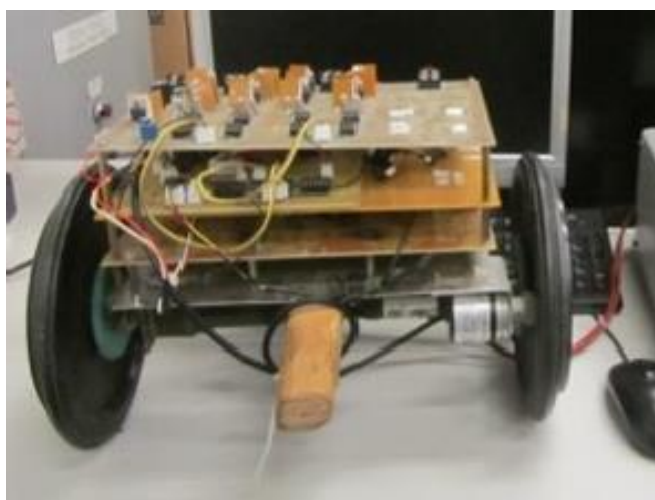


Figura 2.15 – Pêndulo invertido de duas rodas com controle de ângulo e posição desacoplados

Fonte: CHIU e PENG, 2017

ANJOS (2017) desenvolveu um veículo elétrico de duas rodas controlado por um sistema baseado em lógica fuzzy. O protótipo observado na Figura 2.16 possui as duas rodas acionadas de forma independente por dois motores de corrente contínua onde o sistema de controle foi implantado via LabView (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*) da National Instruments. A interface de Aquisição de dados foi feita por meio da DAQ 9174 e foi responsável pela captação das informações dos sensores e envio da variável de controle para a entrada analógica do Arduino Uno. Utilizou-se giroscópio/acelerômetro MPU-6050 para fornecer informações de ângulo da plataforma e

guidão. Foram realizados experimentos em bancada e sem usuário, com intuito de verificar a resposta do controlador para diferentes comandos.



Figura 2.16 – Veículo elétrico controlado por lógica fuzzy
Fonte: ANJOS, 2017

HUANG *et al.* (2018) desenvolveram um robô tipo pêndulo invertido de duas rodas controlado por Lógica Fuzzy. O robô foi modelado inserindo as incertezas inerentes ao sistema e distúrbios externos. Neste trabalho trabalhou-se dois tipos de inferência Fuzzy, Sugeno e Mandani. O robô mostrado na Figura 2.17, tinha como objetivo se locomover entre dois pontos por um caminho determinado mantendo o equilíbrio.

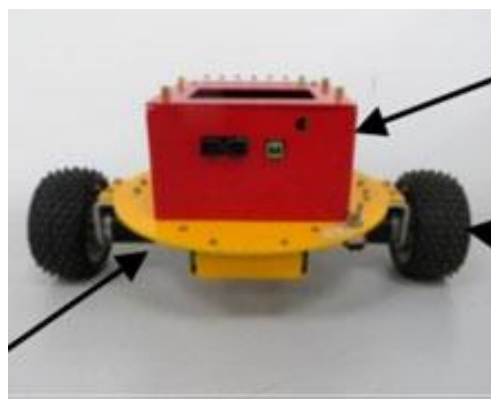


Figura 2.17 – Robô pêndulo invertido controlado por lógica fuzzy
Fonte: HUANG *et al.*, 2018

CAPÍTULO III

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho. É importante ressaltar que as informações apresentadas possuem a profundidade mínima para um bom entendimento do trabalho.

O controle automático tem exercido papel fundamental no avanço da ciência e engenharia (OGATA,2003). Segundo GOMES (2009), um sistema de controle é uma disposição de componentes físicos, conectados de tal forma a comandar, dirigir ou regular a si mesmo ou a outros sistemas. Observando os diversos dispositivos a nossa volta, podemos perceber o quão difundido tem sido o controle, desde um aparelho de ar condicionado até uma máquina-ferramenta com comando numérico computadorizado.

O controle pode ser manual ou automático sendo divididos, de acordo com sua malha, em malha aberta ou malha fechada. O controle em malha aberta utiliza um atuador para controlar o processo sem que o sinal de saída exerça ação no controle do sistema. Já o controle de malha fechada (retroalimentados) possui uma ação corretiva determinada a partir do comportamento do sinal de saída. OGATA (2003) enfatiza que em sistemas onde as entradas são conhecidas com antecedência e a planta isenta de distúrbios torna-se conveniente o controle em malha aberta.

Existem diversos tipos de controladores dentre os quais o *PID - Proporcional Integral Derivativo*, recebe maior destaque por ser amplamente utilizado em processos industriais por possuir bom desempenho em ampla faixa de condições de operação e pela simplicidade funcional (DORF e BISHOP, 2001). No entanto outras técnicas de controle

têm surgido para atender a demandas que o controlador PID não consegue atender satisfatoriamente como por exemplo Lógica Fuzzy, Redes Neurais, Algoritmo genético entre outros.

3.2 SEGWAY

O Segway original foi inventado por Dean Kamen da EUA e lançado em 2001. O Segway é um veículo elétrico de equilíbrio automático de transporte humano. É uma aplicação direta de um dos princípios mais importantes da teoria e prática do sistema de controle dinâmico moderno (DRAZ *et al.*, 2012).

O transportador pessoal Segway, mostrado na Figura na 3.1, é um veículo elétrico que transporta as pessoas em baixas velocidades, 20Km/h no máximo (ARNOLDO,2012). O Segway é um robô que funciona semelhante ao corpo humano. Se você inclinar seu corpo para frente durante a caminhada, você automaticamente dará um passo à frente para manter o equilíbrio. Se você se inclinar para trás, para manter o equilíbrio, você dará um passo para trás. Baseando-se nisso vários veículos forma desenvolvidos, quando o usuário se inclina para a frente ou para trás, as rodas são movidas na direção inclinada para manter o equilíbrio do sistema (AZIZAN *et al.*, 2010).



Figura 3.1 Transportador humano Segway

Fonte: ARNOLDO, 2012

Existem diversos tipos de Segway desde o que possui o guidão na altura das mãos como mostrado na Figura 3.1, como o apresentado na Figura 3.2, onde o guidão é posicionado entre os joelhos fazendo com que a locomoções sejam determinadas pela inclinação do corpo e o contato do joelho com a haste.



Figura 3.2 Segway com guidão entre os joelhos

Para o Segway mover-se para frente ou para trás, as duas rodas devem girar no mesmo sentido com a mesma velocidade, para realizar curvas as rodas devem girar em velocidades desiguais, de modo que o mesmo se desloque em forma de arco. O veículo possui a capacidade de girar em torno do próprio eixo, isso acontece quando as rodas giram em sentido contrário uma da outra. Este movimento é importante para manobrabilidade do veículo em espaços reduzidos.

Existem muitas pesquisas que desenvolvem algoritmos de controle para veículos de auto-equilíbrio tipo Segway com intuito de validá-los (CHANTARACHIT, 2019). Isso é devido ao dinâmica instável inerente de tais sistemas. A qualidade do controle de tais robôs é caracterizada pela capacidade de equilíbrio em suas duas rodas e locomoção ágil (GOHER *et al.*, 2011).

As características do Segway, o tornaram uma referência na literatura de controle na validação de controladores robustos assim, YOUNIS e ABDELATI (2009) desenvolveram um controlador PD para um protótipo de Segway equipado com motores CC e com microcontrolador PIC 16F877A para controlar o equilíbrio do veículo. CHANTARACHIT (2019) adaptou um segway comercial com intuito de testar um controlador de ganho LQR (Reulador Linear Quadrático).

De acordo com LI (2009), esforços têm sido feitos para o desenvolvimento de projetos de controle que garantam a estabilidade e robustez para pêndulos invertidos com rodas móveis, pois esses sistemas possuem dinâmica descrita por equações diferenciais não-

lineares. Devido essa complexidade é preciso ter um conhecimento razoavelmente preciso dos modelos dinâmicos para obter um bom desempenho no projeto dos controladores. Portanto, o projeto de controladores tradicionais baseados no modelo pode não ser a abordagem ideal, pois geralmente funciona melhor quando o modelo dinâmico é conhecido com grande precisão, sem falar que o sistema de pêndulo invertido com rodas possui incertezas paramétricas e funcionais além distúrbios externos variáveis no tempo que são difíceis de modelar, tornando mais difícil obter uma modelagem precisa.

PHAN *et al.* (2020) afirma que a lógica fuzzy é uma ferramenta de controle muito robusta e apropriada para trabalhar com medições imprecisas.

A lógica de controle Fuzzy consegue lidar igualmente com sistemas lineares e não - lineares, e sem precisar para isso, da modelagem matemática, podendo controlar sistemas complexos, com várias variáveis e ainda executar estratégias de tomada de decisão (JÚLIO, 2010). FU *et al.* (2020) afirma que o controle Fuzzy é bastante utilizado devido sua capacidade de controlar sistemas não lineares com equação da planta desconhecida.

SHEIBIA (2001) diz que a Lógica Fuzzy não precisa de modelagem matemática e sim de uma modelagem do conhecimento de um especialista, que através de termos linguísticos, descreve para o controlador o comportamento da planta, logo essa abordagem é o grande diferencial da Lógica Fuzzy em relação aos métodos tradicionais de controle.

3.3 LÓGICA FUZZY

A Lógica Fuzzy é uma técnica de controle que provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em uma forma compreensível pelos computadores. Assim, a tecnologia possibilitada pelo “enfoque fuzzy” tem um imenso valor prático, na qual se torna possível a inclusão da experiência de operadores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos (SHAW e SIMÕES, 2007). O Controle Fuzzy é capaz de inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações ambíguas e qualitativamente mal definidas de modo que os computadores podem processa-las (JÚLIO, 2010).

A lógica Fuzzy é frequentemente referida como “inteligente” pelo fato de emular a inteligência humana (tomada de decisões, expressões verbais...), se tornando importante componente na área da inteligência computacional (BEZERRA, 2009).

SHAW e SIMÕES (2007) mostram as vantagens de trabalhar com fuzzy:

- Incorpora nos sistemas de controle a forma humana de pensar, dotando estes de inteligência;
- Habilidade de modelar problemas complexos (não-linear);
- Modelagem mais fácil de sistemas especialistas.
- Traduz expressões verbais vagas e imprecisas (comunicação humana) em valores numéricos compreensíveis aos computadores
- Melhor manipulação das incertezas
- Complexidade reduzida

Os controladores fuzzy possuem as características de serem robustos, versáteis e de grande adaptabilidade. É possível implementar de um controlador Fuzzy, se conseguirmos traduzir o conhecimento usado pelo operador para controlar o sistema, em um conjunto de regras da forma SE e ENTÃO (BEZERRA, 2009).

Um controlador fuzzy é constituído basicamente pelos blocos de *Fuzzificação*, *Inferência fuzzy* e *Defuzzificação*. Na Figura 3.3 mostra-se como estão dispostos cada um destes blocos. Ao longo desta fundamentação teórica é dada maior profundidade sobre cada bloco deste controlador.

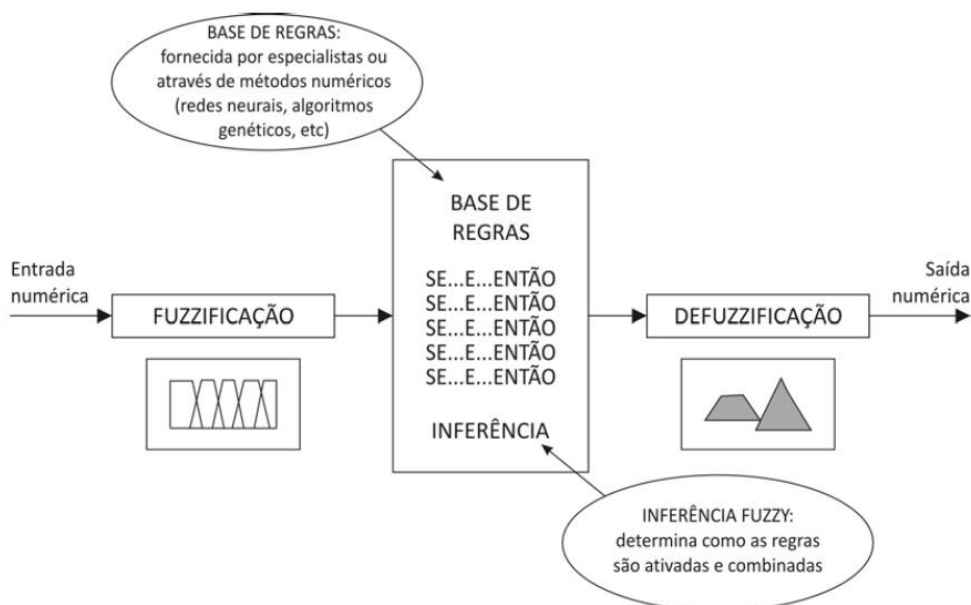


Figura 3.3 – Esquema básico do controlador Fuzzy
Fonte: BEZERRA, 2009

3.3.1 Conjuntos Fuzzy

Os conjuntos Fuzzy possuem o conceito básico facilmente assimilado devido que, no mundo real, as expressões vagas e imprecisas são interpretadas todos os dias pelas pessoas (BEZERRA, 2009).

Na lógica booleana tradicional, um determinado elemento apresenta apenas as possibilidades de pertencer ou não a um conjunto, ou seja, o grau de pertinência através desta lógica poderia possuir apenas dois valores 0 ou 1. No entanto a Lógica Fuzzy permite a um elemento possuir valores de grau de pertinência que varia entre 0 e 1 (JÚLIO, 2010). Essa graduação de pertencimento possibilita uma modelagem com base em expressões linguísticas imprecisas facilitando a discriminação de eventos (SILVEIRA, 2012).

Na teoria clássica dos conjuntos, um certo universo U contém um conjunto C e um elemento A . Em relação ao conjunto C pode-se afirmar que o elemento A pode apenas pertencer ou não pertencer ao conjunto segundo a teoria clássica de conjuntos. Já a teoria dos conjuntos Fuzzy possui uma caracterização mais ampla a respeito do grau de pertinência, podendo o elemento A pertencer mais ou pertencer menos ao conjunto C .

Na lógica booleana um veículo que percorre 90 km em uma viagem com uma distância total de 100 km, estaria inserido no conjunto dos que “não chegaram”, representado numericamente por 0 e ao completar o percurso e atingindo a quilometragem total seria representado numericamente por 1 fazendo agora parte do conjunto dos que “chegaram”. Na Teoria de conjuntos Fuzzy o mesmo veículo, na situação em que percorreu 90 km, poderia ser classificado como pertencente muito mais do conjunto dos que “chegaram” e menos pertencente do conjunto dos que “não chegaram”, sendo representado numericamente, por exemplo, por 0,9, possibilitando transformar expressões verbais imprecisas, inerente da comunicação humana em um valor numérico de fácil manipulação.

3.3.2 Variáveis linguísticas

Segundo CAMBOIM (2008) a determinação das variáveis linguísticas é o primeiro procedimento para elaboração de um controlador Fuzzy. Essas variáveis têm o seu valor expresso qualitativamente por um termo linguístico que fornece conceito a variável quantitativamente, por exemplo: velocidade baixa, velocidade média, velocidade alta.

Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se a cada um deles um conjunto Fuzzy definido sobre um universo de discurso (SHEIBIA,2001). O universo de discurso U da variável representa o intervalo numérico de todos os valores reais que a variável pode assumir (JÚLIO,2010).

3.3.3 Funções de Pertinência Fuzzy

A função de pertinência indica o quanto um elemento pertence a um dado conjunto. (BEZERRA, 2009). Elas são representadas por uma função numérica gráfica, que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores reais representando uma relação de intensidade com qual a variável pertence a um conjunto (MENDONÇA,2016).

As funções de pertinência podem assumir diversos formato, dentre os principais são o triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoidal, fuzzy-tom entre outros (JÚLIO,2010). Os formatos mais usados geralmente são os triangulares e trapezoidais devido a facilidade de implantação (SHAW e SIMÕES, 2007). Na Figura 3.4 apresenta-se alguns exemplos de funções de pertinência (trapezoidal, triangular e singleton), para uma variável chamada *erro* com as variações linguísticas (*erro grande negativo*, *erro negativo*, *erro nulo*, *erro positivo*, *erro grande positivo*).

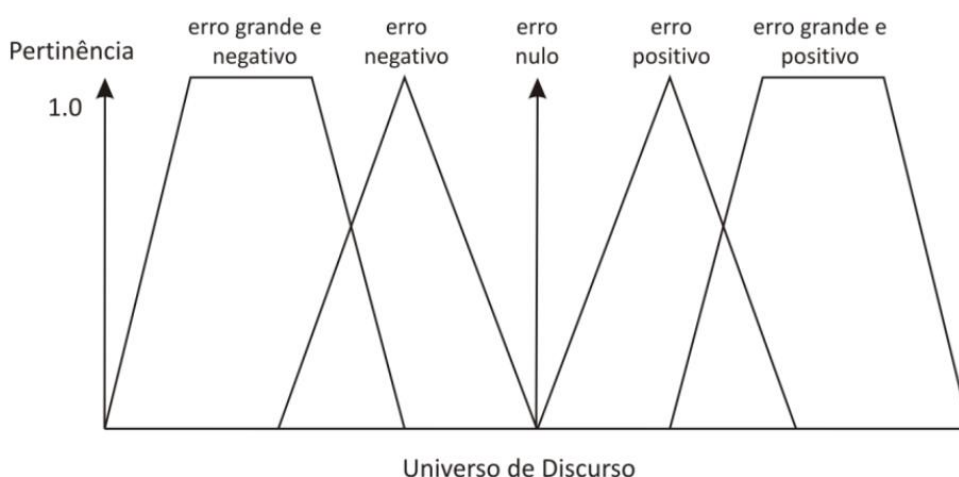


Figura 3.4 – Funções de pertinência
Fonte: JÚLIO, 2010

Uma variável linguística é caracterizada por quatro parâmetros: nome da variável, conjunto de variáveis linguísticas, domínio e o grau de pertinência (CAMBOIM, 2008). Tomando como exemplo a Figura 3.4 tem-se:

- Variável Linguística: *erro*;
- Valores Linguísticos: *grande e negativo, negativo, nulo, positivo, grande positivo*;
- Domínio da variável: *intervalo valores que a variável pode assumir, Universo de discurso*;
- Grau de pertinência: *Intervalo de valores entre 0 e 1 determinado pelas funções de pertinência*

3.3.4 Fuzzificação

Os conteúdos abordados anteriormente (variáveis linguísticas e funções de pertinência) são partes integrantes do processo de fuzzificação.

A fuzzificação é o processo no qual há a transformação dos dados de entrada iniciais em variáveis linguísticas, é um mapeamento do domínio de valores reais (como por exemplo, os valores obtidos de um sensor) para o domínio de valores Fuzzy definidos pelas funções de pertinência. Nesta etapa as informações referentes às incertezas devem ser consideradas (MENDONÇA, 2016; JÚLIO, 2010; SHAW e SIMÕES, 2007).

O bloco de fuzzificação, portanto, avalia a entrada medições de acordo com as premissas das regras. Cada premissa produz uma grau de pertinência que expressa o grau de cumprimento da premissa (JATZEN, 2007).

3.3.5 Sistema de inferência

O sistema de inferência *fuzzy* é composto por um conjunto de declarações condicionais que servem para expressar o conceito de premissa e consequência. São geralmente representados pelos operadores *SE* e *ENTÃO*, e utilizados para o desenvolvimento de regras de implicações baseadas em expressões linguísticas utilizadas na fase de fuzzificação (SILVEIRA, 2012).

O sistema de inferência é a etapa através da qual é feita a tomada de decisão do processo. Nele as informações de entrada já fuzzyficadas, através das variáveis linguísticas,

são confrontadas com uma base de regras previamente estabelecida. De acordo como grau de pertinência de cada entrada estabelecido através das funções de pertinência, o resultado mapeará um conjunto solução diferente (NICOLETTI,1999 *apud* SILVEIRA,2012).

O sistema de inferencia é a base de conhecimento, o depósito da inteligência relacionada a um sistema.A lógica fuzzy consegue lidar com uma base de conhecimento difusa, com experssões vagas e imprecisas (KAMIDE, 2020).

A base de conhecimento também conhecida como base de regras, usa implicações fuzzy para simular tomadas de decisão humanas, gerando ações de controle, consequentes, inferidas por um conjunto de regras estabelecidas por meio de condições de entradas, antecedentes (SHAW e SIMÕES, 2007). As regras se relacionam com os conjuntos fuzzy do seguinte modo:

SE <antecedente>**ENTÃO**<consequente>

SE < $x=A$ >**ENTÃO**< $Y=B$ > (Matematicamente)

SE <erro grande>**ENTÃO**<correção grande> (Linguisticamente)

Existem dois processos da inferência, Mamdani e Sugeno. O modelo Mandani possui sua base de regras constiuída por antecedentes e e consequentes formados por conjuntos linguísticos (JÚLIO, 2010).

$$MAMDANI \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{SE} \ X = A \ \mathbf{ENTÃO} \ Y = C \\ \mathbf{SE} \ T = \text{muito quente} \ \mathbf{ENTÃO} \ V = \text{ventilação alta} \end{array} \right.$$

Já na tomada de decisão do tipo SUGENO, o resultado depende de uma função matemática. Este modelo é composto por uma combinação de conceitos fuzzy e não-fuzzy, cujos antecedentes são variáveis linguísticas e cujos consequentes são funções (BEZERRA, 2009). Pode-se exemplificar matematicamente da seguinte forma:

$$SUGENO \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{SE} \ X = A \ \mathbf{ENTÃO} \ Y = f(x) \\ \mathbf{SE} \ T = \text{muito quente} \ \mathbf{ENTÃO} \ V = 0,7 \times T \end{array} \right.$$

O sistema de inferencia fuzzy considera todas as regras ao mesmo tempo e ao final se obtém uma resposta que pode ser numérica ou um conjunto fuzzy, fazendo-se neccesário,

quando a saída é um conjunto fuzzy, que essa saída seja adequada para o sistema a ser controlado, logo se faz necessário um processo de Defuzzificação (CAMBOIM, 2008).

3.3.6 Defuzzificação

A defuzzificação transforma a solução dada pelo sistema de inferência, em forma de conjunto fuzzy, em um dado numérico de saída real que melhor se adequa ao sistema a ser controlado (SILVEIRA, 2012). O objetivo é obter um valor numérico discreto que melhor represente os valores obtidos pela base de regras através das variáveis linguísticas.

Para a conversão das variáveis linguísticas em um valor numérico real muitos métodos são utilizados, os mais comuns são: centro da área, centro do máximo, e média do máximo (SHAW e SIMÕES, 2007).

O método centro da área, também chamado de centro de gravidade, consiste em calcular um ponto onde a área de todas as contribuições se divide em duas partes iguais. Este método exige um custo computacional maior para o cálculo.

No método centro do máximo, o cálculo da saída é realizado através média ponderada dos máximos das funções de pertinência de saída (ignora-se as áreas), cujos pesos são os resultados da inferência. É o método mais usado por possuir como principal vantagem o menor custo computacional (FERREIRA, 2004 *apud* CAMBOIM, 2008).

O método média do máximo possui o valor de saída calculado através da média de todos os máximos das funções de pertinência.

Cabe salientar que o método de defuzzificação deve ser escolhido levando em consideração diversos fatores dentre os quais pode-se citar a capacidade computacional, características do sistema a ser controlado e o tipo de saída que se deseja do controlador.

3.4 CONCLUSÕES

O controlador Fuzzy proposto neste trabalho foi implementado na placa de desenvolvimento Raspberry PI 3 modelo B devido sua capacidade de processamento, através da biblioteca Scikit-Fuzzy, já consolidada, por meio da linguagem de programação Python,. O controlador fuzzy do sistema utiliza cinco funções de pertinência para o erro e cinco para variação do erro, variáveis estas calculadas para o valor de entrada de rotação fornecido pelo

encoder de velocidade. O universo foi delimitado de forma empírica visando uma condição de velocidade máxima para segurança do operador.

Já o sinal de saída possui um universo de discurso de -100 à 100% de PWM, onde o sinal negativo indica o sentido de rotação dos motores. Foram utilizadas funções triangulares e trapezoidais por serem a mais comuns devido ao seu baixo custo computacional.

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os materiais e instrumentos utilizados neste trabalho, também como estes componentes se relacionam para promover o efetivo funcionamento do sistema. Este trabalho foi desenvolvido nas instalações Laboratório de Instrumentação e Controle – LINC/UFPB, em bancada instrumentada de forma a permitir a aquisição de dados necessários para a pesquisa. A bancada consiste em uma plataforma de teste e um protótipo de veículo tipo *Segway* instrumentado com sensores e sistemas embarcados alimentados por baterias e fonte de alimentação.

A plataforma de testes, Fig. 4.1, consiste de quatro pares de mancais onde são apoiados quatro roletes que além de suportarem o peso do veículo, permite que suas rodas girem de forma livre.



Figura 4.1 - Plataforma de testes
Fonte: Autoria própria

Esta plataforma foi concebida de forma a permitir a movimentação da inclinação do *Segway* estabelecendo pontos de referências permitindo analisar as ações do controlador e assim prever se suas decisões estão coerentes, no entanto não permitem analisar a eficácia do controlador já que os roletes eliminam o atrito que existiria no contato entre roda e solo, necessário para que as rodas reproduzam a ação efetiva do sistema controle.

A estrutura do protótipo *Segway* (Fig.4.2) foi construído de forma robusta com cantoneiras de aço, plataforma de aço inox e guidão de aço inox de modo a conseguir suportar todo o peso do protótipo e do usuário.



Figura 4.2 - Protótipo Segway
Fonte: Autoria própria

A estrutura formada por duas bases retangulares de cantoneiras, uma superior e outra inferior, interligadas pela carcaça dos motores, que permite acomodar os dois motores, todo o hardware formado pela Raspberry, Arduino e demais componentes que formam o protótipo, que serão detalhados ao longo deste capítulo, e ainda consegue acomodar duas baterias do tipo estacionária de nobreak utilizadas no protótipo.

A base inferior da estrutura, apoia uma chapa plástica onde os componentes de hardware são acomodados. Já na base superior é fixada com parafusos uma chapa de aço inox onde ficará o usuário conforme pode-se observar na Fig. 4.3.



Figura 4.3 - Protótipo do veículo com o usuário
Fonte: Autoria própria

4.2 MATERIAL UTILIZADO

Para a realização deste trabalho foram utilizados diversos instrumentos, estes foram necessários em momentos específicos para aferição de dados, mas não são necessários para o funcionamento do sistema, como multímetro, tacômetro e osciloscópio e por esse motivo não serão descritos dentre os materiais utilizados.

4.2.1 Motor de Corrente Contínua

Neste trabalho foi utilizado um motor de corrente contínua fabricado pela NPC Robotics modelo NPC – T74, Fig. 4.4, e possui as seguintes características:

- Tensão de trabalho de 24 Volts;

- Potência : 1,7 HP;
- Velocidade máxima a 24 Volts: 245 rpm;
- Fator de redução: 20:1;
- Peso: 6,53 kg;



Figura 4.4 – Motor NPC – T74

4.2.2 Placa Arduino Uno

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de programação aberta baseado em uma placa única, com a possibilidade de configurar entradas e saídas, podendo ser essas analógicas ou digitais. Possui uma interface própria de programação baseada na Linguagem C++ e como grande vantagem uma curva de aprendizagem rápida, mesmo para pessoas que não são da área técnica, devido aos inúmeros projetos e códigos compartilhados na internet que vão desde os mais simples até os mais complexos, possibilitando o desenvolvimento de códigos que atendam a uma necessidade específica a partir da modificação ou concatenação de outros códigos.

Outro motivo para sua grande aplicabilidade está na possibilidade de utilização de “Shields”, que são elementos que podem ser facilmente conectados à placa de Arduino para fornecer a mesma, recursos extra. O ambiente de programação (IDE) é aberto podendo ser obtido gratuitamente para sistemas operacionais Mac OS X, Windows, e Linux. A IDE do Arduino possibilita o monitoramento de dados por meio de valores ou gráfico mediante conexão USB.

O Arduino possui diversas placas diferentes com variadas configurações de tamanho e memória, onde o mais utilizado é o Arduino UNO (Fig. 4.5), que é a placa utilizada neste

trabalho. A placa Arduino Uno utiliza o microcontrolador ATmega328, que possui 14 entradas/saídas digitais, podendo 6 serem usadas como saídas PWM, 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, conexão USB, uma entrada para fonte, soquetes para ICSP, e um botão de reset.



Figura 4.5 – Arduino Uno

4.2.3 Raspberry PI 3 Modelo B

A Raspberry PI 3 (Figura 4.6) é um minicomputador, do tamanho aproximado de um cartão de crédito que suporta sistemas Linux como o Raspbian e Ubuntu e também Windows 10 IoT. Possui Processador Broadcom BCM2837B0 64bits ARM Cortex-A53 Quad-core de 1.4GHz, 1GB de memória. Suporta redes wireless no padrão AC e Bluetooth 4.2 BLE integrado. Saída de vídeo HDMI, 4 portas USB 2.0 e 40 entradas ou saídas, analógicas ou digitais.

Este minicomputador nos permite instalar um software que, através da rede de Wifi, que permite acessar todo o conteúdo da Raspberry de um outro computador conectado na mesma rede. O software escolhido foi o VNC Viewer que além de ser gratuito, possui uma versão do software projetada para a Raspberry Pi. Este software nos possibilita monitorar todo o processamento do controlador, bem como as variáveis de entrada e saída do sistema de um outro computador, sem a necessidade de uma conexão física.

Devido essas características, decidiu-se selecionar a Raspberry para executar o controle do sistema, já que para o Arduino seria muito complicado processar o controle, por causa de sua capacidade de memória e processamento mais reduzida.

A utilização da Raspberry nos possibilita, futuramente, utilizar outras técnicas de controle que venham a demandar uma certa capacidade de processamento, além de

Raspiberry permitir embarcar todo o sistema no protótipo, o que é fundamental para um veículo de transporte pessoal como este proposto.



Figura 4.6 – Raspiberry PI 3 Modelo B

4.2.4 Giroscópio MPU 6050

Utilizou-se, ainda o giroscópio a GY521, Figura 4.7, baseado no CI MPU-6050 de fabricação InvenSense, que possui no mesmo encapsulamento de um acelerômetro e giroscópio de alta precisão. A comunicação é feita com o arduino através do padrão I²C usando os pinos SCL e SDA. O giroscópio é acoplado na base do guidão de que por sua vez está soldado a plataforma permitindo captar os ângulos provocados pela movimentação do guidão devido as solicitações do usuário, como também a inclinação da base provocados pela instabilidade de equilíbrio do usuário.

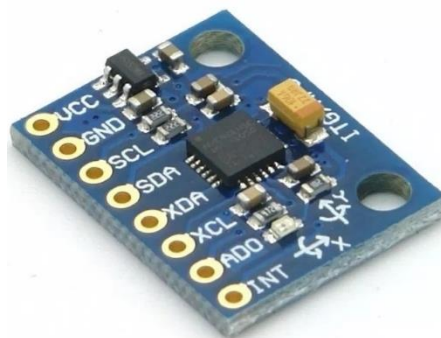


Figura 4.7 – MPU 6050

4.2.5 Ponte H BTS 7960

A ponte H BTS 7960 (Figura 4.8) opera com tensão de alimentação de 5-45 Vcc e corrente máxima de 43 A com pico de 60 A, possuindo proteção térmica, sobretensão, sub tensão e sobrecorrente além de controle de velocidade e de direção das rodas. Esta ponte H

possui oito pinos de conexão, dois para alimentação (Vcc e gnd), dois para aviso de problemas, dois pinos para habilitação da ponte ativados com nível lógico 1 (5 Vcc) e outros dois pinos que recebem o valor de PWM (Modulação por Largura de Pulso) e a depender do pino que recebe o valor, determina o sentido de giro da roda em horário ou anti-horário.

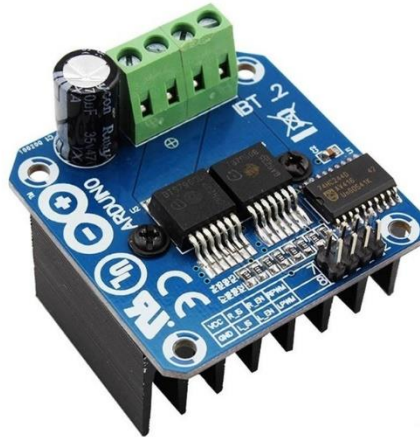


Figura 4.8 – Ponte H BTS 7960

4.2.6 Circuito digital de Acionamento da Ponte

A ponte H possui 8 conexões, onde 4 delas devem ser comandadas, em nosso veículo, pelo Arduino. Cada roda necessita de uma ponte, com isso, seriam necessárias 8 portas do Arduino, sendo 2 digitais e 4 analógicas. As duas saídas digitais são utilizadas para habilitação da ponte; um jumper permite que uma saída digital faça a habilitação completa da ponte (2 pinos). No tocante as saídas analógicas, seriam usadas duas por ponte, cada saída será responsável por acionar um sentido de giro da rodas.

O acionamento nos sentidos horário e anti-horário, desta forma, exige cuidados na programação do código pois, não podem ser acionadas simultaneamente, com isso antes de habilitar um sentido é necessário desabilitar o outro sentido.

Visando diminuir a quantidade de portas analógicas a serem utilizadas pelo Arduino, bem como obter uma segurança na seleção do sentido de rotação com simplicidade de programação, foi utilizado o circuito digital mostrado na Fig. 4.9, que utiliza CI's 7808, porta lógica E e 7804, porta lógica inversora.

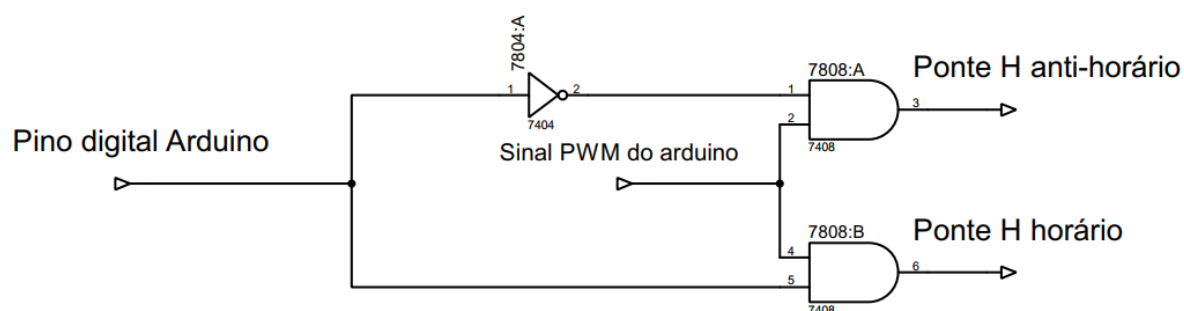


Figura 4.9 – Circuito digital de acionamento da ponte H

Fonte: Autoria própria

Com a utilização deste circuito digital, é possível utilizar apenas uma saída PWM do Arduino e direcioná-la para o sentido desejado por meio da saída digital. A saída digital no nível lógico “1” aciona a ponte no sentido horário e no nível lógico “0” habilita a ponte no sentido anti-horário. Pode-se perceber, também que não há a possibilidade de acionarmos os dois sentidos ao mesmo tempo, gerando segurança para integridade da ponte bem como facilitando a lógica de programação.

4.2.7 Encoder de velocidade

O encoder de velocidade (Figura 4.10) utilizado neste trabalho é o FC130SA da fabricante Mabuchi que trabalha com tensão de 3-24 Vcc. Seu disco possui resolução de 334 interrupções por volta e possibilita a codificação de fase de rotação. Também possibilita a medição de rotação por meio de uma proporcionalidade entre a rotação e a tensão gerada.

Neste trabalho realizou-se a medição de rotação por meio de detecção das interrupções, pois a faixa de valores de rotação atingidas pelo protótipo, não é capaz de fornecer uma variação significativa de tensão afim de possibilitar uma medição confiável.



Figura 4.10 – Encoder de velocidade

4.2.8 Regulador de tensão

Neste trabalho utilizou-se uma bateria de 12 Vcc para fornecer energia elétrica, para os motores CC, por meio da ponte H, e para alimentar o sistema de controle formado por Arduino, Raspiberry, Giroscópio e demais componentes que trabalham com 5 Vcc. Como a bateria usada para alimentar o sistema de controle possui tensão nominal de trabalho de 12Vcc foi necessário usar um conversor CC-CC para possibilitar a alimentação deste sistema com 5 Vcc. Este conversor CC-CC (Figura 4.11) possui as seguintes especificações:

- Tensão de entrada: 3,2 a 40 Vcc;
- Tensão de saída ajustável: 1,5 a 35 Vcc;
- Diferença entre a tensão de entrada e saída deve ser de maior que 1,5 Vcc;
- Corrente máxima de saída: ~5 A;
- Eficiência de conversão: até 92%;
- Temperatura de operação: -40 a 85° C;



Figura 4.11 – Regulador de tensão CC-CC

As características dos componentes eletrônicos do sistema, permite que a autonomia da bateria seja suficiente para alimentá-los satisfatoriamente, o que foi fundamental na proposta de embarcar todos os componentes no veículo proposto.

Todos estes componentes estão interligados e acomodados abaixo da plataforma onde fica o usuário. Esta plataforma consiste em uma chapa de aço inox, fixada por quatro parafusos e facilmente removível. A Fig 4.12 mostra-se a acomodação dos componentes no veículo.

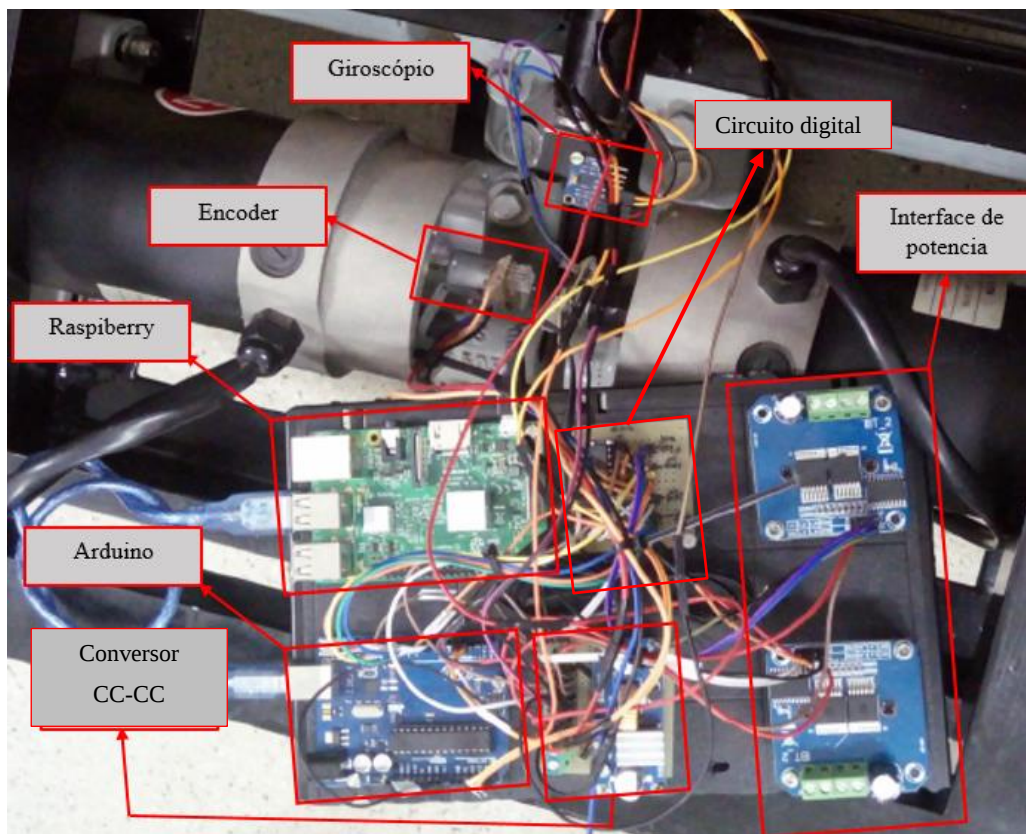


Figura 4.12– Componentes do Veículo
Fonte: Autoria própria

4.2.9 Bateria

Para suprir a necessidade de energia do protótipo foi utilizada uma bateria de nobreak da marca Moura (Fig. 4.13) com tensão de 12 Volts, Capacidade de 7 Ah e peso de 2,2 kg. Suas dimensões (151 x 65 x 94 mm) foram importantes para se conseguir embarcá-la no protótipo, junto com os demais componentes.



Figura 4.13– Modelo de bateria utilizado para alimentar o sistema

4.3 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Inicia-se a descrição do funcionamento do sistema com o sensor giroscópio MPU6050, responsável por fornecer as informações de inclinação tanto da plataforma como do guidão. Estes valores foram coletados pelo Arduino, tratados e repassados para a Raspberry.

O arduino também recebe as informações dos encoders de velocidade, que fornecem através de pulsos, a rotação de cada roda do veículo. As informações do giroscópio e dos encoders estabelecerão os valores de entrada para o controlador, onde o giroscópio é responsável por determinar o valor de referência de velocidade e os enconder's mostram se esse valor foi atingido.

Na Raspberry, está o controlador baseado na Lógica Fuzzy. Este controlador recebe as informações do Arduino, via USB e calcula os parâmetros de entrada do controlador. Com os valores de entrada, o controlador processa as informações e determina a ação de controle.

Esta ação de controle é o valor de PWM a ser aplicado em cada roda, que retorna para o Arduino, pela mesma via de comunicação USB. Todo o fluxo de informações entre Arduino e Raspberry se dá via USB.

A ação de controle enviada para o Arduino, determina qual deve ser o valor de PWM a ser aplicado em cada roda e o sentido de rotação de cada roda. Estas informações de sentido e velocidade são transmitidas para o circuito digital através de portas analógicas e digitais do Arduino. Ao receber essas informações o circuito digital faz o acionamento das pontes H (interface de potência), controlando a rotação e o sentido de giro de cada roda.

A interface de potência é composta por duas pontes H, que por sua vez controlam a energia fornecida pela bateria aos motores por meio de pulsos PWM. A Figura 4.14 expressa graficamente de modo simplificado como os componentes do sistema se relacionam.

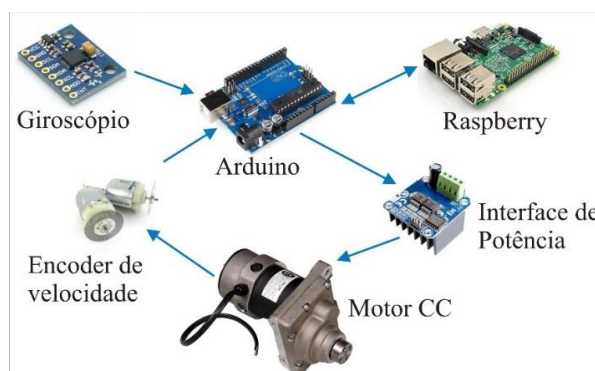


Figura 4.14 – Lay-out básico dos componentes do sistema
Fonte: Autoria própria

4.4 CONCLUSÕES

A combinação, Raspiberry Pi e Arduino, possui um elevado potencial para o desenvolvimento de soluções por aliar uma capacidade de processamento da Raspiberry com versatilidade de acoplamento de sensores do Arduino.

Pode-se observar também que todos os componentes, exceto os motores, são facilmente adquiridos no mercado nacional através de lojas físicas ou sites e apresentam uma boa relação custo-benefício; apenas os motores são adquiridos através de importação.

Observou-se que a instrumentação utilizada neste trabalho, atendeu satisfatoriamente as necessidades do projeto. No próximo capítulo apresenta-se o desenvolvimento do controlador Fuzzy aplicado no veículo.

CAPÍTULO V

PROJETO DO CONTROLADOR FUZZY

5.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é mostrar o controlador Fuzzy desenvolvido neste trabalho, detalhando ao máximo, os processos de escolha das variáveis de entrada e de saída, as funções de pertinência, a estratégia de controle e como foi montada a base de regras.

Para um melhor entendimento da escolha do tipo de técnica de controle, bem como as escolhas feitas no desenvolvimento no controlador, é que iniciou-se este capítulo com a caracterização do sistema, mostrando o funcionamento de um veículo elétrico do tipo *Segway* bem como as variáveis envolvidas neste sistema. Logo em seguida é mostrado como o controlador foi projetado.

Como se sabe, um dos fatores importantes para a implantação de um controlador Fuzzy é o conhecimento do funcionamento do sistema a ser controlado.

O controlador Fuzzy proposto neste trabalho foi implementado em uma placa de desenvolvimento Raspberry PI 3 modelo B devido sua capacidade de processamento, possibilidade de comunicação com o arduino, bem como a utilização da rede wifi para visualizar-se os dados em tempo real na tela de um computador ou celular, através de VNCviewer.

O controlador Fuzzy foi desenvolvido através da biblioteca Scikit-Fuzzy, já consolidada, que utiliza a linguagem de programação Python. Toda parte de comunicação somatório dos incrementos, criação de arquivos com os dados dos experimentos também foi elaborado na Raspiberry PI utilizando linuagem de programação Python.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

No Segway precisa-se fazer o controle independente das duas rodas em função do ângulo da plataforma (θ) que determinará uma alteração no equilíbrio do sistema e acionará o os motores para frente ou para trás, e; em função do ângulo do guidão (α) que determinará a diferença de velocidade entre os motores que fará o veículo virar para direita ou para esquerda. Na Figura 5.1 mostra-se como estão dispostos estes ângulos no sistema.

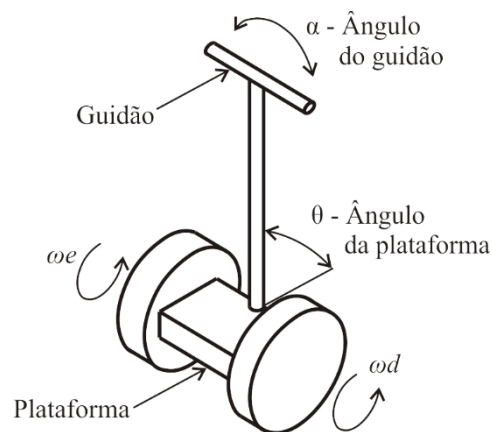


Figura 5.1 – Ângulo do Segway
Fonte: Adaptado de ARNOLDO, 2012

Onde:

θ – Ângulo de inclinação da plataforma;

α – Ângulo de inclinação do guidão;

ω_d – rotação da roda direita;

ω_e – rotação da roda esquerda.

A movimentação da plataforma para frente gera um ângulo θ positivo e o acionamento das rodas no sentido horário (ω_d e ω_e positivos). Consequentemente uma inclinação negativa da plataforma (θ negativo) aciona as rodas no sentido anti-horário (ω_d e ω_e negativos).

Ao movimentar o guidão para direita gera-se um ângulo α positivo e isto provoca uma diminuição da rotação da roda direita (ω_d) e um aumento da rotação da roda esquerda (ω_e). A inclinação do guidão para esquerda provoca, consequentemente, uma diminuição de ω_e e um aumento de ω_d . Dependendo dos valores dos ângulos θ e α podemos obter um ω_d positivo e um ω_e negativo ou o contrário.

5.3 PROJETO DO CONTROLADOR

A partir do conhecimento do comportamento do sistema foi possível iniciar o projeto do controlador Fuzzy, utilizando as técnicas já descritas no capítulo 3.

O primeiro passo foi analisar e selecionar quais variáveis do sistema seriam utilizadas para estabelecer os valores de entrada e de saída do controlador. O sistema, da forma como foi instrumentado, possui as variáveis de ângulo da plataforma (θ) e de ângulo do guidão (α), ambos gerados pelo giroscópio, como também a variável de rotação das rodas e o valor de PWM que acionaria os motores.

O controlador desenvolvido funciona com duas variáveis de entrada, erro e variação do erro. A estratégia de controle consiste em determinar a velocidade de rotação das rodas em função do ângulo θ e do ângulo α , ou seja, os ângulos gerados pela plataforma e pelo guidão determinarão qual rotação as rodas devem atingir (Ref ω_e e Ref ω_d), que comparada com a rotação medida (ω_e e ω_d), determina a referência do controlador. O controlador, por sua vez, determinará o incremento ou decremento da porcentagem de PWM a ser aplicada em cada motor. A figura 5.2 mostra o diagrama de blocos da estratégia de controle desenvolvida.

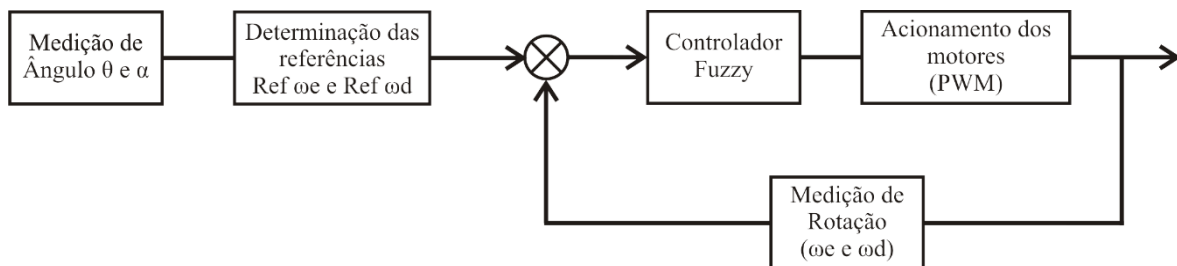


Figura 5.2 – Diagrama de blocos da estratégia de controle

Fonte: Autoria própria

A rotação de referência é determinada por meio de uma relação linear, determinada empiricamente, por meio do método de tentativa e erro, relacionando o ângulo θ e α . São geradas duas referências de rotação uma para roda da direita (Ref ω_d) e outra para roda esquerda (Ref ω_e) conforme equações 5.1 e 5.2.

$$\text{Ref } \omega_e = 2,5 \times \theta + 1,5 \times \alpha \quad \text{Eq. (5.1)}$$

$$\text{Ref } \omega d = 2,5 \times \theta - 1,5 \times \alpha \quad \text{Eq. (5.2)}$$

Onde:

Ref ωd – Referência de rotação para roda direita [rpm];

Ref ωe - Referência de rotação para roda esquerda [rpm];

θ – Ângulo de inclinação da plataforma [graus];

α – Ângulo de inclinação do guidão [graus];

Desta forma são geradas duas referências de rotação, uma para cada roda, onde uma referência recebe um acréscimo e a outra um decréscimo proveniente da movimentação no guidão.

As variáveis de entrada de erro e de variação erro são estabelecidas a partir da variável de rotação, ou seja, a diferença entre a rotação desejada e a rotação atual irá determinar o erro e consequentemente a variação do erro.

O controlador Fuzzy foi construído com duas entradas, *erro*, com universo de discurso de -100 até 100 e variação do erro, *derro*, com universo de discurso de -45 até 45. Ambas variáveis tiveram seu universo de discurso coberto por cinco funções de pertinência do tipo triangular e trapezoidal. As funções trapezoidais abrangem os limites superior e inferior do universo de discurso, enquanto as triangulares são distribuídas na região central de forma a cobrir todo o universo de discurso.

Na Tabela 5.1 mostra-se as nomenclaturas atribuídas a cada função de pertinência bem como os valores correspondentes para formação de cada função da variável de controle *erro*. Na Fig. 5.3 mostra-se graficamente como estão dispostas as funções de pertinência para a variável de *erro*.

Tabela 5.1 – Valores da variável de controle *erro*

Variável linguística: <i>Erro</i>	Tipo	Pontos
<i>Negmed</i>	Trapezoidal	[-100, -100, -25, -12]
<i>Negpeq</i>	Triangular	[-30, -12, -5]
<i>Ideal</i>	Triangular	[-12, 0, 12]
<i>Pospeq</i>	Triangular	[5, 12, 30]
<i>Posmed</i>	Trapezoidal	[12, 25, 100, 100]

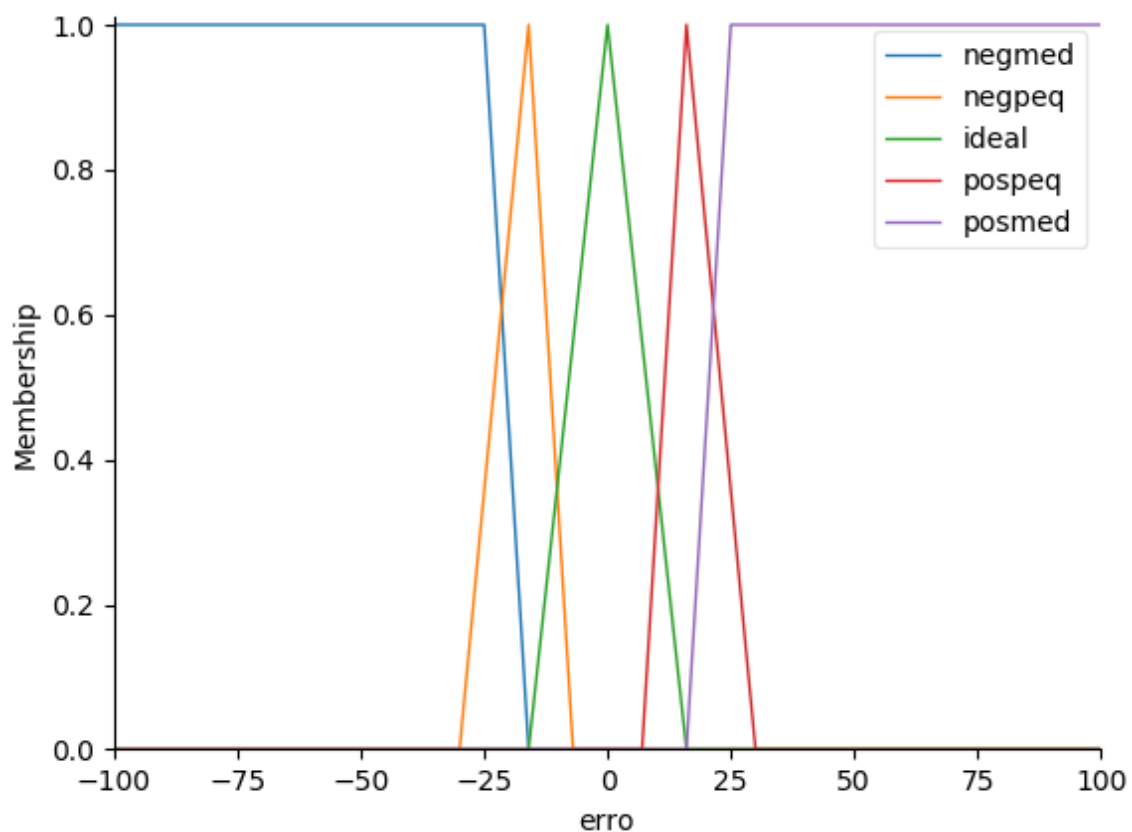


Figura 5.3 – Variável de controle - *erro*
 Fonte: Autoria própria

Na Tabela 5.2 mostra-se as nomenclaturas atribuídas a cada função de pertinência bem como os valores correspondentes para formação de cada função da variável de controle de variação do erro (*derro*). Na Fig. 5.4 mostra-se como estão dispostas, graficamente, as funções de pertinência para a variável *derro*.

Tabela 5.2 – Valores da variável de controle variação do erro

Variável linguística: <i>Variação do erro (derro)</i>	Tipo	Pontos
<i>Negmed</i>	Trapezoidal	[-45, -45, -40, -15]
<i>Negpeq</i>	Triangular	[-40, -20, -1]
<i>Ideal</i>	Triangular	[-15, 0, 15]
<i>Pospeq</i>	Triangular	[1, 20, 40]
<i>Posmed</i>	Trapezoidal	[15, 40, 45, 45]

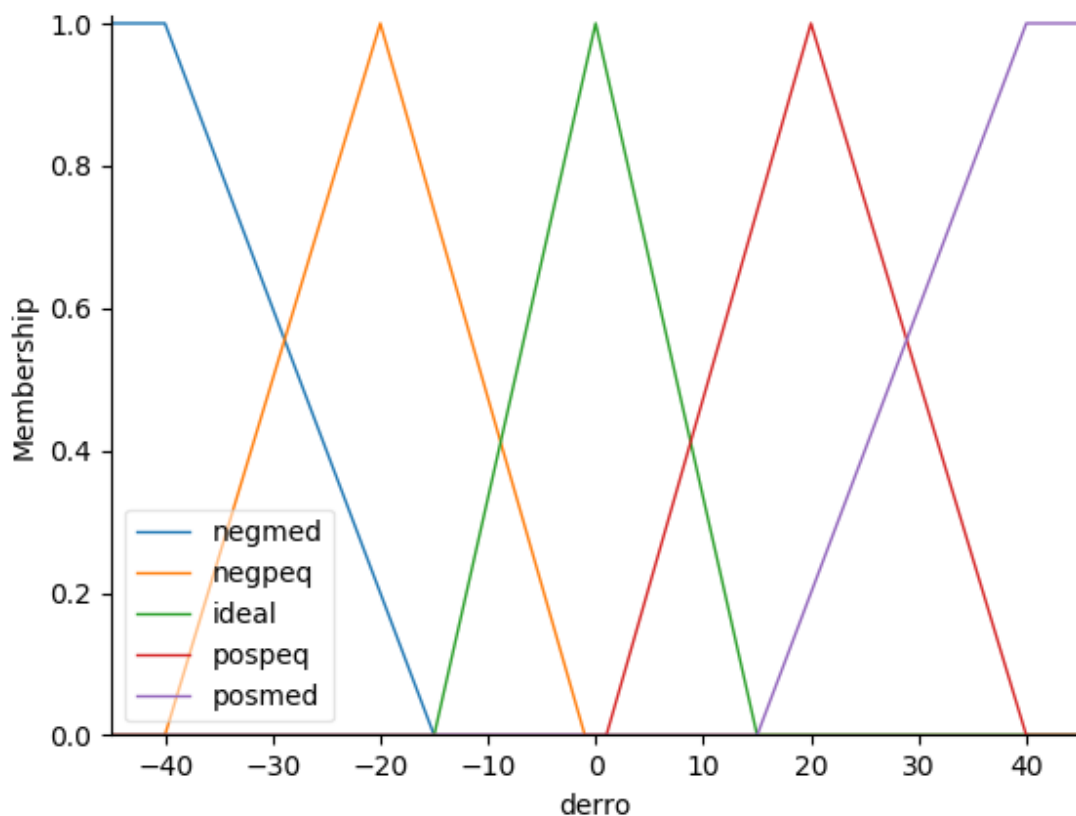


Figura 5.4 – Variável de controle – variação do erro (*derro*)
 Fonte: Autoria própria

Já a variável de saída do controlador possui um universo de discurso de -15 à 15. É importante ressaltar que este valor de saída representa o valor de porcentagem a ser incrementado ou decrementado (delta de PWM) em relação ao valor total de PWM, a ser aplicado nos motores. PWM total zero corresponde a 0% da energia da bateria aplicada no motor, sendo que PWM total corresponde a 100% da tensão da bateria aplicada nos motores. O controlador vai determinar qual o valor de incremento ou decremento necessário para que as rodas atinjam a rotação de referência estabelecida pelos ângulos da plataforma e do guidão. É importante ressaltar que o valor total de PWM aplicado no motor pode variar de -100% até 100%, onde o sinal negativo indica uma inversão no sentido de rotação do motor.

Na Tabela 5.3 mostra-se as nomenclaturas atribuídas a cada função de pertinência; bem como os valores correspondentes para formação de cada função da variável de controle de saída (*pwmout*). Na Fig. 5.5 é mostrado graficamente como estão dispostas as funções de pertinência para a variável de saída *pwmout*.

Tabela 5.3 – Valores da variável de controle de saída - *pwmout*

Variável linguística: <i>pwmout</i>	Tipo	Pontos
<i>Negmed</i>	Trapezoidal	[-15, -15, -12, -7]
<i>Negpeq</i>	Triangular	[-12, -7, -2]
<i>Ideal</i>	Triangular	[-5, 0, 5]
<i>Pospeq</i>	Triangular	[2, 7, 12]
<i>Posmed</i>	Trapezoidal	[7, 12, 15, 15]

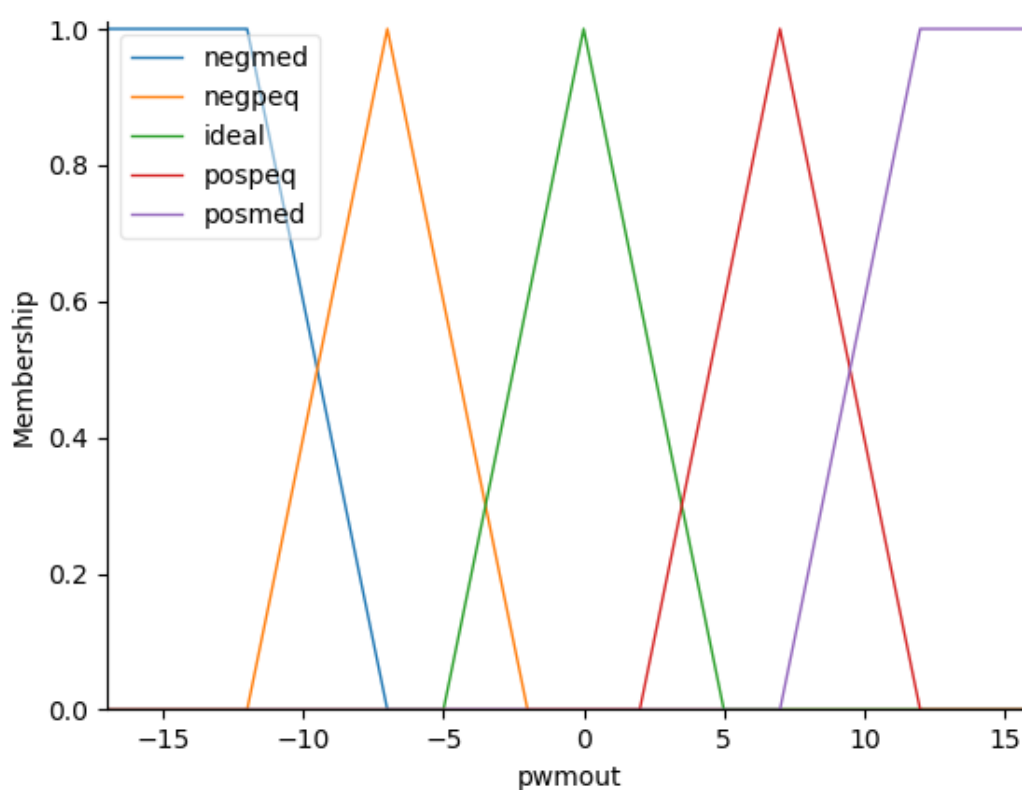


Figura 5.5 – Variável de controle de saída – *pwmout*

Fonte: Autoria própria

Foi montada uma base de regras com 25 sentenças, baseadas nos princípios de que, inclinando a plataforma para frente, as rodas giram; conduzindo o veículo para frente inclinando para trás as rodas giram no sentido contrário, conduzindo o veículo para trás, conforme descrito no início deste capítulo. O sistema de inferência escolhido foi o Mamdani com defuzzificação por Centro de Área. Na tabela 5.4 apresenta-se as regras que relacionam o erro e a variação do erro com o delta de PWM.

Tabela 5.4 – Base de Regras do controlador Fuzzy

Nº	Regras
1	SE erro <i>pospeq</i> <i>e</i> derro <i>posmed</i> ENTÃO pwmout <i>posmed</i>
2	SE erro <i>posmed</i> <i>e</i> derro <i>negpeq</i> ENTÃO pwmout <i>posmed</i>
3	SE erro <i>posmed</i> <i>e</i> derro <i>pospeq</i> ENTÃO pwmout <i>posmed</i>
4	SE erro <i>posmed</i> <i>e</i> derro <i>posmed</i> ENTÃO pwmout <i>posmed</i>
5	SE erro <i>ideal</i> <i>e</i> derro <i>posmed</i> ENTÃO pwmout <i>pospeq</i>
6	SE erro <i>pospeq</i> <i>e</i> derro <i>ideal</i> ENTÃO pwmout <i>pospeq</i>
7	SE erro <i>pospeq</i> <i>e</i> derro <i>pospeq</i> ENTÃO pwmout <i>pospeq</i>
8	SE erro <i>posmed</i> <i>e</i> derro <i>negmed</i> ENTÃO pwmout <i>pospeq</i>
9	SE erro <i>posmed</i> <i>e</i> derro <i>ideal</i> ENTÃO pwmout <i>pospeq</i>
10	SE erro <i>negmed</i> <i>e</i> derro <i>posmed</i> ENTÃO pwmout <i>ideal</i>
11	SE erro <i>negpeq</i> <i>e</i> derro <i>pospeq</i> ENTÃO pwmout <i>ideal</i>
12	SE erro <i>negpeq</i> <i>e</i> derro <i>posmed</i> ENTÃO pwmout <i>ideal</i>
13	SE erro <i>ideal</i> <i>e</i> derro <i>negpeq</i> ENTÃO pwmout <i>ideal</i>
14	SE erro <i>ideal</i> <i>e</i> derro <i>ideal</i> ENTÃO pwmout <i>ideal</i>
15	SE erro <i>ideal</i> <i>e</i> derro <i>pospeq</i> ENTÃO pwmout <i>ideal</i>
16	SE erro <i>pospeq</i> <i>e</i> derro <i>negmed</i> ENTÃO pwmout <i>ideal</i>
17	SE erro <i>pospeq</i> <i>e</i> derro <i>negpeq</i> ENTÃO pwmout <i>ideal</i>
18	SE erro <i>negmed</i> <i>e</i> derro <i>negmed</i> ENTÃO pwmout <i>negmed</i>
19	SE erro <i>negmed</i> <i>e</i> derro <i>negpeq</i> ENTÃO pwmout <i>negmed</i>
20	SE erro <i>negpeq</i> <i>e</i> derro <i>negmed</i> ENTÃO pwmout <i>negmed</i>
21	SE erro <i>negmed</i> <i>e</i> derro <i>ideal</i> ENTÃO pwmout <i>negpeq</i>
22	SE erro <i>negmed</i> <i>e</i> derro <i>pospeq</i> ENTÃO pwmout <i>negpeq</i>
23	SE erro <i>negpeq</i> <i>e</i> derro <i>negpeq</i> ENTÃO pwmout <i>negpeq</i>
24	SE erro <i>negpeq</i> <i>e</i> derro <i>ideal</i> ENTÃO pwmout <i>negpeq</i>
25	SE erro <i>ideal</i> <i>e</i> derro <i>negmed</i> ENTÃO pwmout <i>negpeq</i>

Utilizou-se um controlador Fuzzy incremental com intuito de reduzir a influência da bateria no controlador, pois quando o controlador estabelecia o valor total do PWM a ser aplicado, lembrando que esse valor é uma porcentagem, o sistema possuía comportamento diferente com variação de carga e com a variação do nível de energia da bateria, ou seja, uma saída de 50% de PWM com um determinado nível de energia na bateria atendia bem a uma determinada carga, alterando-se a carga ou o nível de energia da bateria o controlador apresentava um comportamento diferente, o que tornava difícil ajustar os parâmetros do controlador.

Com o controlador Fuzzy Incremental os efeitos de carga da bateria são atenuados pois a o delta de PWM incrementa ou decrementa a porcentagem total de PWM aplicado no motor até que a rotação alcance o valor de referência.

Na figura 5.6 consegue-se observar; de forma nítida; a atuação do controlador compensando, através do incremento negativo, a descarga da bateria. Neste experimento colocou-se o veículo em balanço (rodas livres) e estabeleceu-se valores de referência constantes de 0 rpm, -10rpm e -20rpm. O sinal negativo indica que a roda gira para trás. Já o valor do delta pode representar um incremento ou decremento dependendo do valor do PWMe, por exemplo, um delta negativo pode representar tanto um incremento de rotação negativo se o PWMe for negativo e um decremento se o PWMe for positivo.

Foi possível observar que como não houve variação na carga, e o controlador aumentou a porcentagem de PWMe, verificou-se que esse incremento constante para manutenção da rotação na referência foi devido a descarga da bateria que quando carregada apresenta um valor de tensão de 13,4 Vcc e após este experimento apresentou uma tensão de 11,8 Vcc (sem carga).

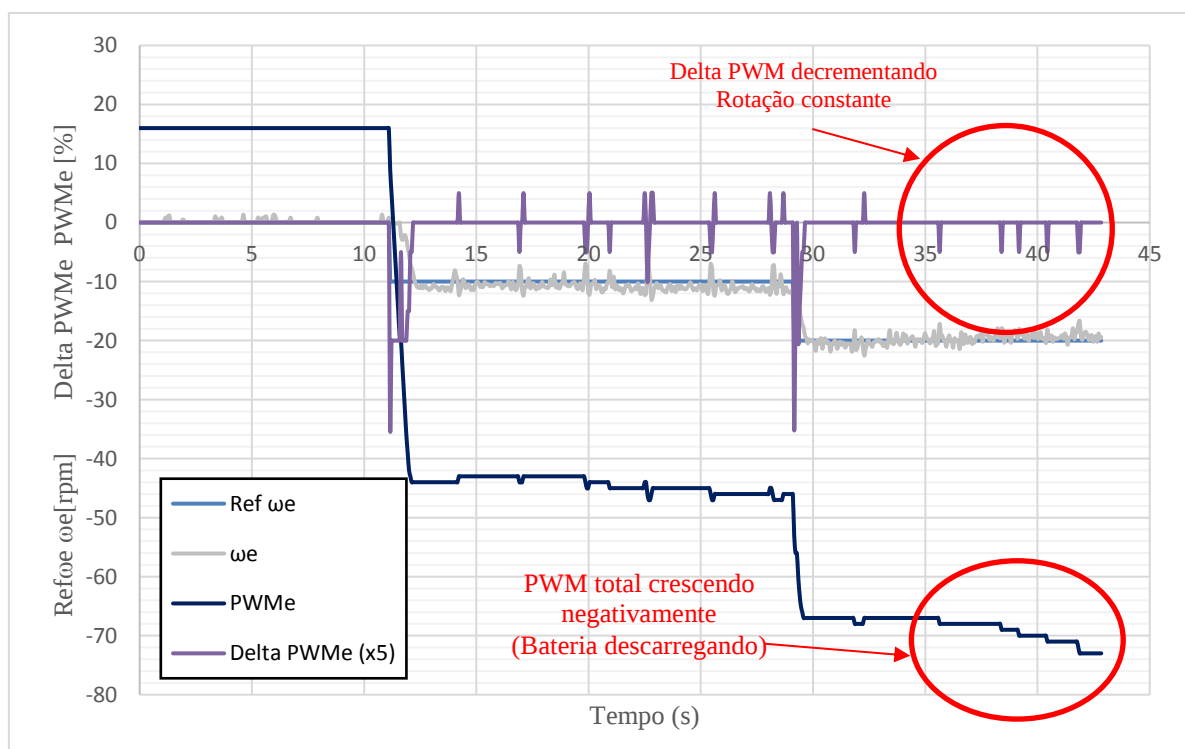


Figura 5.6 – Controlador compensando descarga da bateria

Fonte: Autoria própria

Observou-se que o controlador conseguiu compensar a descarga da bateria incrementando negativamente o PWMe e mantendo o valor de rotação controlada. Logicamente o controlador consegue compensar a descarga da bateria até o limite onde ele incrementa, positiva ou negativamente, o PWMe total até 100%, liberando totalmente a tensão da bateria para os motores.

5.4 FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR

Para explicar melhor todo o funcionamento do controlador, optou-se por descrever em etapas:

1ª etapa: O funcionamento do controlador inicia-se com recebimento das variáveis de entrada. Essas variáveis são ângulo da plataforma e do guidão, gerados pelo giroscópio, e a velocidade das rodas gerados pelos encoders. Essas variáveis são geradas pelo Arduino e enviadas via USB para a Raspiberry.

2ª etapa: Após o recebimento das variáveis de ângulo da plataforma e do guidão, são geradas duas referências independentes para cada roda.

3ª etapa: Após o estabelecimento das referências de rotação, compara-se a referência de cada roda com os valores atuais de rotação recebidos. Desta comparação, gera-se as variáveis de erro e variação de erro para cada roda.

4ª etapa: Inseridas as variáveis de erro e variação de erro de uma roda no controlador, a saída correspondente é armazenada. Logo, em seguida, inseriu-se as variáveis de erro e variação de erro da segunda roda no controlador, e armazenou-se a segunda saída.

5ª etapa: Cada saída é contabilizada no valor do PWM total a ser enviado para cada roda. Com o valor contabilizado monta-se a palavra de controle que será enviada ao Arduino, via USB.

6ª etapa: Recebida a palavra de controle pelo Arduino, o mesmo, encaminha cada saída para cada roda e novamente mede-se novamente as variáveis de ângulo e de rotação e envia-se novamente para a Raspiberry via USB.

Todo esse processo, desde o recebimento das variáveis de entrada, até a geração e envio dessas variáveis, ocorre em aproximadamente 60 ms. Vale salientar que metade deste tempo é utilizado para contabilização de pulsos para medição de rotação.

5.5 CONCLUSÕES

Uma das características principais do controlador Fuzzy é poder projetar o controlador sem a necessidade de conhecer a dinâmica da planta, mas para isso é importante conhecer bem o fenômeno físico a ser controlado ou possuir experiência na operação do sistema.

O controlador desenvolvido neste capítulo teve como base de experiência muita observação de vídeos de veículos comerciais e a partir das características da planta foi possível realizar o projeto do controlador Fuzzy.

A instrumentação também foi importante para que a Lógica Fuzzy pudesse ser embarcada no protótipo, pois além de capacidade de processar o código do controlador e do sistema em geral, também possibilitou que o veículo tivesse liberdade de locomoção, não estando conectado a componentes externos.

Os resultados experimentais do controlador são apresentados no capítulo 6.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 INTRODUÇÃO

Após a realização dos estudos do controlador Fuzzy bem como observar como ele atua no sistema, mostra-se neste capítulo a etapa final que é o desempenho do sistema diante de diversas solicitações de uso. A avaliação do desempenho do sistema foi feita sob três condições; com o sistema em balanço, sem a carga do usuário, e com a carga do usuário.

Os experimentos realizados com o sistema em balanço, consistiram em acomodar o veículo em apoios de forma que as rodas ficassem livres sem a influência do peso. Já os testes sem usuário foram feitos com o veículo no solo sendo conduzido através do guidão por um condutor que não está sobre o veículo. Já os testes com usuário são realizados com o veículo em solo transportando um usuário e atendendo as suas demandas de locomoção.

Importante ressaltar que a sequência com que os testes são apresentados neste capítulo não representam exatamente a ordem com que foram executados. A ordem dos experimentos foi muito importante no ajuste dos parâmetros do controlador. O primeiro teste a ser realizado para o ajuste dos parâmetros foi o teste de condução sem usuário, depois o teste com usuário e por final os testes com veículo em balanço. Se o resultado de alguma dessas etapas não fosse satisfatório, os parâmetros eram reajustados e os testes refeitos.

Estes experimentos foram realizados no Laboratório de Instrumentação e Controle da UFPB (LINC) e nos corredores do prédio onde este laboratório está inserido.

6.2 EXPERIMENTO COM SISTEMA EM BALANÇO

Os testes realizados nesta seção foram obtidos com o sistema em balanço, ou seja, o veículo foi colocado sobre um apoio de forma que as rodas girassem livremente sem a influência do peso do usuário e do próprio veículo.

Estes experimentos foram realizados para se observar o comportamento do controlador para algumas referências fixas, estabelecendo-se as referências de forma controlada, sem a ação do giroscópio, pois a movimentação manual do mesmo poderia gerar um sinal de referência instável e assim prejudicar a avaliação do comportamento do controlador.

As referências foram geradas em forma de degrau, uma para cada roda do sistema tentando simular situações de deslocamento para frente, para trás em velocidades diferentes além de curvas para direita e esquerda e giros em torno do próprio eixo.

6.2.1 Experimento 1

Neste experimento estabeleceu-se duas referências iniciais do tipo degrau, de 10 rpm e de 20 rpm, uma referência para cada roda, conforme pode-se observar na Fig. 6.1. Neste gráfico são mostrados os valores de referência para cada roda; valor de rotação de cada roda (sinal a ser controlado) e o valor de porcentagem do PWM que resulta da ação de controle.

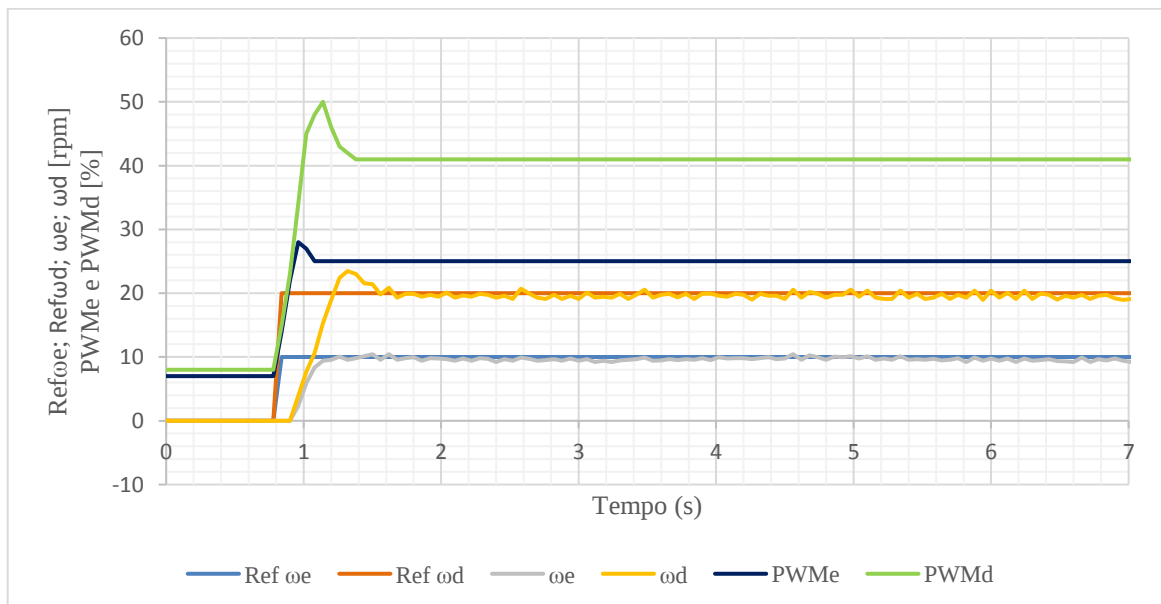


Figura 6.1 – Gráfico de controle de rotação para 10 e 20 rpm.

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar, neste gráfico, que o controlador conseguiu controlar de forma satisfatória a rotação de cada roda. Para a referência de 10 rpm não observou-se sobressinal e o tempo de assentamento de aproximadamente 0,4 s. Já a referência de 20 rpm, a resposta apresentou sobressinal e um tempo de assentamento de 0,8 s.

Observou-se a presença de um erro percentual médio dos valores de rotação de aproximadamente 4,74%, entretanto, foi fácil observar que o controlador apresentou melhor desempenho na rotação de 10 rpm.

Observa-se também, que quando a referência chega a zero, o sinal de rotação também vai a zero, porém o sinal de PWM não é anulado, ficando aproximadamente em 4% do valor de PWM. Isso acontece pela característica do controlador ser incremental, ou seja, ele vai incrementar ou decrementar até que se alcance a referência e esta característica auxilia o controlador a vencer a zona morta do motor CC, onde se precisa de uma certa quantidade de energia para vencer a inércia do motor.

Este resultado mostra a capacidade do veículo em mover-se para frente, como também a capacidade do veículo em fazer curvas, pois mostrou-se ambas as rodas se movendo para frente e em velocidades diferentes.

6.2.2 Experimento 2

Neste experimento foi estabelecido duas referências do tipo degrau escalonado, de 15, 30 e 45 rpm, para uma roda e -15, -30 e -45 rpm para outra, conforme pode-se observar na Fig. 6.2. Assim como no gráfico anterior são mostrados os valores de referência para cada roda, o valor de rotação de cada roda (sinal a ser controlado) e o valor de porcentagem do PWM de cada roda que resultou da ação de controle.

O objetivo deste experimento é mostrar a capacidade do veículo em mover-se para trás devido a rotação negativa, como também a capacidade do veículo em fazer girar em torno do próprio eixo. Este tipo de teste também permitiu avaliar o comportamento do controlador a eventuais solicitações de mudança de velocidade, que é algo muito comum neste tipo de veículo.

É possível observar neste gráfico que o controlador conseguiu controlar de forma satisfatória a rotação de cada roda sem apresentar sobressinal com um tempo de assentamento médio de 1 s para as duas rotações. Obteve-se também, um erro percentual médio dos valores de rotação de aproximadamente 1,99%.

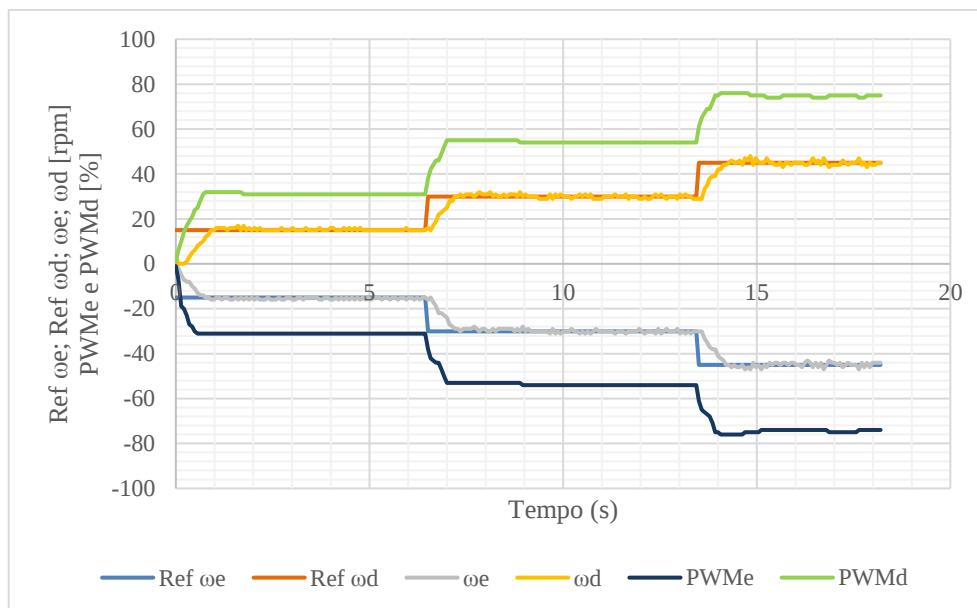


Figura 6.2 – Gráfico de controle da rotação dos motores para uma excitação degrau escalonado.

Fonte: Autoria própria

6.3 EXPERIMENTO SEM O PESO DO USUÁRIO

O experimento sem usuário teve como objetivo avaliar o comportamento do controle diante das diversas solicitações que um usuário pode fazer. Para isso; o veículo foi colocado sobre o solo para que pudesse efetuar diversos percursos e assim testar diversas situações que pode ser demanda por um usuário. É importante lembrar que este tipo de teste coloca sobre as rodas o peso do próprio veículo que é de aproximadamente 27 kg.

6.3.1 Experimento 3

Neste experimento a referência é gerada pelo giroscópio através da movimentação do guidão e da plataforma; como o veículo não possui usuário, é possível alterar as inclinações da plataforma e do guidão apenas guiando o veículo.

Como pode-se observar na Fig. 6.3, o gráfico é constituído pelas referências de rotação, para cada roda, e a rotação de cada roda. São realizadas movimentações para frente, para trás, curvas e giros, no entanto este gráfico representa apenas uma parte do teste realizado, pois se colocássemos o experimento inteiro, muitos detalhes não seriam visíveis no gráfico.

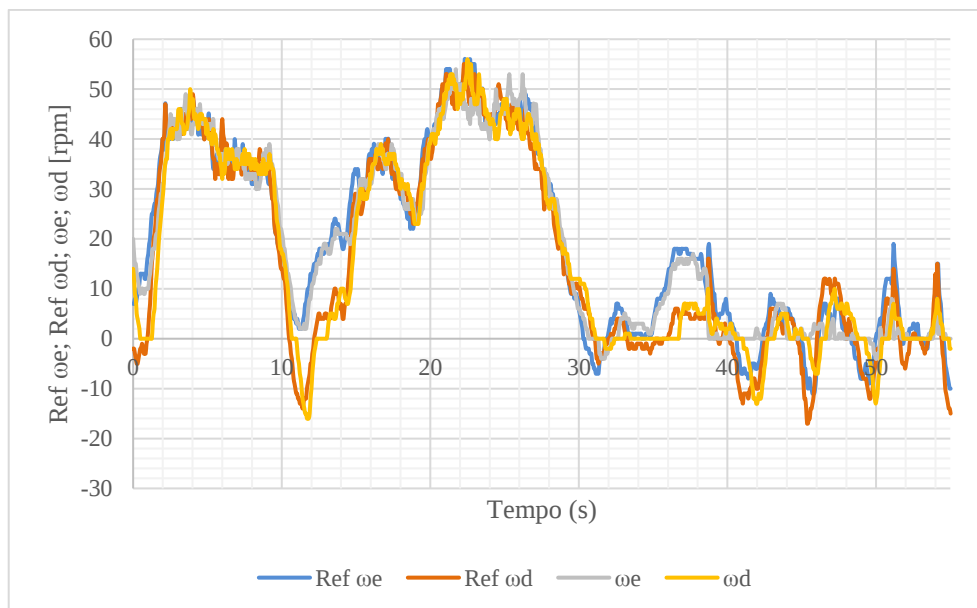


Figura 6.3 –Gráfico do controle de rotação para veículo sem usuário
Fonte: Autoria própria

Pode-se observar na Fig. 6.3 que o controlador é capaz de fazer com que a rotação acompanhe de forma satisfatória a referência. Diferente do experimento 1, onde a referência é constante, neste, a referência está sempre variando e isso gera uma dificuldade a mais para o controlador.

Percebeu-se também, um certo atraso da rotação em relação a referência, que já era esperado mediante as características do protótipo, por exemplo, no tempo aproximado de 11s pode-se observar que a rotação ω_d vai para zero e gera um atraso de tempo para tentar corrigir o erro em relação a referência; isso se deve ao tempo necessário para o controlador incrementar o PWMd e assim atingir a energia necessária para vencer a inércia da roda.

6.4 EXPERIMENTO COM USUÁRIO SOBRE A PLATAFORMA

Os experimentos mostrados nesta parte do capítulo foram feitos com o veículo em solo transportando um usuário de 90Kg. O usuário comanda o veículo através do guidão e da inclinação da plataforma, ou seja, a determinação da referência é feita pelo giroscópio que é o responsável por captar as solicitações do usuário e informar ao controlador para que o mesmo consiga atender as essas demandas de locomoção do usuário mantendo em equilíbrio sobre a plataforma.

Os experimentos mostrados aqui foram realizados dentro do próprio Laboratório, espaço reduzido, com intuito de testar o veículo em ambientes pequenos e que necessitam de maior controle e manobrabilidade e também nos corredores de acesso onde o espaço era maior e possibilitava atingir maiores velocidades e realizar combinações de manobra que o espaço reduzido não possibilitaria. É importante ressaltar que o solo dos ambientes de teste, eram planos e sem buracos. Na Fig. 6.4 mostra-se o veículo em uso tanto dentro do laboratório (a) quanto no corredor (b).



(a)



(b)

Figura 6.4 – Veículo em uso nos ambientes a) com espaço reduzido e b) com espaço amplo
Fonte: Autoria própria

6.4.1 Experimento 4

No experimento 4, procura-se mostrar a capacidade do veículo em se locomover para frente, para trás e parar mediante comandos do usuário. Nos gráficos desta seção a inclinação da plataforma denotada através de θ , quando positivo, indica uma inclinação da plataforma para frente e, conseqüentemente, quando negativo indica que a plataforma foi inclinada para trás. Da mesma forma a inclinação do guidão será denotada pelo símbolo α e o seu valor positivo ou negativo indica a intenção de movimentar-se para direita ou para esquerda, através da diferença de rotação entre as rodas do veículo. Durante este experimento tentou-

se mexer o mínimo possível no guidão para que fosse possível analisar apenas a movimentação para frente e para trás do veículo.

As Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 fazem parte do mesmo experimento e foram separadas em três com intuito de analisar melhor o comportamento do controlador.

Na Figura 6.5 mostra-se a inclinação da plataforma (θ), a inclinação do guidão (α), o sinal de referência gerado (Ref ω_e) e o valor de rotação para roda esquerda (ω_e).

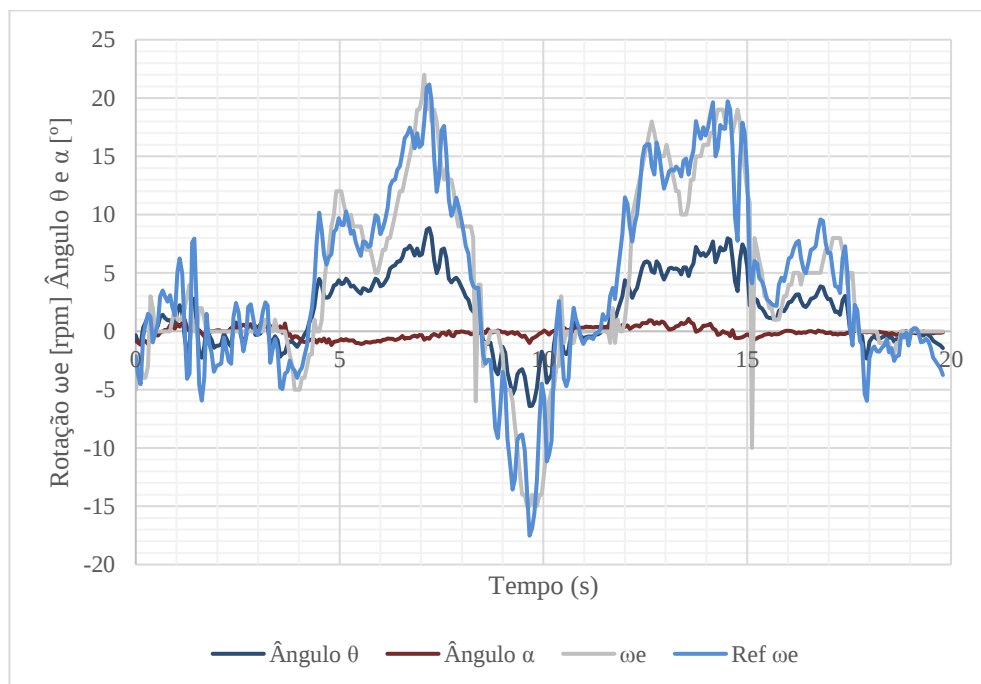


Figura 6.5 – Gráfico do controle de movimentação para frente e para trás da Roda esquerda
Fonte: Autoria própria

Pode-se observar na Fig. 6.5 que o sinal de referência oscila bastante e isso se deve a necessidade de correção do equilíbrio, equilíbrio esse, promovido pelo conjunto usuário e veículo. Mesmo com essa oscilação na referência, o controlador conseguiu acompanhar o sinal de forma satisfatória, mesmo percebendo que existe um certo atraso, maior do que no experimento 3, devido ao peso do usuário.

Pode-se observar neste experimento que entre 0 e aproximadamente 4 segundos o veículo fica “parado”. Logo depois inicia o movimento para frente até aproximadamente 8 segundos, quando em seguida, inicia o movimento para trás. A movimentação para trás dura menos tempo devido à dificuldade deste tipo de movimento. Em seguida iniciou-se o movimento para frente novamente até que em aproximadamente 18 s o veículo para.

Na Figura 6.6 representa-se o mesmo experimento para a roda direita, com o objetivo de mostrar que o controlador obteve comportamento semelhante e igualmente satisfatório ao da roda esquerda.

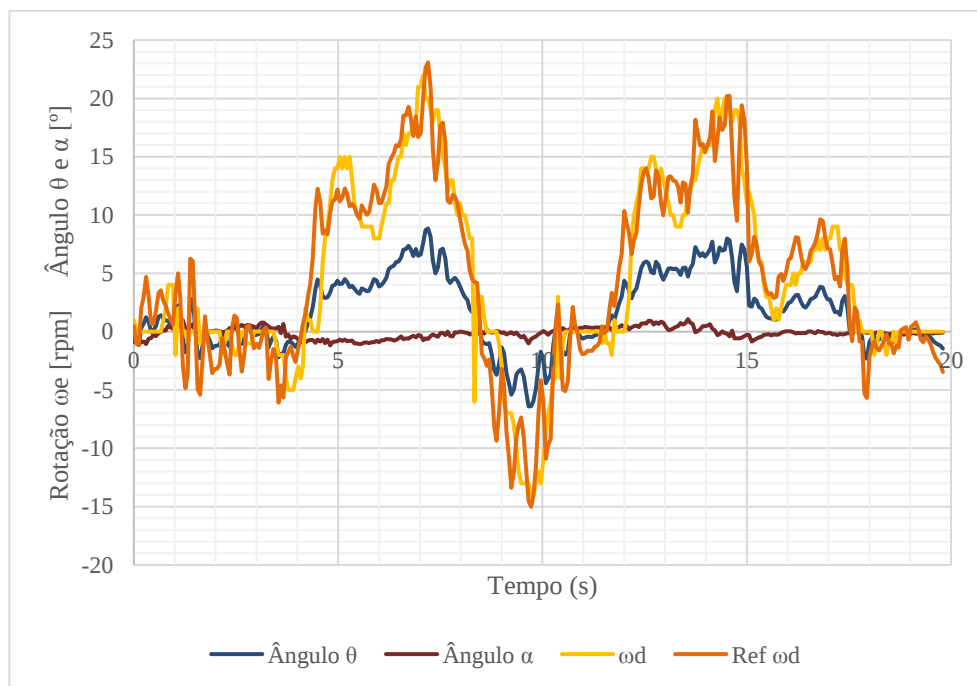


Figura 6.6 – Gráfico do controle de movimentação para frente e para trás da Roda direita
Fonte: Autoria própria

Em seguida, retirou-se as referências (Ref ω_e e Ref ω_d) e colocou-se as duas rotações, ω_e e ω_d , com as inclinações da plataforma (θ) e a inclinação do guidão (α) para tornar possível analisar a movimentação do veículo em função das inclinações geradas pelo giroscópio.

Observou-se na Figura 6.7 que alguns pontos houve uma diferença de rotação entre as rodas, que entende-se ter sido devido a uma pequena variação na inclinação do guidão, pelo fato de que a operação do veículo depende do usuário. Logo vemos que aproximadamente entre o segundo 4 e 6, houve uma pequena movimentação no guidão, α negativo, o que provocou uma diferença de rotação entre as rotações neste trecho, ficando a rotação da roda esquerda menor do que a rotação da roda direita.

Entre os segundos 12 e 15 observou-se uma pequena variação da inclinação do guidão, desta vez um α positivo o que acarretou em uma rotação da roda esquerda (ω_e) maior do que a roda direita (ω_d), mostrando que o veículo é capaz de realizar curvas.

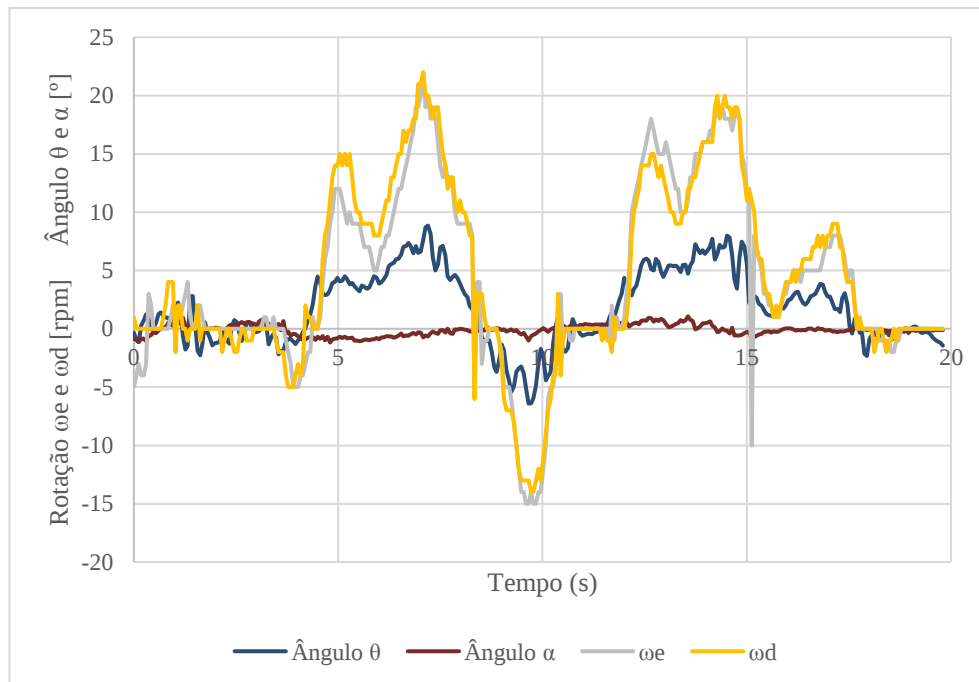


Figura 6.7 – Gráfico de controle de movimentação para frente e para trás ambas rodas
Fonte: Autoria própria

6.4.2 Experimento 5

Este experimento tem por objetivo mostrar a capacidade do veículo em realizar giros em torno do próprio eixo em ambos os sentidos. Na Fig. 6.8 mostra-se uma sequência de fotos enumeradas de modo a facilitar o entendimento do movimento.

Este tipo de movimento é muito importante em espaços reduzidos, pois possibilita ao usuário escolher qualquer direção utilizando um espaço reduzido, sem a necessidade de realizar um conjunto de manobras para alcançar seu propósito. Este tipo de manobra é mostrado na Fig. 6.8., onde observou-se que o protótipo realizou essa tarefa com o desempenho esperado.

Neste experimento tentou-se manter o ângulo da plataforma (θ) perto de zero e então variou-se o ângulo do guidão (α) para a direita e esquerda com intuito de provocar uma variação positiva e negativa na referência.

Na Figura 6.9 estão representadas as inclinações da plataforma e do guidão, as referências geradas para cada roda, bem como a rotação que o controlador impôs para cada roda.

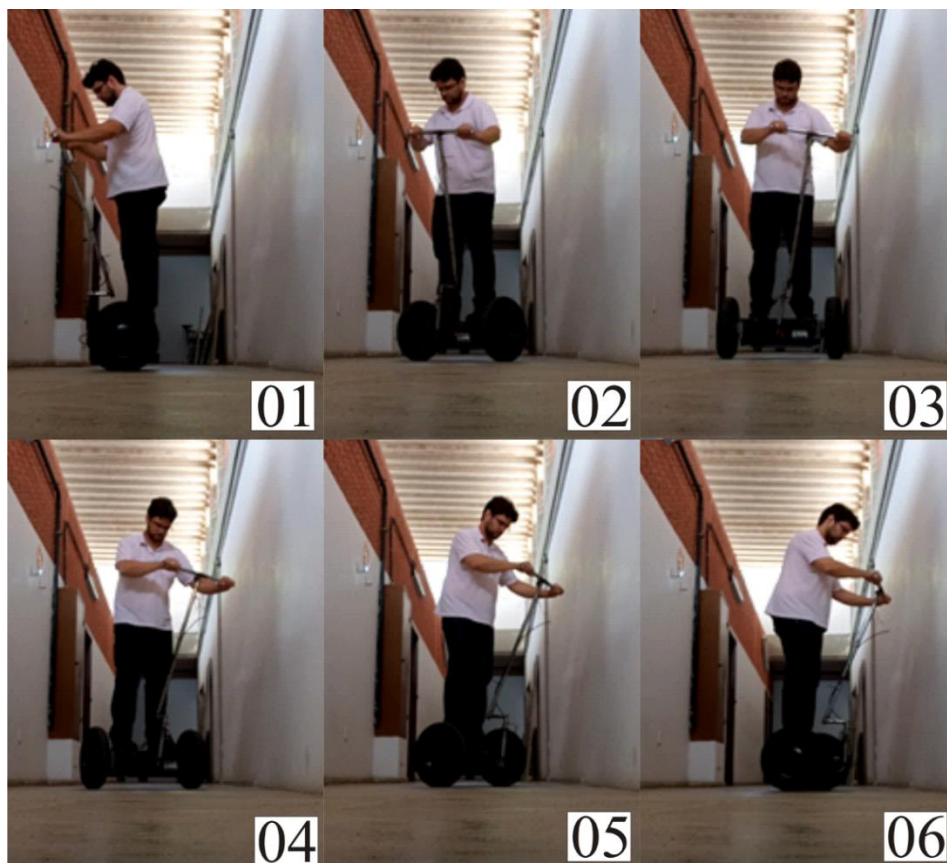


Figura 6.8 – Movimento de giro em torno do próprio eixo
Fonte: Autoria própria

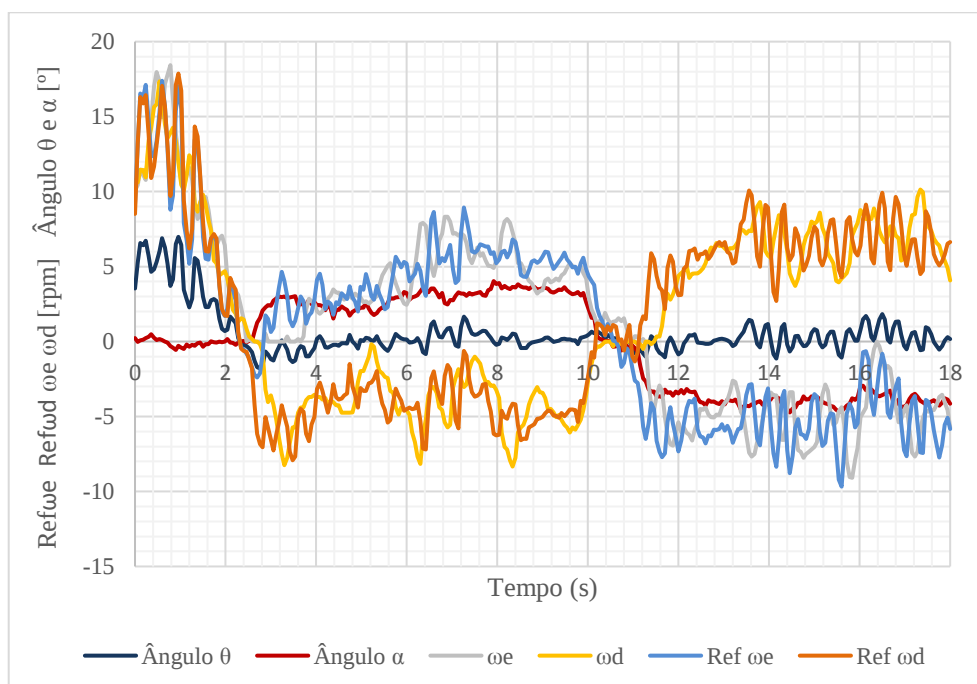


Figura 6.9 – Gráfico de controle de giro em torno do próprio eixo
Fonte: Autoria própria

Observou-se, também, que o sinal de referência oscila bastante, devido à grande oscilação do ângulo da plataforma (θ). Estas oscilações são geradas devido a presença do usuário que não se mantém imóvel sobre a mesma.

Observando a Fig. 6.9 pode-se observar que o ângulo da plataforma (θ) oscilou em torno de zero e o ângulo do guidão (α) apresentou pequena oscilação. Logo, como o sinal de referência é influenciado mais fortemente pelo ângulo da plataforma, a oscilação de θ se refletiu no sinal de referência. Outro fator que pode-se observar é que as rotações envolvidas neste experimento são pequenas o que ajuda a evidenciar as oscilações.

Mesmo com bastante oscilação, percebe-se que o controlador conseguiu acompanhar as referências, com um certo atraso, mas que na prática atendeu satisfatoriamente ao comando do usuário, girando em torno dos dois eixos e mantendo o equilíbrio.

6.4.3 Experimento 6

Este experimento tem como finalidade mostrar que o veículo proposto tem a capacidade, com um usuário de 90 kg, de concatenar todas as manobras citadas anteriormente. Para isso é proposto um percurso, mostrado na figura 6.10, que engloba a maioria das manobras citadas até aqui.

O percurso se inicia com uma movimentação para frente seguida de uma parada e uma outro deslocamento para frente. Após isso, paramos e executamos um giro em torno do próprio eixo de 180° e então deslocamos novamente para frente e realizamos uma curva de 90° . A Figura 6.10 mostra graficamente como foi realizado este percurso.

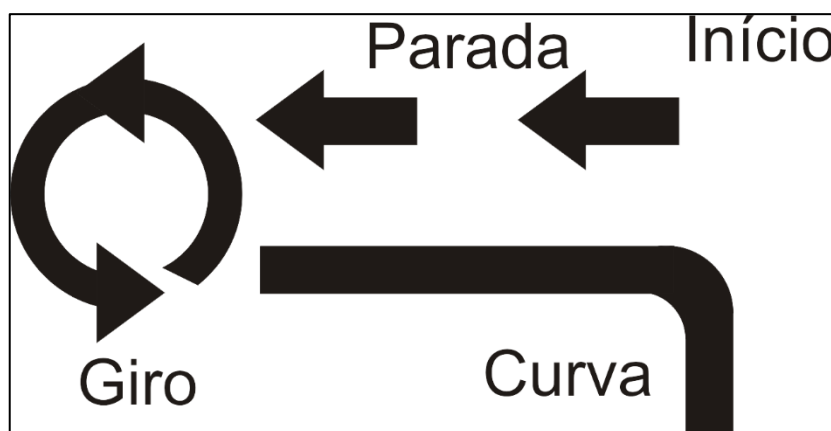


Figura 6.10 – Percurso executado pelo veículo no experimento 6
Fonte: Autoria própria

Na Fig. 6.11 é expressado graficamente o resultado do experimento do percurso, mostrando as inclinações da plataforma e do guidão e as rotações das rodas obtidas pelo controlador.

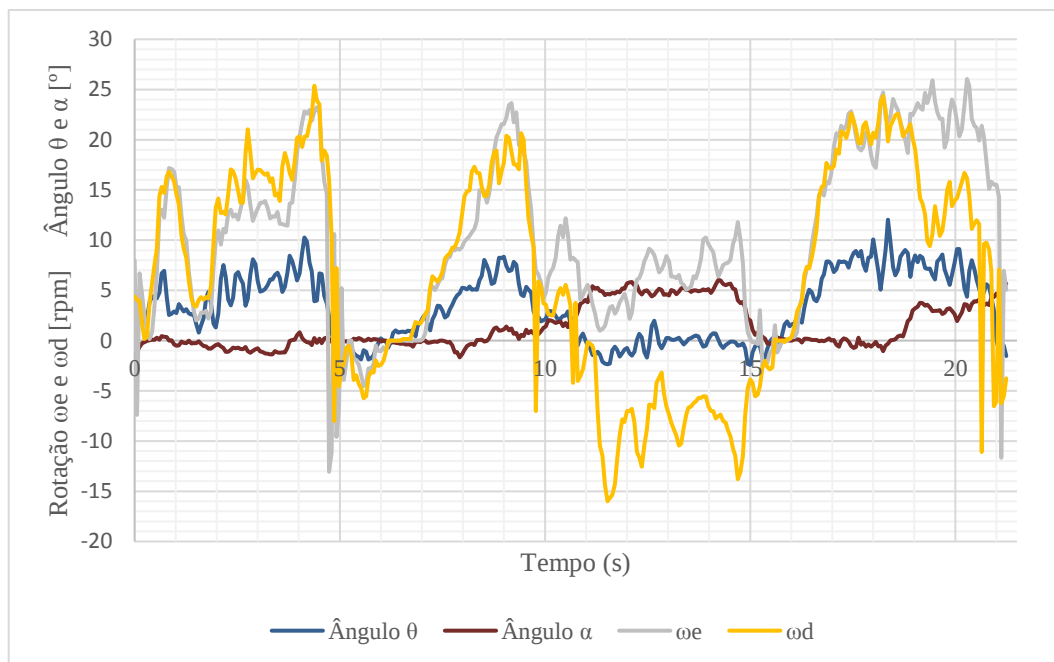


Figura 6.11 – Gráfico de comportamento do veículo no percurso do experimento 6
Fonte: Autoria própria

Pode-se observar na Fig. 6.11 que no período de tempo de 0 a 5 segundos executou-se a primeira movimentação para frente, ângulo do guidão próximo de zero com inclinação para frente da plataforma. Logo em seguida parou-se e por volta do sétimo segundo iniciou-se o movimento para frente novamente.

No décimo primeiro segundo iniciou-se o giro de 180° e como pode-se observar, a inclinação da plataforma oscila em torno do zero enquanto a inclinação do guidão gera a diferença de rotação entre as rodas. Já no décimo sexto segundo iniciou-se o deslocamento para frente quando no décimo nono segundo iniciou-se a curva de 90°. Pode-se perceber que na curva existe tanto uma inclinação da plataforma (θ), quanto no guidão (α).

Na Fig. 6.12 é apresentado o mesmo experimento, porém agora, mostra-se a referência gerada para a roda esquerda (Ref ω_e) e a rotação obtida pela roda esquerda (ω_e), com intuito de analisar o comportamento do controlador.

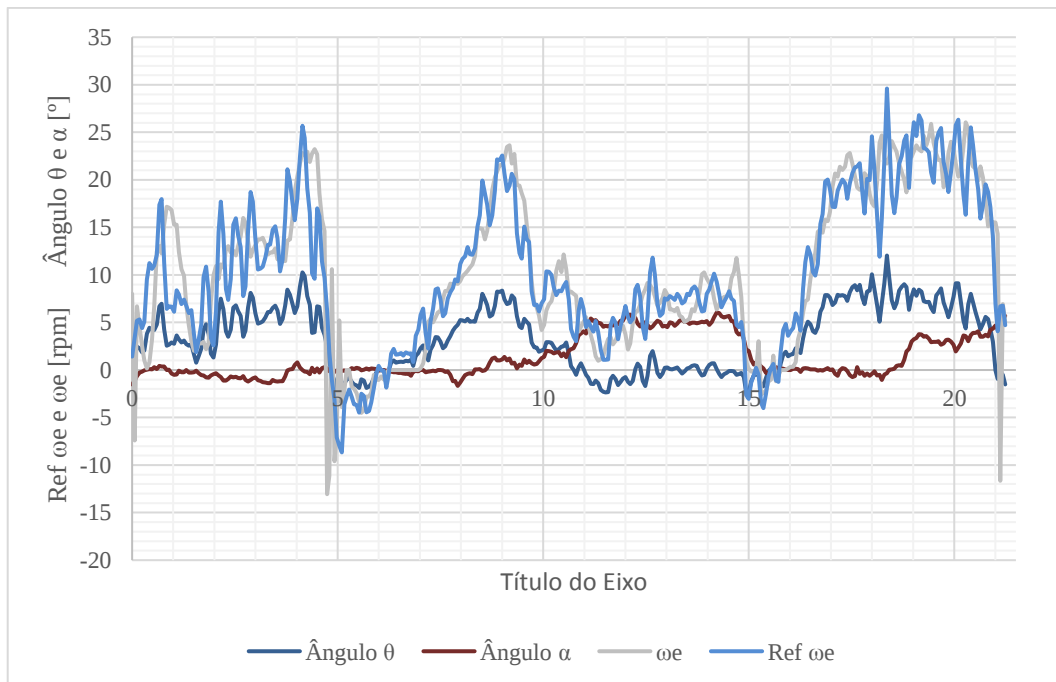


Figura 6.12 – Gráfico de controle da roda esquerda no percurso
Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que o controlador conseguiu acompanhar a referência gerada para a roda esquerda de forma satisfatória, mesmo com as oscilações presentes. O comportamento do controlador para a roda direita é semelhante e por isso optou-se por não colocar o gráfico da roda direita, mas, constatou-se que o controlador conseguiu atuar de forma satisfatória em ambas rodas.

CAPÍTULO VII

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se um controlador inteligente baseado em Lógica Fuzzy, para comandar um protótipo Segway com intuito de atender as solicitações de locomoção do usuário, utilizando para isso uma instrumentação de baixo custo.

Um outro fator importante é que este tipo de veículo possui uma modelagem matemática muito complexa pois, além de ser um sistema não-linear, possui variáveis, que muitas vezes são difíceis de se determinar na prática. Logo, por meio deste trabalho, do controle do sistema, confirmou-se uma das características que mais se destaca na Lógica Fuzzy, que é construir um controlador sem a necessidade da equação da planta, apenas baseado no conhecimento do fenômeno físico e/ou com base no conhecimento do operador. Este trabalho foi desenvolvido com base no conhecimento físico do fenômeno e através de muita observação de outros veículos já construídos através de vídeos.

Diante do exposto ao longo do trabalho observamos que a estratégia do controlador Fuzzy PD Incremental conseguiu diminuir os efeitos causados pela inercia do sistema e a influência da variação de energia da bateria no controlador, no entanto não conseguiu elimina-los como podemos observar nos experimentos.

Destacamos que o controlador Fuzzy mostrou ser uma ferramenta eficaz para o atender as diversas solicitações de locomoção do usuário conservando o equilíbrio. No entanto a velocidade máxima alcançada no protótipo, aproximadamente 12Km/h, foi inferior as velocidades encontradas nos Segway's comerciais que é de 20Km/h, essa limitação se dá devido a relação existente entre a determinação da referência e o ângulo da plataforma.

Observa-se também que o controlador Fuzzy proposto conseguiu controlar o sistema nas referências demandadas, sendo elas do tipo degrau e degrau escalonado, com erro percentual aceitável na literatura e com tempos de assentamento satisfatórios.

Verificou-se também que o controlador obteve boas respostas quando as referências foram geradas mediante variações dos ângulos da plataforma (θ) e do guidão (α) com peso do próprio veículo e com o peso de um usuário de 90 kg.

Por causa das restrições sanitárias que passamos durante a realização deste trabalho, a realização de experimentos com outros usuários ficou prejudicada, não permitindo concluir o tamanho da curva de aprendizado do usuário para utilizar o veículo com segurança. Logo pode-se concluir que para utilizar o protótipo se faz necessário treino e que o tempo de treino vai depender de cada usuário.

Quanto a instrumentação utilizada no veículo, pode-se dizer que a combinação Arduino e Raspiberry, fornece um elevado potencial para desenvolver soluções com custo baixo, por exemplo, neste mesmo protótipo pode-se colocar outros tipos de controladores sem a necessidade de mexer na instrumentação. Logo pode-se concluir que a instrumentação do protótipo é satisfatória.

7.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação evidenciou um universo de possibilidades e aplicações que podem ser desenvolvidas ainda neste protótipo ou na construção de outro. A seguir apresenta-se algumas propostas para trabalhos futuros:

- Fazer a aplicação de células de carga onde o usuário se posiciona, para propor melhorias no controle, que vão desde tentar antecipar o movimento do usuário que uma possível adaptação no controlador mediante o peso do usuário;
- Fazer o controle do veículo mediante célula de carga, ou seja, ela substitui o giroscópio e o usuário comanda o veículo com inclinação do corpo, que reflete na distribuição do peso nos pés.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ANJOS, I. M. dos. **Sistema de controle Fuzzy para veículo elétrico de duas rodas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – PPGEE, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- ARNOLDO, Castro. **Modeling and dynamic analysis of a two wheeled inverted-pendulum**. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola de Engenharia Mecânica George W. Woodruff, Atlanta, EUA, 2012.
- ASTROM, K.J.; FURUTA, K. (2000).Swinging up a pendulum by energy control. **Automatica**, v. 36-2, p. 287-295. ISSN 0005-1098, doi:10.1016/S0005-1098(99)00140-5.
- AZIZAN, H., JAFARINASAB, M., BEHBAHANI, S., & DANESH, M. (2010). Fuzzy control based on LMI approach and fuzzy interpretation of the rider input for two wheeled balancing human transporter. **IEEE ICCA**, Xiamen, China doi:10.1109/icca.2010.5524327
- BABAZADEH, R. GOGANI, K.A. AZMI, H. (2016). Optimal control of Segway personal transporter, **4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)**, Qazvin, Iran, 2016, p. 18-22, doi: 10.1109/ICCIAutom.2016.7483129.
- BEZERRA, S.T.M., **Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia**. 2009. Tese (Doutorado.em Engenharia Mecânica)- PPGEM, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

- CAMBOIM. W.L.L., **Aplicações de técnicas de controle Fuzzy para sistemas de abastecimento de água**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPGEM, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.
- CAZZOLATO, B., HARVEY, J., DYER, C., FULTON, K., SCHUMANN, E., ZHU, T., PRIME, Z., DAVIS, B., & HART, S & PEARCE, E. (2011). Modeling, simulation and control of an electric diwheel. **Australasian Conference on Robotics and Automation**. Melbourne, ACRA 2011.
- CHANTARACHIT, S. (2019). Development and Control Segway by LQR adjustable Gain. **IEEE International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)**. Yogyakarta, Indonesia doi: 10.1109/icoiact46704.2019.8938489
- CHIU, C.; CHANG, C. (2014). Wheeled human transportation vehicle implementation using output recurrent fuzzy control strategy. **IET Control Theory & Applications**. p. 1886-1895. doi:10.1049/iet-cta.2014.0243.
- CHIU, C.; PENG, Y. (2017). Position and angle control for a two-wheel robot. **International Journal of Control, Automation and Systems**. 15. P. 2343-2354. doi:10.1007/s12555-015-0396-1.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H., **Sistemas de controle moderno**. 8 ed. São Paulo, LTC, 2001.
- DRAZ, M. U.; ALI, M. S.; MAJEED, M.; EJAZ, U.; IZHAR, U. (2012). Segway electric vehicle. **IEEE 2012 International Conference of Robotics and Artificial Intelligence**. Rawalpindi, Pakistan. doi:10.1109/icrai.2012.6413423
- FU, Z.; WANG, N.; SONG, S.; & WANG, T. (2020). Adaptive Fuzzy Finite-Time Tracking Control of Stochastic High-Order Nonlinear Systems With A Class of Prescribed Performance. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**. doi: 10.1109/tfuzz.2020.3032776

- GOHER, K.; TOKHI, M.; SIDDIQUE, N. (2011). Dynamic modeling and control of a two wheeled robotic vehicle with a virtual payload. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**. Vol. 6.
- GOMES, H.P. **Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética**. João Pessoa. Editora Universitária, 1ª Ed.UFPB. 2009. 460p.
- GRASSER, F.; D'ARRIGO, A.; COLOMBI, S.; RUFER, A. (2002). JOE: A Mobile, Inverted Pendulum, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol 49, no 1, pp. 107-114, doi: 10.1109/41.982254;
- HA, H.-W.; YOON, H.-N.; KIM, Y.-K.; LEE, D.-H.; LEE, J.-M. (2015). Model Prediction Control of Two Wheeled Mobile Manipulator. In: Liu H., Kubota N., Zhu X., Dillmann R., Zhou D. **Intelligent Robotics and Applications**. ICIRA 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9245. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-22876-1_15
- HUANG, J.; Ri, M.; Wu, D.; Ri, S. (2018). Interval Type-2 Fuzzy Logic Modeling and Control of a Mobile Two-Wheeled Inverted Pendulum. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 26, no. 4, pp. 2030-2038. doi: 10.1109/TFUZZ.2017.2760283
- JANTZEN, J., **Foundations of Fuzzy Control**. 1 ed. John Wiley & Sons ltd, England, 2007.
- JÚLIO, E. F. X. **Controlador Fuzzy aplicado a um Sistema de controle de posição acionado por motores de indução trifásicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPGEM, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.
- KAMATA, M. SHINO, M.. (2006). Mobility Devices For The Elderly - "Silver Vehicle" Feasibility. **IATSS Research**. 68. **IATSS Research**. 68. 10.1016/S0386-1112(14)60155-2.

- KAMIDE, N. (2020). Sequential Fuzzy Description Logic: Reasoning for Fuzzy Knowledge Bases with Sequential Information, **IEEE 50th International Symposium on Multiple-Valued Logic**, Miyazaki, Japan, pp. 218-223, doi: 10.1109/ISMVL49045.2020.000- 2
- KIM, H. W; JUNG, S.(2016) Control of two-wheel robotics vehicle for personal transportation, **Robotica**, v. 34, p.1186-1208. doi:10.1017/S0263574714002173
- LI, J.; GAO, X.; HUANG, Q.; DU, Q.; DUAN, X. (2007). Mechanical Design and Dynamic Modeling of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, **IEEE International Conference on Automation and Logistics**, Jinan, China, p. 1614-1619, doi: 10.1109/ICAL.2007.4338830.
- MAMANI, César R. Ch.; **Projeto e controle robusto de um transportador pessoal robótico auto-equilibrante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 2010.
- MENDONÇA, K. H., **Sistema de controle fuzzy na operação otimizada de redes setorizadas com bombeamento direto**. 2016. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica) –PPGEM, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- NAKAGAWA, C.; NAKANO, K.; SUDA, Y.; HIRAYAMA, Y. (2010) Proposal of personal mobility vehicle based on stabilization control of two-wheel steering and two-wheel driving. **Symposium on the Dynamics and Control of Single Track Vehicles**. Netherlands
- NAKAGAWA, C.; SUDA, Y.; NAKANO, K.; TAKEHARA, S. (2009) Stabilization of a bicycle with two-wheel driving by driving force at low speed. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 23, p.980-986. 2009. doi: 10.1007/s12206-009-0325-4

- NAWAWI, S. W.; AHMAD, M. N.; OSMAN, J. H. S. (2007). Development of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, **5th Student Conference on Research and Development**, Malaysia. pp. 1-5, doi: 10.1109/SCORED.2007.4451379.
- OGATA, K., **Engenharia de controle moderno**. 4 ed. São Paulo, Prentice Hall. 2003.
- PEREIRA, Bruno Luiz, **Aplicação de sistemas neuro-fuzzy e evolução diferencial na modelagem e controle de veículo de duas rodas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, 2017. doi: 10.14393/ufu.di.2017.46
- PHAN, D.; BAB-HADIASHAR, A.; FAYYAZI, M.; HOSEINNEZHAD, R.; JAZAR, R. N.; KHAYYAM, H. (2020). Interval Type-2 Fuzzy Logic Control for Energy Management of Hybrid Electric Autonomous Vehicle. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, doi:10.1109/tiv.2020.3011954
- REN, T-J.; CHEN, T-C.; CHEN, C-J. (2008). Motion Control for a Two-Wheeled Vehicle Using a Self-Tuning PID Controller. **Control Engineering Practice**. V.16. p. 365-375. doi:10.1016/j.conengprac.2007.05.007.
- SAKATA, T., NAGAI, I., WATANABE, K. (2017). Improvements of one-wheel driven personal mobility for use on a public road. **International conference on Mechatronic and automation**. pp. 525-530. doi:10.1109/ICMA.2017.8015872
- SAKATA, T., NAGAI, I., WATANABE, K. (2019). Development of a foldable personal mobility vehicle with one drive wheel. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 619. 012047. doi:10.1088/1757-899X/619/1/012047
- SHHEIBIA, T. A. A. E. **Controle de um braço robótico utilizando uma abordagem de agentes inteligentes**. Dissertação (Mestrado em Informática) – COPIN, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande. 2001.

- SILVEIRA, P. C. R. **Robô Baseado em Tecnologia Celular Android e Lógica Nebulosa para Inspeção e Monitoração em Usinas Nucleares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2012.
- SIMÕES, M. G., SHAW, I. A., **Controle e Modelagem Fuzzy**. 1. ed. São Paulo, Editora Blücher Ltda. 2007.
- TASUKU, H.; YAZAWA, M.; NAGANUMA, R.; TAKADA, K. (2016). Design and implementation of a personal mobility of single spherical drive. **Journal of Physics: Conference Series**, V. 744. doi: 10.1088/1742-6596/744/1/012211
- TSAI, C., HUANG, H., LIN, S. (2010). Adaptive Neural Network Control of a Self-Balancing Two-Wheeled Scooter. **Industrial Electronics**, IEEE Transactions on. 57. 1420 - 1428. 10.1109/TIE.2009.2039452, 2010.
- YOUNIS, W., ABDELATI, M. (2009). Design and Implementation of an Experimental Segway Model. **Conference on Intelligent Systems and Automation**. 1107. doi: 10.1063/1.3106501.
- ZHANG, Y.; ZHANG, L.; WANG, W.; LI, Y.; ZHANG, Q. (2018). Design and Implementation of a Two-Wheel and Hopping Robot with a Linkage Mechanism. **IEEE Access**, vol. 6, pp. 42422-42430. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2859840