

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**ESTRATÉGIA DE MODELAGEM DA DINÂMICA DE
CONTROLADORES PARA CONTROLE DE AGV**

DIOGO PUPPIM DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. ORIDES MORANDIN JUNIOR

São Carlos - SP

Julho/2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**ESTRATÉGIA DE MODELAGEM DA DINÂMICA DE
CONTROLADORES PARA CONTROLE DE AGV**

DIOGO PUPPIM DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação, área de concentração: Inteligência Artificial.

Orientador: Prof. Dr. Orides Morandin Junior

São Carlos - SP

Julho/2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Diogo Puppim de Oliveira, realizada em 18/07/2018:

Prof. Dr. Orides Morandin Junior
UFSCar

Prof. Dr. Marcelo Becker
USP

Prof. Dr. Roberto Santos Inoue
UFSCar

Dedico esta conquista à minha esposa Janice por todo apoio e amor incontestável.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus primeiramente, a meus colegas de laboratório Malcon e Igor pela amizade nesse período e, principalmente, ao Flavio, por todo apoio e brincadeiras que tornaram o ambiente do laboratório extremamente animado.

Agradeço meu orientador e amigo Dr. Orides Morandin Junior, por todos os ensinamentos, pelo profissionalismo e por estar sempre presente me ajudando em todas as etapas de forma tão atenciosa.

Agradeço especialmente à minha esposa Janice Da Penha Alberti Puppim de Oliveira, sem seu apoio não teria sido possível, somente ela sabe o quanto foi difícil esses dois anos longe de casa, serei eternamente grato a ela pelo seu amor.

Aos docentes do Departamento de Computação pelos ensinamentos.

A CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Em ambientes industriais é imprescindível a utilização da robótica para prover uma resposta eficiente e dinâmica às demandas desse setor. Em particular, por meio do uso de AGV (Automated Guided Vehicle), robôs industriais para transporte de materiais em meios internos e externos no setor industrial. As realizações das atividades estabelecidas exigem um sistema de sensoriamento, navegação e controle do veículo por meio dos atuadores. Estes sistemas podem ser representados por modelagem matemática e simulados, por meio de softwares específicos. Este trabalho tem como objetivo a representação da dinâmica dos AGV's por emprego do modelo da dinâmica dos atuadores dos veículos que serão representados em um ambiente virtual modelado no Unity3D. Essa estratégia tem o intuito de contribuir no processo de sintonização do veículo real por utilização da sintonização feita no ambiente simulado empregada no ambiente real.

Palavras-chave: AGV, Automated Guided Vehicle, Modelagem Matemática, Simulação, Unity 3D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Configuração do AGV.	17
Figura 1.2 – Inserção do Projeto.....	20
Figura 2.1 – Configuração cinemática do AGV.....	26
Figura 2.2 – Ponto de contato da roda ao chão.....	27
Figura 2.3 – Representação do motor CC	31
Figura 2.4 - Diagrama de Blocos do Motor DC.....	33
Figura 2.5 – Gráficos da função de pertinência em relação ao erro de orientação.....	35
Figura 2.6 – Estrutura do controlador Fuzzy Mamdani.....	37
Figura 2.7 – Representação da superfície dos objetos 3D.....	40
Figura 2.8 – Arquitetura do Gazebo.	42
Figura 2.9 – Arquitetura do ARGoS.....	43
Figura 2.10 – Estágios de desenvolvimento Webots.....	44
Figura 2.11 – Arquitetura do V-Rep	45
Figura 2.12 – Física Vortex.....	46
Figura 4.1 – Motor de Jogos Unity3D.....	55
Figura 4.2 – Diagrama de blocos Motor CC com perturbações.....	57
Figura 4.3 – Diagrama de Blocos do Sistema de controle.....	58
Figura 5.1 – Estrutura de entradas e saídas do sistema de controle <i>fuzzy</i> adaptativo...	70
Figura 5.2 – Exemplo do conjunto de variáveis linguísticas referentes à distância e orientação.....	70
Figura 5.3 – Exemplo do conjunto de variáveis linguísticas das velocidades impostas às rodas.....	71
Figura 5.4 – Representação das escolhas de nomenclaturas das funções de pertinência.....	72
Figura 5.5 Ângulo PID Círculo Cinemático.....	76
Figura 5.7 Distância PID Círculo Cinemático.....	76
Figura 5.8 Velocidade Angular AGV PID Círculo Cinemático.....	76
Figura 5.9 Posição PID Círculo Cinemático	77
Figura 5.10 Controle PID Círculo Cinemático	77
Figura 5.11 Ângulo PID Quadrado Cinemático	78
Figura 5.13 Distância PID Quadrado Cinemático.....	79

Figura 5.14 Velocidade angular do AGV PID Quadrado Cinemático	79
Figura 5.15 Posição PID Quadrado Cinemático.....	80
Figura 5.16 Controle PID Quadrado Cinemático.	80
Figura 5.18 Angulo PID Oito Digital cinemático.....	81
Figura 5.20 Distância PID Oito Digital Cinemático.	81
Figura 5.21 Velocidade Angular do AGV PID Oito Digital Cinemático.....	82
Figura 5.22 Posição PID Oito Digital Cinemático.	83
Figura 5.23 Controle PID Oito Digital Cinemático.....	83
Figura 5.24 Ângulo PID Infinito Cinemático	84
Figura 5.26 Distância PID Infinito Cinemático.....	84
Figura 5.27 Controle PID Infinito Cinemático.....	85
Figura 5.28 Posição PID Infinito Cinemático.	85
Figura 5.29 Velocidade Angular do AGV PID Infinito Cinemático	86
Figura 5.30 Ângulo <i>Fuzzy</i> Circulo Cinemático.....	86
Figura 5.32 Distancia <i>Fuzzy</i> Circulo Cinemático.....	87
Figura 5.33 Posição <i>Fuzzy</i> Circulo Cinemático.....	87
Figura 5.34 Controle <i>Fuzzy</i> Circulo Cinemático.	88
Figura 5.35 Velocidade angular AGV <i>Fuzzy</i> Circulo Cinemático.....	89
Figura 5.36 Ângulo <i>Fuzzy</i> Quadrado Cinemático.	89
Figura 5.38 Distância <i>Fuzzy</i> Quadrado Cinemático.....	90
Figura 5.39 Controle <i>Fuzzy</i> Quadrado Cinemático.	91
Figura 5.40 Posição <i>Fuzzy</i> Quadrado Cinemático.....	91
Figura 5.41 Velocidade angular AGV <i>Fuzzy</i> Quadrado Cinemático.	92
Figura 5.42 Ângulo <i>Fuzzy</i> Oito Digital Cinemático.....	92
Figura 5.43 Distância <i>Fuzzy</i> Oito Digital Cinemático.....	93
Figura 5.44 Controle <i>Fuzzy</i> Oito Digital Cinemático.....	94
Figura 5.45 Velocidade angular AGV <i>Fuzzy</i> Oito Digital Cinemático.....	94
Figura 5.46 Posição <i>Fuzzy</i> Oito Digital Cinemático.	95
Figura 5.47 Ângulo <i>Fuzzy</i> Infinito Cinemático.....	96
Figura 5.48 Distância <i>Fuzzy</i> Infinito Cinemático.....	96
Figura 5.49 Controle <i>Fuzzy</i> Infinito Cinemático.....	97
Figura 5.50 Posição <i>Fuzzy</i> Infinito Cinemático.....	97
Figura 5.51 Velocidade angular do AGV <i>Fuzzy</i> Infinito Cinemático.....	98
Figura 5.52 Motor com 45 e 60 kg.....	99

Figura 5.53 Ângulo PID Círculo Sem Carga Dinâmico.....	100
Figura 5.54 Posição PID Círculo Sem Carga Dinâmico.	101
Figura 5.55 Controle PID Círculo Sem Carga Dinâmico.....	101
Figura 5.56 Distância PID Círculo Sem Carga Dinâmico.....	102
Figura 5.57 Velocidade Angular do AGV PID Círculo Sem Carga Dinâmico.....	102
Figura 5.58 Ângulo PID Círculo 1Kg Dinâmico.....	103
Figura 5.59 Controle PID Círculo 1Kg Dinâmico.....	103
Figura 5.60 Distância PID Círculo 1Kg Dinâmico.	104
Figura 5.61 Velocidade angular AGV PID Círculo 1Kg Dinâmico.....	104
Figura 5.62 Posição PID Círculo 1Kg Dinâmico.	105
Figura 5.63 Ângulo PID Quadrado Sem Carga Dinâmico.	106
Figura 5.64 Velocidade angular AGV PID Quadrado Sem Carga Dinâmico.	106
Figura 5.65 Controle PID Quadrado Sem Carga Dinâmico.	107
Figura 5.66 Distância PID Quadrado Sem Carga Dinâmico.	107
Figura 5.67 Posição PID Quadrado Sem Carga Dinâmico.....	108
Figura 5.68 Ângulo PID Oito Digital Sem Carga Dinâmico.....	108
Figura 5.69 Velocidade angular AGV PID Oito Digital Sem Carga Dinâmico.....	109
Figura 5.70 Controle PID Oito Digital Sem Carga Dinâmico.....	110
Figura 5.71 Distância PID Oito Digital Sem Carga Dinâmico.	110
Figura 5.72 Posição PID Oito Digital Sem Carga Dinâmico.	111
Figura 5.73 Ângulo PID Infinito Sem Carga Dinâmico.....	112
Figura 5.74 Controle PID Infinito Sem Carga Dinâmico.....	112
Figura 5.75 Distância PID Infinito Sem Carga Dinâmico.....	113
Figura 5.76 Velocidade Angular AGV PID Infinito Sem Carga Dinâmico.....	113
Figura 5.77 Posição PID Infinito Sem Carga Dinâmico.	114
Figura 5.78 Ângulo PID Infinito 1 Kg Dinâmico.....	115
Figura 5.79 Velocidade Angular AGV PID Infinito 1 Kg Dinâmico.....	115
Figura 5.80 Controle PID Infinito 1 Kg Dinâmico.....	116
Figura 5.81 Distância PID Infinito 1 Kg Dinâmico.	117
Figura 5.82 Posição PID Infinito 1 Kg Dinâmico.	117
Figura 5.83 Ângulo <i>Fuzzy</i> Círculo Sem Carga Dinâmico.....	118
Figura 5.84 Posição <i>Fuzzy</i> Círculo Sem Carga Dinâmico.....	119
Figura 5.85 Controle <i>Fuzzy</i> Círculo Sem Carga Dinâmico.....	119
Figura 5.86 Distância <i>Fuzzy</i> Círculo Sem Carga Dinâmico.....	120

Figura 5.87 Velocidade angular AGV <i>Fuzzy</i> Círculo Sem Carga Dinâmico.	120
Figura 5.88 Ângulo <i>Fuzzy</i> Quadrado Sem Carga Dinâmico.	121
Figura 5.89 Controle <i>Fuzzy</i> Quadrado Sem Carga Dinâmico.	122
Figura 5.90 Distância <i>Fuzzy</i> Quadrado Sem Carga Dinâmico.	122
Figura 5.91 Posição <i>Fuzzy</i> Quadrado Sem Carga Dinâmico.	123
Figura 5.92 Velocidade Angular do AGV <i>Fuzzy</i> Quadrado Sem Carga Dinâmico. ..	123
Figura 5.93 Ângulo <i>Fuzzy</i> Infinito Sem Carga Dinâmico.	124
Figura 5.94 Velocidade Angular do AGV <i>Fuzzy</i> Infinito Sem Carga Dinâmico.	125
Figura 5.95 Controle <i>Fuzzy</i> Infinito Sem Carga Dinâmico.	125
Figura 5.96 Distância <i>Fuzzy</i> Infinito Sem Carga Dinâmico.	126
Figura 5.97 Posição <i>Fuzzy</i> Infinito Sem Carga Dinâmico.	126
Figura 5.98 Exemplo de perda da trajetória pelo AGV.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Área de pesquisa e software usado (Adaptado de IVALDI et al. 2014) ..	39
Tabela 5.1 - Base de regras <i>fuzzy</i>	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	Veículo Auto Guiado (do inglês: <i>Automated Guided Vehicle</i>)
CC	Corrente Contínua
FPS	Frame por segundo
SMC	Controle por modo deslizante (do inglês: <i>Sliding Mode Controller</i>)
FMS	Sistema Flexível de Manufatura
EDO	Equação diferencial ordinária
ODE	Motor de Dinâmica Aberto (do inglês: <i>Open Dynamics Engine</i>)
PID	Controlador proporcional integral derivativo (do inglês: <i>Proportional integral derivative controller</i>)
PMBOK	Conjunto de Conhecimento do Gerenciamento de Projetos (do inglês: <i>Project Management Body of Knowledge</i>)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização.....	15
1.2 Motivação	18
1.3 Justificativa	19
1.4 Objetivos	21
1.5 Delimitações do trabalho	22
1.6 Método de pesquisa e desenvolvimento	23
1.7 Organização do trabalho	24
CAPÍTULO 2	25
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
2.1 Considerações iniciais.....	25
2.2 Modelagem da Cinemática do AGV Seguidor de Linha.....	25
2.3 Modelagem da Dinâmica do AGV Seguidor de Linha.....	28
2.3.1 Dinâmica dos Atuadores.....	31
2.4 Controlador Fuzzy	33
2.4.1 Funções de Pertinência.....	33
2.4.2 Regras Fuzzy	35
2.4.3 Inferência Fuzzy	36
2.4.4 Controlador Fuzzy Mamdani.....	36
2.5 Simulação no Domínio da Robótica	38
2.5.1 Motores Gráficos.....	40
2.5.2 Simuladores aplicados na robótica móvel	41
2.6 Considerações finais.....	47
CAPÍTULO 3	48
3 TRABALHOS CORRELATOS	48
CAPÍTULO 4	54
4 PROPOSTA DO TRABALHO	54
4.1 Descrição do Trabalho.....	54
4.2 Modelo Matemático Proposto	56

4.3	<i>Sistema de Validação</i>	57
4.3.1	Unity Cinemático	58
4.3.2	Unity Dinâmico	59
4.3.3	Resultados Esperados	59
CAPÍTULO 5		60
5	DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA E ANÁLISE DE RESULTADOS	60
5.1	<i>Considerações Iniciais</i>	60
5.2	<i>Descrição dos Cenários</i>	63
5.3	<i>Sistema de Visão do AGV</i>	64
5.4	<i>Sistema de Controle PID</i>	67
5.5	<i>Sistema de Controle Fuzzy Adaptativo</i>	70
5.6	<i>Modelagem do Motor Elétrico no Unity</i>	72
5.7	<i>Resultados e Análise dos Cenários de Teste</i>	74
5.7.1	Cenário de Teste 01 – Unity Cinemático	75
5.7.2	Fuzzy no modelo cinemático	86
5.7.3	Cenário de Teste 02 – Unity Dinâmico	98
5.7.4	Análise dos resultados	127
CAPÍTULO 6		129
6	CONCLUSÃO	129
6.1	<i>Trabalhos futuros</i>	129
REFERÊNCIAS		131

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A robótica é um ramo interdisciplinar que envolve engenharia e ciência da computação para seu desenvolvimento, sendo responsável por projetar, construir e operar os robôs (KOTHANDARAMAN, 2016). Sendo, hoje, notório o uso da robótica em diversas áreas como industrial, saúde, entretenimento, transporte e doméstico, tornado os processos envolvidos mais eficientes (YOUSSEF, 2013). Atualmente a robótica apresenta várias frentes de pesquisas, de acordo com os tipos de robôs envolvidos. Os robôs manipuladores tiveram maior ênfase inicial nas pesquisas, devido ao seu alto uso no setor industrial. Entretanto, estes robôs não têm a mobilidade e a flexibilidade, imprescindíveis no setor industrial, oferecidas pela robótica móvel. A robótica móvel é um tema atual de pesquisa na área de robótica. Tal tema tem subcategorias, para facilitar o estudo, as quais são separadas por sua aplicação e seus diferentes meios de locomoção que podem variar, entre pernas, esteiras, rodas entre outros (YOUSSEF, 2013).

A robótica com locomoção sobre rodas, apesar de, aparentemente, possuir uma construção mais simples em consideração aos demais robôs, apresenta uma gama de aplicação e desafios que ainda estão sendo alvos dos pesquisadores. Nesse cenário, temos um robô móvel industrial com sua navegação coordenada por um computador central, que se movimenta por um trajeto demarcado previamente por uma linha (BOSTELMAN e BOURGOGNE, 2015). Sendo assim, o AGV apresenta todos os desafios da robótica móvel, além dos apresentados, por atuar no setor industrial, o qual é submetido à variação de carga e é imprescindível uma estrutura capaz de suportar essas cargas, modificando radicalmente a dinâmica do sistema.

Após a Segunda Guerra Mundial, com a alavanca da economia e tecnologia desenvolvida pós-guerra, surgiram os primeiros AGVs (Automated Guided Vehicle) no ano de 1955, devido aos novos dispositivos microeletrônicos e sensores, sendo considerada a primeira era dos AGVs (GÜNTER, 2015). A segunda era dos AGVs foi na década de 70 a 80, com a euforia da automatização industrial, marcada com a introdução de computadores e transmissão de informação por sinal de rádio. A terceira era teve início na década de 90 e foi até o ano de 2000, com maior preocupação na intralogística e com maior disponibilidade tecnológica (GÜNTER, 2015).

Os AGVs são utilizados em áreas externas e internas nos setores industriais em inúmeras aplicações, mais comumente para transportes e distribuição de cargas. São desenvolvidos considerando as especificações do seu ambiente, que podem ser armazéns para transporte de *pallets* ou até transportes de *containers* em portos (VIS, 2006). Em pesquisas com AGVs os desafios são: despacho de veículos, definição de rotas, gerenciamento de tráfego, gerenciamento de posição dos veículos, gerenciamento energético, agendamento de veículo (VIS, 2006), além dos provenientes da robótica móvel.

Em relação ao sistema de controle, o desafio é manter um erro mínimo da posição e orientação desejada em relação ao modelo físico real. Os trabalhos que definem a acurácia do controle dos robôs móveis ou AGVs não apresentam consenso sobre as métricas e especificações para medir seu desempenho, essa falta de padrão impede a avaliação do progresso nesta área e a comparação de seus resultados. Logo, para realizar uma medição do desempenho, deve-se, primeiramente, estipular o conjunto de métricas quantitativas que serão empregadas na pesquisa, por isso, foi criado um comitê de performance para AGV, definindo um padrão de recomendações de pesquisas descritas no ASTM F45 (Bostelman, Roger Bourgogne, 2015). A definição dessas métricas serão apresentadas na etapa de validação deste trabalho.

Contudo, os AGVs apresentam abordagens variadas para seu sistema de controle, desde técnicas clássicas de controle como o PID amplamente utilizadas, até técnicas recentes de controle *fuzzy* adaptativo.

O AGV, fisicamente, é composto de um corpo rígido integrado por um sistema de locomoção sobre rodas, que são atuadas por motores, permitindo a movimentação no ambiente industrial (SCIAVICCO et al., 2009). Esta mobilidade pode ser holonômica, que permite o deslocamento para qualquer direção sem a necessidade de manobra do AGV ou pode ser não

holonômica, com restrições de locomoção direta em alguma direção, mas não impossibilitando atingir qualquer parte de seu ambiente de trabalho.

A modelagem matemática dos atuadores dos AGVs² não holonômicos¹ com tração diferencial seguidor de linha apresenta três graus de liberdade: a sua localização no plano cartesiano (x, y) e θ , e com dois graus de atuação, sendo eles a velocidade linear (v) e a velocidade rotacional ($\dot{\theta}$), sendo constituído por quatro rodas livres de sustentação e duas rodas que são atuadas por motores independentes e com seu sensoriamento com câmera frontal, conforme figura 1.

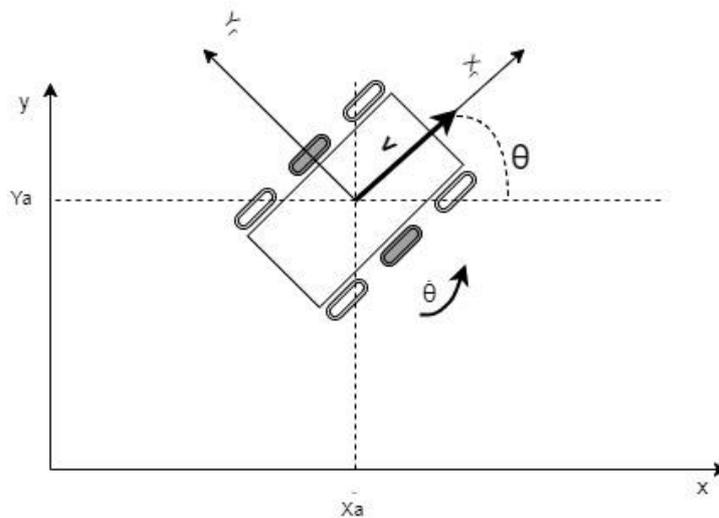


Figura 1.1 – Configuração do AGV.

Os simuladores de robótica móvel usam, em geral, um modelo matemático simplificado para os drivers de atuadores diferenciais, negligenciando a dinâmica e outros efeitos físicos sobre o modelo, deixando a cargo do motor de física utilizado por estes simuladores de robótica. Esses drivers de atuadores diferenciais consideram apenas a velocidade linear, a velocidade angular, o raio da roda e a distância entre as rodas. São usados por diversos pesquisadores para a representação e validações de suas propostas.

¹ Um robô é holonômico, se e somente se, todas as restrições de posicionamento que ele é submetido são integráveis (D'ANDREA-NOVEL ET AL., 1991).

² A partir desse ponto leia-se AGV sendo com tração diferencial não holonômicos com tração diferencial seguidor de linha que apresenta três graus de liberdade.

Essa estratégia pode funcionar para representação, no caso da robótica móvel de pequena escala sem foco no controle, onde o erro pela falta da dinâmica gerada não tem grande impacto em suas pesquisas. Porém, nos casos de robôs móveis de maior porte, como os AGVs, essa simplificação exagerada do modelo provoca erro e torna inviável o uso destes simuladores para teste de controle que poderiam, posteriormente, ser utilizados no modelo real, devido à grande lacuna entre os modelos.

1.2 Motivação

Apesar da constante evolução do emprego da robótica no meio industrial devido aos avanços das técnicas de controle e pesquisa constantes na área da robótica, há ainda um distanciamento entre o que é usado no cenário industrial e o meio acadêmico. No caso dos AGVs, temos efeitos claros sobre a velocidade máxima de atuação, precisão e desempenho do controlador, por ainda utilizar, neste setor, um modelo linear. Isso acarreta em perda de otimização do processo, que, em escala macroscópica, influencia no *makespan*, gerando perda econômica. Outro problema é que com o fator de repetitividade dos testes em ambiente real se torna difícil realizar o mesmo experimento exatamente como o anterior, o qual é sujeito a uma pequena variação que pode afetar um controle mais fino do robô seguidor de linha ou do AGV. Logo, faz-se necessário uma modelagem matemática do AGV próxima do real, permitindo a realização de testes por meio de cálculos e simulações. Isso influenciaria positivamente no tempo do processo de sintonização, uma vez que não dependeria do modelo físico para sua realização, tornando o processo mais rápido.

Por se tratar de um modelo matemático, não necessita de gastos com componentes físicos e ainda torna o experimento completamente seguro, além de fácil repetitividade dos experimentos, tornando simples para alterações de parâmetros no cenário de simulação. Esse ambiente virtual garante o controle total do cenário e sem perturbações externas sobre o experimento, podendo gerar históricos sobre os testes realizados. Um fator relevante dessa estratégia é a possibilidade de a simulação ocorrer mais rápida que o processo real diminuindo o tempo dos testes e a sintonia do controle.

Há ainda, por demanda do Laboratório de Estratégia de Automação (Tear), que por consultoria em empresas, observou a necessidade de AGVs, que apresentem uma maior

acurácia em seu controlador, por este motivo é fundamental o modelo da dinâmica do AGV para realização dos experimentos dos controles elaborados por este grupo de pesquisa.

1.3 Justificativa

O uso de ferramentas de simulação tem ganhado mais espaço na robótica, principalmente no domínio da robótica móvel, que permite ensaio de sensores, atuadores e robôs, podendo representar vários modelos de robôs diferentes e simultaneamente, conforme descrito em ECHEVERRIA, 2011. Estes simuladores foram utilizados por vários grupos de pesquisa, como os aplicados no Laboratório de robótica móvel (USP), LAAS (CNRS) e Tear (UFSCar). Sendo utilizados em trabalhos sobre técnicas de controles de robôs móveis e AGV, como visto em Gomes et.al (2016), com modelo apenas cinemático do AGV guiado por câmera. Outros trabalhos como de Xu,Kan e Yan (2014), Li et al.(2016) que fazem uma síntese entre a técnicas onde desenvolvem um controlador *Fuzzy* PID, mas não incorporam a dinâmica em suas abordagens.

Para construção do modelo dinâmico do AGV serão selecionadas as variáveis que apresentam uma grande alteração no comportamento dos modelos, que é o caso do atuador do AGV, onde sua resposta depende da variação da massa do veículo entre outras perturbações que podem sofrer. Os atuadores do AGV, em geral, são motores C.C. (corrente contínua), que tiveram sua dinâmica amplamente estudada em artigo como De Azevedo (1993) e livros de controle clássicos como do Ogata (1987), o que não justifica a exclusão no modelo da dinâmica.

O problema de um sistema dinâmico que englobe todas as variáveis, não é viável e, mesmo que fosse, não seria computável em tempo real. Logo, temos que selecionar o que será representado para obter um modelo simples, mas representativo do problema, conforme BOYCE (2002). Para contornar esse problema de modelagem da dinâmica existem softwares que apresentam modelos com boa representação do modelo físico. Assim, há trabalhos que utilizam softwares de simulação da dinâmica, como o MSC Adams que, em conjunto com o MATLAB, gera uma representação do controle de um robô móvel, como realizado por ANGEL (2013).

No trabalho realizado por Hwang (2016), fez-se uma comparação do controle de um robô, tipo carro, onde apresentou o modelo com a dinâmica do motor CC negligenciada em

confronto com o modelo que considerou a dinâmica do motor CC. No modelo que não houve a consideração da dinâmica do motor, ao ser aplicado no sistema real, houve dificuldade em controlar o sistema, verificando que a resposta fica instável em toda trajetória planejada pelo robô.

Em consideração à modelagem matemática do AGV e robôs móveis, existem trabalhos como de Archila e Becker (2013) e Hatab (2013) que já realizam a fundamentação matemática necessária para a representação de sua dinâmica, abordando de várias perspectivas e métodos de modelagem.

Considerando as abordagens dos trabalhos citados, juntamente com a revisão bibliográfica que contém a mesma temática, fornecem indícios que serão explorados neste trabalho sobre a elaboração de uma estratégia para representar o problema da dinâmica dos atuadores para ser factível à elaboração de controles para AGVs estudado no Tear.

A Figura 1.2 apresenta em quais áreas do trabalho de pesquisa estão inseridos e os temas abordados pelo Laboratório Tear. A junção dos problemas abordados e suas técnicas e métodos geram a linha de pesquisa aplicada nas áreas descritas que adotam a terminologia e amarrações lógicas definidas pela agência de fomento.

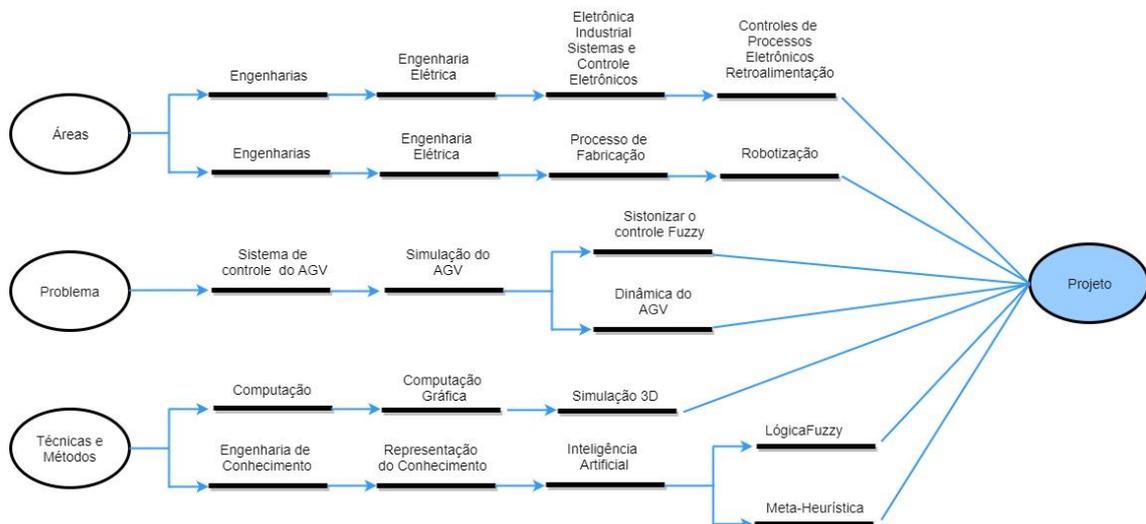


Figura 1.2 – Inserção do Projeto.

1.4 Objetivos

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos gerais:

- Modelar a dinâmica de AGV, considerando a dinâmica dos atuadores e cargas existentes. Essa modelagem deve ser capaz de representar o comportamento dinâmico do AGV levando em consideração variações de carga no sistema.
- Mostrar a necessidade da consideração da dinâmica nos simuladores de robótica para emprego em robôs que apresentam significativas variações de carga.

Com o propósito de atingir esse objetivo geral, é preciso cumprir alguns objetivos específicos, tais como:

- **ANALISAR OS CONTROLES CINEMÁTICOS:** a análise dos controles cinemáticos, que tem como variáveis de entrada a velocidade linear e o ângulo que serão aplicados do veículo, onde sua função é garantir que o erro entre a distância da linha e o veículo seja mínima, assim com o erro entre o ângulo de entrada com o ângulo de leitura.
- **ANALISAR OS CONTROLES DINÂMICOS:** a análise dos controles dinâmicos, que compensam pequenas características das dinâmicas que foram negligenciadas e realizam a estabilização do erro pelos métodos de adaptação.
- **ANALISAR OS MOTORES DE JOGOS:** a análise dos motores de jogos que são comumente empregados para desenvolvimentos de simuladores no campo da robótica.
- **AVALIAR E VALIDAR O MODELO MATEMÁTICO:** Para avaliar e validar o modelo matemático proposto na pesquisa, o modelo de dinâmica dos atuadores proposto será aplicado em conjunto com um controle *Fuzzy* adaptativo. Será separado em duas avaliações e uma validação por análise do experimento:
 - **Avaliação através de simulação:** Avaliar a resposta do modelo proposto através de simulação em comparação ao simulador de robótica cinemático, estressando o sistema de controle. Nesta etapa, espera-se que o modelo proposto tenha desempenho inferior em relação ao erro da distância e

ângulo, uma vez que o modelo dinâmico considera perturbações no sistema de controle.

- **Validação experimental:** A validação da proposta da pesquisa será por análise dos resultados entre a simulação da proposta e o simulador de robótica, em comparação ao controle, para verificar se existe, de fato, a necessidade do uso da dinâmica para esse fim.

1.5 Delimitações do trabalho

A peça central de estudo deste trabalho é o AGV, um robô industrial composto por diversos elementos mecânicos e eletrônicos, sendo a eletrônica incumbida pela execução do software responsável pelo seguimento da trajetória por parte do veículo. A mecânica é constituída pela plataforma que suporta as rodas e os motores. Será considerada toda a estrutura do veículo, pois, sua massa, tamanho e distância entre as rodas influenciam diretamente nas forças que atuam no sistema e devem ser incorporadas no modelo da dinâmica.

As representações matemáticas que descrevem o modelo, também chamada modelo matemático, no caso do AGV é uma representação dos comportamentos das forças que atuam no veículo. Em geral, é uma representação derivada da mecânica lagrangiana ou pela dinâmica de Newton-Euler, formalizando a equação. A proposta deste trabalho consiste em fazer uma simplificação do modelo da dinâmica do AGV pela representação da dinâmica do seu atuador, sem deixar de contemplar as variáveis consideradas na literatura, mas inserindo-as como perturbações no sistema do motor. Essa estratégia vem do fato de existirem simuladores que não utilizam o modelo da dinâmica de AGV, mas que são imprescindíveis para uma simulação do grupo de pesquisa Tear. A estratégia é de uma representação simples, para não ser custosa em termo de processamento na etapa de simulação, mas sem perder a representação próxima do modelo real do AGV. A escolha do controlador *fuzzy* adaptativo foi devido às perturbações inerentes da simplificação dos modelos. O modelo proposto considera que qualquer carga no AGV estará disposta no ponto central do eixo de tração dos veículos, ou seja, não considera o deslizamento da carga sobre o veículo.

Porém, mesmo incluindo várias forças que podem perturbar o sistema de controle, existem alguns efeitos que não serão contemplados pelo modelo. Não serão considerados no modelo quaisquer deslizamentos das rodas do AGV. Não faz parte do escopo atender à variação da distribuição do centro de massa do AGV, assim como desgastes mecânicos das rodas ou sua dinâmica, também não é considerado alteração na superfície onde o AGV se locomove.

1.6 Método de pesquisa e desenvolvimento

Este trabalho seguirá o método Hipotético-dedutivo (MARCONI e LAKATOS, 2008). As etapas deste método são: a colocação do problema, que consiste em reconhecimentos dos fatos, descoberta do problema e formulação do problema. A segunda etapa é a construção de um modelo teórico por meio de seleção de fatores pertinentes com criação de uma suposição plausível relacionados às variáveis supostamente pertinentes e à invenção das hipóteses centrais. Seguindo da dedução de consequências particulares e testes das hipóteses para posterior aplicação das conclusões na teoria pela definição de Bunge (MARCONI e LAKATOS, 2008).

Segundo Popper (1975), o método consiste em perceber problemas, lacunas ou contradições no conhecimento prévio ou em teorias existentes. Onde, com a formulação das hipóteses, são avaliadas pela técnica de falseamento. O falseamento pode ser por experimentação ou análise de estatísticas. Após esse processo, as hipóteses podem ser reputas ou corroboradas (DINIZ, 2015).

Com base neste método, as hipóteses de pesquisa do mestrado são as seguintes:

- Com a modelagem da dinâmica dos atuadores do AGV com tração diferencial é possível uma representação mais realista do que a apresentada nos simuladores de robótica atuais.
- Um sistema de controle sintonizado por meio da simulação de um AGV pode ser empregado no AGV real com tração diferencial. O modelo da dinâmica dos atuadores pode representar a dinâmica do AGV, pois todas as variações da dinâmica do veículo podem ser representadas como perturbação no atuador.

A análise de softwares de simulação apontou uma lacuna na dinâmica dos modelos, motivando uma revisão bibliográfica de trabalhos que empregaram estes programas de simulação. Essas lacunas determinarão uma série de variáveis a serem analisadas neste trabalho. Para a validação dos experimentos será definido o erro em relação ao ângulo desejado e o mensurado pelo sensor e o erro da distância entre o centro do veículo e a linha. Para determinar este, a proposta apresentou um erro máximo aceitável e com o intuito de eliminar o fator subjetivo do contexto de operação do AGV, será considerado válido se apresentar erro menor que um simulador de robótica usado em trabalhos acadêmicos. Apenas como valor de referência de padrão mínimo exigido para aceite, serão considerados os valores de erro máximo para a distância entre a linha e o centro do veículo de 49mm e ângulo 0.279, estes valores têm como base o trabalho de Gomes (2016). Outra variável de interesse é o tempo de execução, logo, também será considerado válido se o tempo gasto pela simulação for menor e com erro menor ou igual ao erro máximo acordado anteriormente. Os experimentos seguirão também as recomendações da ASTM F45, comitê formado recentemente sobre o desempenho do AGV conforme Bostelman (2015), pois não existe um padrão bem definido de pistas nos trabalhos acadêmicos que dificulta a análise da acúrcia (BOSTELMAN AND BOURGOGNE, 2015).

1.7 Organização do trabalho

O primeiro capítulo define a pesquisa e onde se enquadra na literatura, contextualizando o tema. Apresentando a motivação e justificativa do trabalho, os objetivos propostos, deixando claro o escopo da proposta de pesquisa do mestrado.

O segundo capítulo mostra, de forma geral, a teoria e técnicas já desenvolvidas sobre o tema proposto, afim de garantir o entendimento do trabalho

Na terceira para parte do trabalho são apresentados os trabalhos correlatos, demonstrando as técnicas e abordagens utilizadas no tema de modelagem da dinâmica do AGV. São englobados ainda, trabalhos com temas diferentes, mas que têm conexão ou presentes técnicas que ajudaram a proposta deste trabalho.

No último capítulo é mostrado a proposta da pesquisa do mestrado de forma mais detalha, exibindo o cronograma das atividades a serem executadas e, por fim, os resultados esperados e trabalhos futuros.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Considerações iniciais

O capítulo de revisão da literatura introduzirá a matemática, os conceitos e os fundamentos que serão aplicados na proposta de pesquisa. Primeiramente, serão apresentados os modelos da cinemática e dinâmica do AGV e seu atuador. Após, será apresentada a teoria do sistema de controle *fuzzy* que será aplicada na proposta, sua função de pertinência, regras e inferência *fuzzy*, sendo necessária para sua compreensão. Por fim, os fundamentos dos simuladores de robótica utilizados no meio acadêmico, com base nos motores de física e gráficos.

2.2 Modelagem da Cinemática do AGV Seguidor de Linha

A cinemática do AGV é a representação analítica do movimento considerando a posição e orientação em relação ao tempo. Para a formulação matemática da cinemática do AGV vamos considerar apenas a cinemática direta baseada em álgebra vetorial e matricial para representar a localização e orientação no espaço. Esta modelagem da cinemática será, ainda, baseada no trabalho de Archila e Becker (2013), que utilizaram AGV com tração diferencial similar ao utilizado neste trabalho. O modelo simplificado do AGV com tração diferencial tem as duas rodas centrais, que são conectadas aos atuadores e as quatro rodas de cada ponta, que são rodas livres do tipo castor, modelado de acordo com a Figura 2.1.

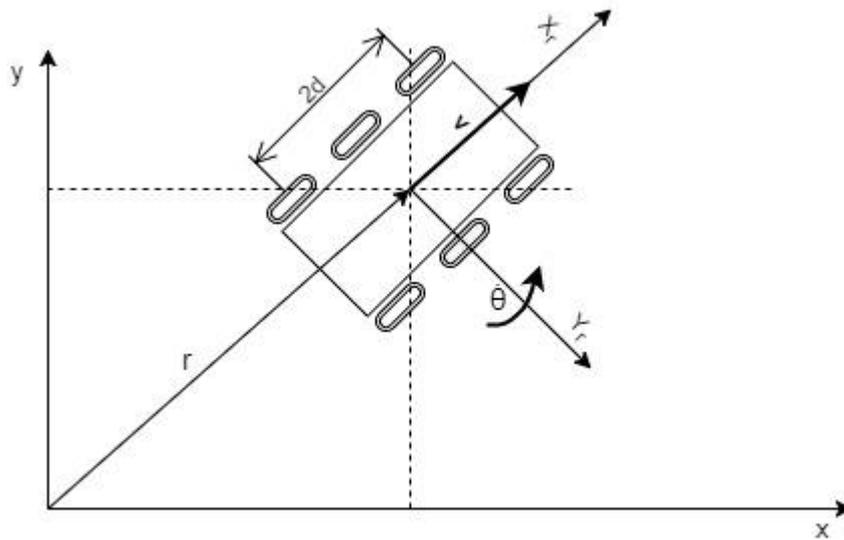


Figura 2.1 – Configuração cinemática do AGV.

A orientação do AGV é dada pelo ângulo θ formado pela eixo X e o X_r onde $\{X_r, Y_r\}$ são o sistema de coordenadas do robô, as coordenadas inercial são dadas por $\{X, Y\}$, v a velocidade linear do AGV e r é o posicionamento inercial do sistema de coordenadas dadas por:

$$\dot{q}_r = R(\theta)\dot{q}, \tag{2.2.1}$$

Onde:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 0 \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.2.2}$$

$$\dot{q} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T \tag{2.2.3}$$

$$\dot{q}_r = [\dot{x}_r \ \dot{y}_r \ \dot{\theta}_r]^T \tag{2.2.4}$$

Considerando o ponto de contato da roda P conforme Figura 2.2:

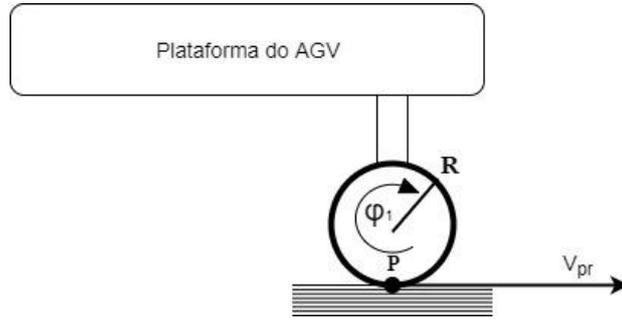


Figura 2.2 – Ponto de contato da roda ao chão.

$$\begin{cases} v_{pD} = R\dot{\phi}_1 \\ v_{pE} = R\dot{\phi}_2 \end{cases} \quad (2.2.5)$$

A velocidade angular será representada por $\dot{\theta}_{total}$ e $L=2l$ como sendo a distância entre as rodas:

$$v_{total} = \frac{v_{pD} + v_{pE}}{2} = \frac{R(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{2} \quad (2.2.6)$$

$$\dot{\theta}_{total} = \frac{v_D - v_E}{L} \quad (2.2.7)$$

Então

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{R(\dot{\phi}_1)}{2} + \frac{R(\dot{\phi}_2)}{2} \\ 0 \\ \frac{R(\dot{\phi}_1)}{2l} - \frac{R(\dot{\phi}_2)}{2l} \end{bmatrix} \quad (2.2.8)$$

2.3 Modelagem da Dinâmica do AGV Seguidor de Linha

A dinâmica é o estudo do movimento mecânico que considera diferentes forças que atuam no sistema. Diferente da cinemática, não avalia esses efeitos. Para representar a dinâmica do AGV basear-se-á no trabalho de Ahmad (AHMAD ABU HATAB, 2013) e Fukao et al (2000) que apresentam a dinâmica de robô móvel usando a formulação Lagrange para construção do modelo matemático. Sendo a equação Lagrangiana da dinâmica de robôs móveis representado por:

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + F_m(\dot{q}) + G_m(q) + \tau_d = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad (2.3.1)$$

Sendo $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ o vetor das coordenadas generalizadas do sistema com n graus de liberdade, $M(q)$ é a matriz $n \times n$ simétrica positiva de inércia, $V_m(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a matriz força centrífuga, $F_m(\dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ um vetor que representa o atrito viscoso, $G_m(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ um vetor que representa torque gravitacional, $\tau_d \in \mathbb{R}^{r \times 1}$ representa as perturbações, $\tau \in \mathbb{R}^{r \times 1}$ o torque de entrada, $B(q) \in \mathbb{R}^{n \times r}$ onde r o número de entradas, $\lambda \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ um vetor que representa as forças de restrição também conhecido como multiplicador de Lagrange e $\Lambda^T(q)$ é a matriz associada às restrições.

A abordagem da dinâmica de Lagrange é um método muito poderoso para formulação de equações diferenciais de movimento mecânico, que é representada da seguinte forma:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial q} = F - \Lambda^T(q)\lambda \quad (2.3.2)$$

Onde $L = T - V$ sendo V a energia potencial, T a energia cinética e F é a generalização do vetor da força. Vamos considerar uma coordenada generalizada do AGV dada por:

$$q = [x_a \ y_a \ \theta \ \phi_D \ \phi_E]^T \quad (2.3.3)$$

A energia cinética do corpo do AGV e das rodas é descrito por:

$$T_c = \frac{1}{2} m_c v_c^2 + \frac{1}{2} I_c \dot{\theta}^2 \quad (2.3.4)$$

$$T_{RD} = \frac{1}{2} m_R v_{RD}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}_D^2 + \frac{1}{2} I_R \dot{\phi}_D^2 \quad (2.3.5)$$

$$T_{RE} = \frac{1}{2} m_R v_{RE}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}_E^2 + \frac{1}{2} I_R \dot{\phi}_E^2 \quad (2.3.6)$$

Toda a velocidade pode ser expressa inicialmente como:

$$v_i^2 = \dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 \quad (2.3.7)$$

Os componentes das coordenadas do centro de massa das rodas podem ser descritos como:

$$\begin{cases} x_c = x_a + d \cos\theta \\ y_c = y_a + d \sin\theta \end{cases} \quad (2.3.8)$$

$$\begin{cases} x_{rD} = x_a + L \sin\theta \\ y_{rD} = y_a + L \cos\theta \end{cases} \quad (2.3.9)$$

$$\begin{cases} x_{rE} = x_a - L \sin\theta \\ y_{rE} = y_a + L \cos\theta \end{cases} \quad (2.3.10)$$

Logo, é possível representar a energia cinética total como:

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{x}_a^2 + \dot{y}_a^2) - m_c d \dot{\theta} (\dot{y}_a \cos\theta - \dot{x}_a \sin\theta) + \frac{1}{2} I_r (\dot{\phi}_D^2 + \dot{\phi}_E^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (2.3.11)$$

Onde a massa total do AGV é dada por $m = m_c + 2m_R$ e a inercia total por:

$$I = I_c + m_c d^2 + 2m_R L^2 + 2I_m \quad (2.3.12)$$

A equação do movimento pela função de Lagrange, onde $L=T$ pode ser representada por:

$$m\ddot{x}_a - m\ddot{\theta}\sin\theta - m\dot{\theta}^2 \cos\theta = C_1 \quad (2.3.13)$$

$$m\ddot{y}_a - m\ddot{\theta}\cos\theta - m\dot{\theta}^2 \sin\theta = C_2 \quad (2.3.14)$$

$$I\ddot{\theta} - m\dot{x}_a \sin\theta + m\dot{y}_a \cos\theta = C_3 \quad (2.3.15)$$

$$I_R \dot{\phi}_D = T_D + C_4 \quad (2.3.16)$$

$$I_R \dot{\phi}_E = T_E + C_5 \quad (2.3.17)$$

Onde os coeficientes relacionados com as restrições cinemática descrita como o multiplicador de Lagrange:

$$\Lambda^T(q) = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix} \quad (2.3.18)$$

Pela equação de movimento geral, temos:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad (2.3.19)$$

Onde:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -md \operatorname{sen}\theta & 0 & 0 \\ 0 & m & md \operatorname{cos}\theta & 0 & 0 \\ -md \operatorname{sen}\theta & md \operatorname{cos}\theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (2.3.20)$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -md\dot{\theta} \operatorname{cos}\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -md\dot{\theta} \operatorname{sen}\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3.21)$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } \Lambda^T(q)\lambda = \begin{bmatrix} \operatorname{cos}\theta & \operatorname{sen}\theta & \operatorname{sen}\theta \\ 0 & L & -L \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix} \quad (2.3.22)$$

Simplificando as equações, encontramos uma forma mais conveniente para simulação dada por:

$$\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta = \bar{B}(q)\tau \quad (2.3.23)$$

Onde:

$$M(q) = \begin{bmatrix} I_R + \frac{R^2}{4L^2} & (mL^2 + I) & \frac{R^2}{4L^2} & (mL^2 - I) \\ \frac{R^2}{4L^2} & (mL^2 - I) & I_R + \frac{R^2}{4L^2} & (mL^2 + I) \end{bmatrix} \quad (2.3.24)$$

$$\bar{V}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R^2}{2L} m_c d \dot{\theta} \\ -\frac{R^2}{2L} m_c d \dot{\theta} & 0 \end{bmatrix}, \bar{B}(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3.25)$$

2.3.1 Dinâmica dos Atuadores

Os atuadores do AGV são compostos por um conjunto mecânico e por motores C.C., que produzem força eletromotriz necessária para o acionamento das rodas do veículo. Para simplificar a dinâmica dos atuadores será considerado apenas o motor CC, os outros elementos do sistema de atuação das rodas serão suprimidos. Assim, considerar-se-á o controle do motor CC de campo fixo, conforme a Figura 2.3:

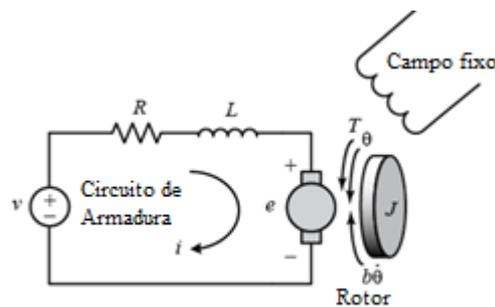


Figura 2.3 – Representação do motor CC (Adaptado de: EL YOUSSEF, 2013)

Esse sistema de atuação depende da variação de tensão de armadura que resulta na velocidade angular do motor. Para correta análise do comportamento do motor CC é necessário analisar seu estado atual para considerar as ações que influenciarão o modelo (OGATA, 2010). O modelo dinâmico dos atuadores será considerado em um regime transitório, levando em consideração as equações elétricas, mecânicas e eletromecânicas do sistema representada por meio das leis de Kirchhoff e das leis de Newton. Essa representação é fundamental para este trabalho sendo parte da estratégia de representação do modelo da dinâmica do AGV. Conforme a Figura 2.3, o sistema é composto por um resistor R em série, com um indutor L (que representa a indutância do enrolamento da armadura) e pela tensão de gerada pela armadura representada por e . Aplicando as leis das malhas de Kirchhoff obtemos:

$$v(t) = e(t) + L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t). \quad (2.3.1.1)$$

Onde a tensão induzida gerada pela força contra eletromotriz, que apresenta uma constante k_e , sendo proporcional à velocidade de rotação angular $\omega(t)$, pode ser descrita como:

$$e(t) = k_e \cdot \omega(t), \quad (2.3.1.2)$$

Analisando a parte mecânica do motor, temos o rotor, o elemento girante do motor, temos que considerar sua forma e massa. Desta forma, vamos considerar J como um momento de inércia e para representar o atrito entre os componentes utilizaremos a constante de atrito k_b .

$$\tau_b(t) = k_b \omega(t), \quad (2.3.1.3)$$

Mas o torque do motor é proporcional à corrente empregada do circuito, sendo descrita por:

$$\tau_m(t) = k_m i(t), \quad (2.3.1.4)$$

Sendo k_m denominada constante de torque, associando (2.3.1.3), (2.3.1.4) temos:

$$\tau_m(t) - \tau_b(t) = J\alpha(t), \quad (2.3.1.5)$$

Sendo $\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}$ a aceleração angular. Substituindo $\tau_m(t)$ e $\tau_b(t)$ na equação acima:

$$k_m i(t) - k_b \omega(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2.3.1.6)$$

Aplicando a transformada de Laplace em (2.3.1.1), (2.3.1.3) e (2.3.1.5) para obter as equações simplificadas no domínio da frequência:

$$v(s) = (R + Ls)i(s) + e(s), \quad (2.3.1.7)$$

$$\tau_b(s) = k_b \omega(s), \quad (2.3.1.8)$$

$$\tau_m(s) = \tau_b(s) + (Js + B)\omega(s). \quad (2.3.1.9)$$

Sendo representado pelo diagrama de blocos, onde a entrada é a diferença de potencial aplicada ao motor apresenta uma saída dada como velocidade angular em rad/s, conforme a figura 6.

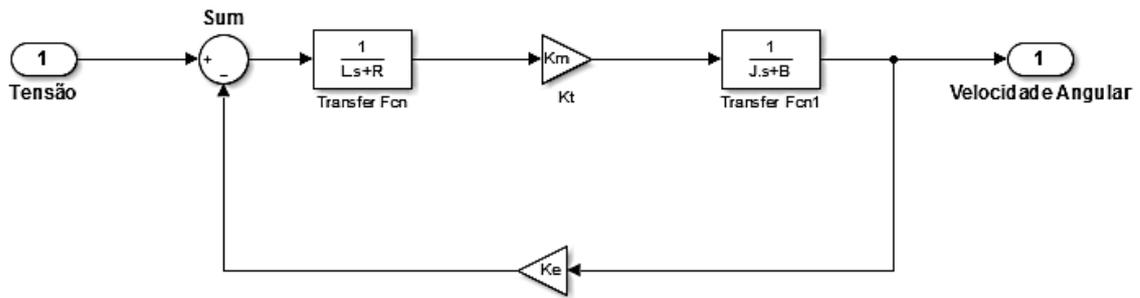


Figura 2.4 - Diagrama de Blocos do Motor DC.(Adaptado de Rodrigues 2017)

Essa estrutura da Figura 2.4 será considerada, futuramente, no trabalho para simulação dos atuadores do AGV no Unity3D.

2.4 Controlador *Fuzzy*

A escolha do controlador *Fuzzy* para este trabalho é baseada em diversos artigos que comprovam a eficiência do mesmo aplicado ao AGV, uma vez que superam o esquema de controles clássicos como o PID, sendo adaptados à mudança de carga, efeitos de acoplamento e mudanças no estrada (KODAGODA et al., 2002). No entanto, é muito difícil para o derivado proporcional integral (PID) encontrar um equilíbrio entre o desempenho estático e dinâmico do sistema para tornar o controle do AGV mais suave e estável, uma vez que o sistema é tipicamente não linear. Assim, com aplicações que exigem maior grau de acurácia, fica claro o ganho com o uso de um controlador mais adequado como o *Fuzzy*. Tal melhoria fica explícita em trabalhos Li et al. (2016) que utilizaram o *Fuzzy* comparando com o PID. Em vários artigos acadêmicos como Mac et al. (2016), Dianyong e Hui (2003), Sakir et al. (2017) e Li et al. (2016) o uso do *Fuzzy* se mostrou mais eficiente. Contudo, ainda há trabalho do laboratório com modelo similar ao proposto a este trabalho, obtendo ganho significativo, principalmente com a variação de carga que é comum de um AGV.

2.4.1 Funções de Pertinência

A função de pertinência é a base teórica dos conjuntos *fuzzy*, apresentando como configuração mais comuns a triangular, trapezoidal e Gaussiana (KLIR e YAUN,1995). Pela

teoria clássica de conjunto, um elemento pertence ou não pertence ao conjunto. Dado um conjunto universo U e o conjunto A , tal que $A \subset U$, sendo o grau de pertinência $\mu_A(x)$ de x um elemento de A é definida pela função:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.4.1.1)$$

Esta função $\mu_A(x): U \rightarrow \{0,1\}$ é a função característica na teoria clássica de conjuntos, onde existem apenas duas possibilidades: o elemento pertence 100% ou não pertence ao conjunto (GOMIDE, 1994). Zadeh (1965) fez uma extrapolação desse conceito ao propor um fator de pertinência do elemento entre 0 e 1, ou seja, $\mu_A(x): U \rightarrow [0,1]$. Logo, cada A subconjunto de U será denominado como conjunto suporte do conjunto *fuzzy*, tal que u de U seja $\mu_A(u) > 0$. A função de pertinência triangular é representada por:

$$\mu_{\text{triangular}}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (2.4.1.2)$$

Sendo, b é o valor modal de μ e a e c são os limites inferiores e superiores dos elementos do conjunto *fuzzy*. A função de pertinência trapezoidal é representada por:

$$\mu_{\text{trapezoidal}}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (2.4.1.3)$$

Para ilustrar a função de pertinência, a Figura 2.5 mostra um controle *fuzzy* simplificado de um robô seguidor de linha baseado na orientação, onde serão consideradas três possibilidades: o robô está à esquerda da linha e, logo, teria erro negativo representado por “N”, à direita, com erro positivo “P” ou no centro, com erro zero “Z”.

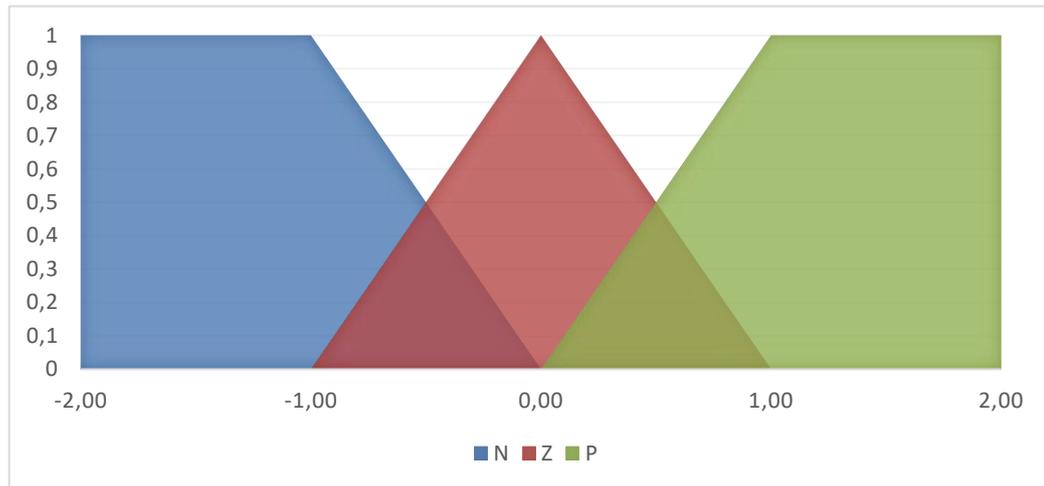


Figura 2.5 – Gráficos da função de pertinência em relação ao erro de orientação.

Então, para um valor de entrada $x = -1.5$ o grau de pertinência no conjunto “N” seria um e para “Z” e “P” seria zero. Mas para $x = 0.5$ o grau de pertinência seria de 0.5 para “Z” e “P” e zero para “N”.

2.4.2 Regras *Fuzzy*

As regras são a forma que o sistema tem de expressar seu conhecimento por meio de condição-ação (GOMIDE, 1994). O conjunto formado pelas condições que são observadas do processo será vinculado à saída desejada do controle, afim de que, para cada entrada do sistema apresente uma resposta de saída. São regras simples do tipo Se “antecedente” então “consequente” também chamadas de regras de controle *fuzzy*. As regras *fuzzy* podem ser compostas ainda de uma série de conexões lógicas do “antecedente” ou do “consequente” por exemplo:

$$R_i : \text{ SE } (x \text{ é } A_i) \text{ e } (y \text{ é } B_i) \text{ ENTÃO } (r \text{ é } C_i) \quad (2.4.1.4)$$

Onde A_i e B_i é um conjunto *fuzzy* $A_i \times B_i$ em $U \times V$ gerando a regras $R_i = (A_i \text{ e } B_i) \rightarrow C_i$ onde “ \rightarrow ” é o operador *fuzzy* de implicação que define as regras do tipo $A \rightarrow B$ (LEE, 1990).

2.4.3 Inferência *Fuzzy*

A inferência é o ato de computar as regras *fuzzy* gerando uma conclusão por meio de um método de raciocínio que será baseado em regras de inferência. Uma das importantes regras de inferência é baseada no modus ponens da lógica clássica. A inferência composicional de Zadeh (1973) onde, dado a regra *fuzzy* se x é A então y é B escrito simplesmente por $A \rightarrow B$ é transformada na relação *fuzzy* $R_{A \rightarrow B}$. Essa relação pode ser definida como uma função $R(x, y) = f((A(x), B(x)))$ onde f pode ser conjunção, disjunção ou implicação *fuzzy* (GOMIDE, 1998). A conjunção e a disjunção *fuzzy* são baseadas em um conjunto de regras de generalização chamados de T-normas e as S-normas respectivamente, e são responsáveis pela intersecção e união *fuzzy* que mapeiam $[0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$.

Logo, para usar as regras de inferência, deve-se conhecer algum fato que possa definir um valor para um antecedente a ponto de se inferir uma conclusão (PRECRYCZ; GOMIDE, 1998), definida pela equação:

$$B'(y) = \sup_{x \in X} [A'(x) \tau R(x, y)] \quad (2.4.1.5)$$

Sendo X é A e pode-se inferir Y é B , \sup é operador de supremo e τ uma t-norma.

2.4.4 Controlador *Fuzzy* Mamdani

Os sistemas de controle do tipo Mamdani tem como princípio a obtenção de respostas de seu processamento de inferência um conjunto *fuzzy* que deverá ser transformado de *fuzzy* para um escalar numérico que será a saída do sistema de controle. Este sistema de controle Mamdani pode ser representado conforme a Figura 2.6.

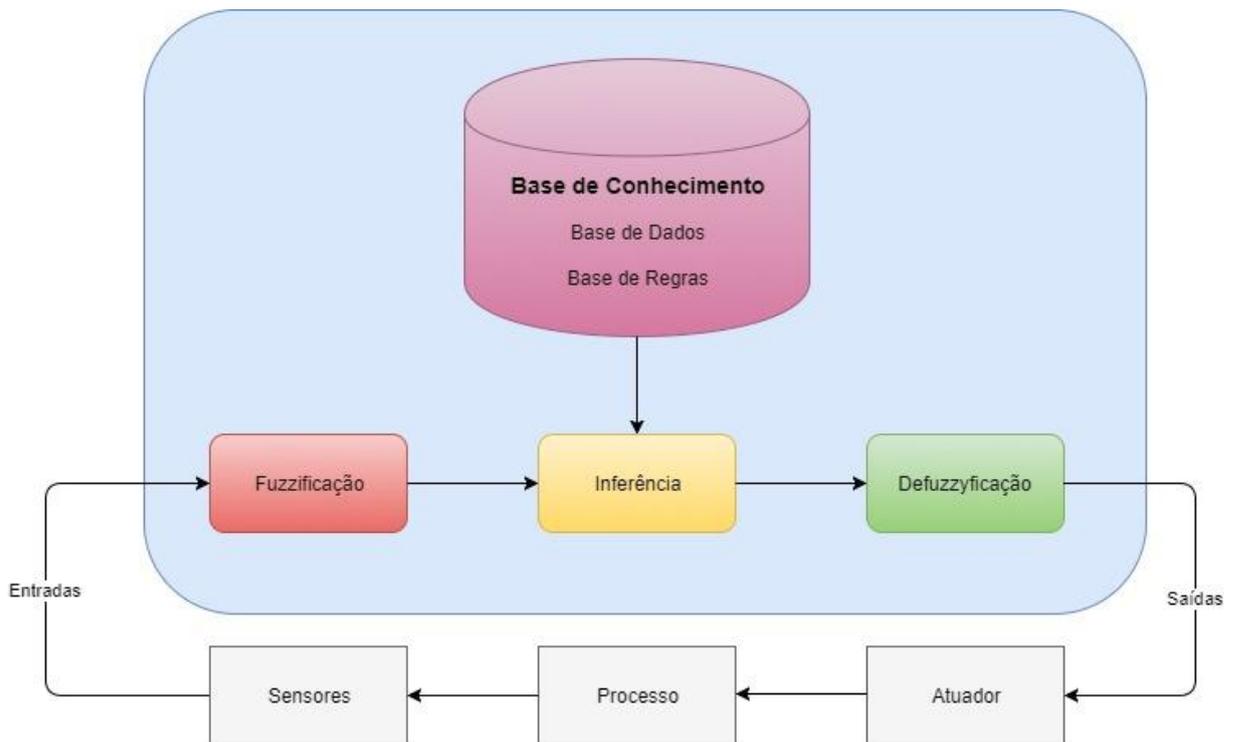


Figura 2.6 – Estrutura do controlador Fuzzy Mamdani.

Onde:

- **Base de Conhecimento:** Composta da Base de Dados (responsável pelas funções de pertinência do conjunto *fuzzy* nas regras *fuzzy*) e Base de Regras (conjunto de regras *fuzzy*).
- **Fuzzificação:** Responsável por mapear cada variável de entrada em graus de pertinência do seu conjunto *fuzzy*.
- **Inferência:** Responsável por realizar as inferências, obtendo, a partir dos níveis de compatibilidade das entradas com as condições da base de regras, uma ação a ser realizada pelo sistema
- **Defuzzyficação:** Transforma as respostas da inferência em valores escalares da saída. Métodos comuns para esse processo são: o Centroide, Bissetor de Áreas, o Método de Máximos e o Menor Máximo.

2.5 Simulação no Domínio da Robótica

Nas últimas décadas, a computação gráfica foi impulsionada pelo setor dos videogames e grande parte das pesquisas e desenvolvimentos são conduzidas pela comunidade de jogos (ZYDA, 2005). Para o desenvolvimento de jogos cada vez mais realistas foram criados softwares de desenvolvimento de jogo conhecidos como *Game Engine* (motor de jogos) responsáveis por todos os elementos necessários para criação de um jogo, motor de jogos comerciais custavam mais de 6 milhões de dólares em 2005 (ZYDA, 2005). Os motores de jogos surgiram da ideia de componentes de software reutilizáveis para que não tenham que desenvolver todo o mecanismo tridimensional a partir do zero (GREEF,2015) .

A necessidade de um comportamento realista, tanto da indústria de jogos, quanto de pesquisadores, originou o conceito de simulador científico baseado nos motores de jogos (GREEF,2015). Muitos dos simuladores de robótica atuais são desenvolvidos com base nos motores de jogos, uma vez que apresenta recursos gráficos e estrutura de comportamento físico já implementadas por motores de física e gráficos.

Os sistemas de robótica, em geral, tem alta complexidade física, além de uma grande necessidade de componentes de hardwares e softwares, o que torna o experimento muito trabalhoso e ainda demanda muito tempo e recursos para sua elaboração (ECHEVERRIA et al. 2011). A simulação é a maneira mais rápida e confiável para buscar novidades no campo da robótica, oferecendo um ambiente virtual completamente controlável sem ruídos desconhecidos, além de logs com dados de simulação cruciais nos resultados científicos (GREEF,2015). A vantagem da simulação da robótica é permitir o estudo e a programação mesmo sem acesso ao hardware do robô, além da análise de muitas variáveis que seria de difícil acesso no hardware real (GONÇALVES, 2009).

Permite estressar ao máximo o modelo como o de SILVA (2015) que pode simular vários modos de acesso muito mais complexos do que seria submetido o robô em ambiente real. Uma das vantagens da simulação é a realização de experimentos seguros, como o apresentado no trabalho de Gomes e Wolf (GÓMEZ et al. ,2016) no projeto do carro autônomo Carina da USP, que permitiu a simulação de uma cidade para realização dos testes. Então, resumidamente, as vantagens do uso de simuladores são:

- Economia de recurso

- Segurança nos experimentos
- Fácil acesso às informações do modelo
- Modelagem de ambientes
- Representação de vários modelos de robôs e sensores
- Abstração do hardware

Porém, o uso de simuladores pode apresentar desvantagens, pois se trata de uma aproximação da realidade. Então, torna-se necessária a busca por alta fidelidade na simulação, afim de obter um resultado significativo cientificamente para implementação no hardware real (GREEF, 2015).

As ferramentas de simulação mais conhecidas são: ODE, Gazebo, Blender, Bullet, Webots, Nvidia, PhysX, Stage, V-Rep, OpenSIM e ADAMS. A escolha da ferramenta para a simulação é fortemente baseada no grau de proximidade com o modelo real, apesar de também ser influenciada pela região da pesquisa, conforme visto no trabalho de Ivaldi et al (2014). As mais importantes características buscadas pelos cientistas são: estabilidade na simulação, velocidade, precisão, acurácia e mesma interface entre sistema real e simulado.

Tabela 2.1 - Área de pesquisa e software usado (Adaptado de IVALDI et al. 2014)

Área de pesquisa	Software mais usado	Outro software usado
Humanoid Robotics	ODE, Gazebo, Robotran, OpenRave, Arboris-Python, XDE, iCub SIM	Drake, MapleSim, MuJoCo, OpenSIM, Robotic sLab, SL, Vortex, V-Rep, Webots
Mobile Robotics	Gazebo, ARGoS, Webots, V Rep, Vortex	ADAMS, Autodesk Inventor, Bullet, ODE, Morse, roborobo, Sim
Multi-legged robotics	Webots, ODE	Gazebo, ADAMS, Autolev, Bullet, Moby, RoboticsLab, SIMPACK, VoxelCad
Service robotics	Gazebo, OpenRave	OpenSIM, V-Rep, Morse, RCIS, SL

Numerical simulation of physical systems	Bullet	MuJoCo, ODE, OpenSIM, Simulink, trep, XDE
Flying robots	ARGoS	Robotran, crrcsim, Gazebo, Simulink/Matlab
Swarm robotics	ARGoS	roborobo
Industrial manipulators	Bullets, Dymola, Matlab, V-Rep, XDE	
Mechanical design	Moby, MuJoCo, V-Rep, own code	
Human Motion analysis	Robotran, Bullet, XDE	
Snake robots	ODE	Matlab

Como apresentado na tabela 2,1, não existe um único e melhor simulador para qualquer robô, a escolha depende de vários fatores que incluem boa documentação e comunidade ativa (IVALDI et al. 2014).

2.5.1 Motores Gráficos

Todo objeto tridimensional é formado por uma representação geométrica, composta por polígonos simples (como o triângulo e o retângulo) que, em conjunto, moldam sua superfície e dão forma ao objeto, conforme Figura 2.7. Logo, podemos representar qualquer forma por um conjunto de triângulos, simplificando a armazenagem de representação de grandes terrenos,

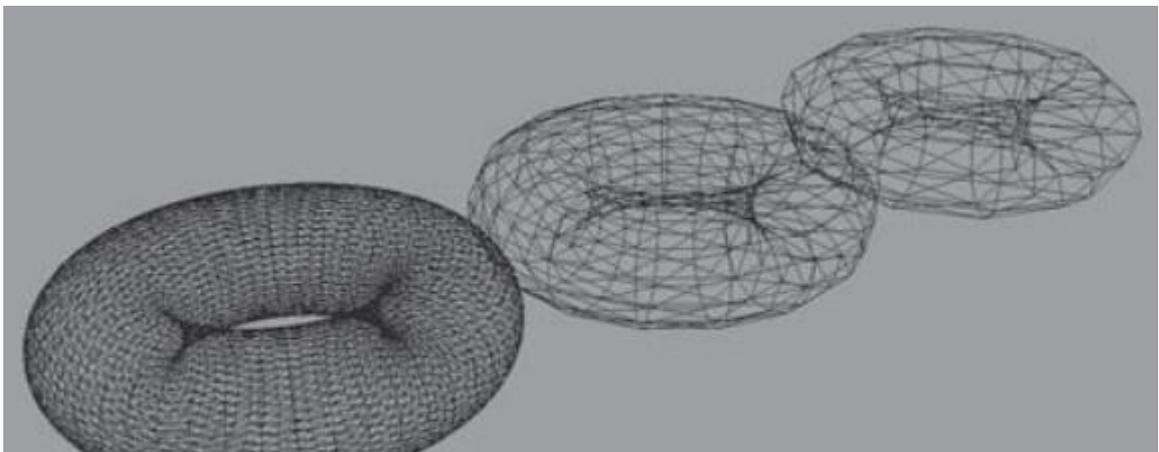


Figura 2.7 – Representação da superfície dos objetos 3D. Fonte: (GREGORY, 2009)

como uma malha triangular (BISHOP et al., 1998). Todo esse processo de renderização em alta frequência para que a percepção humana tem a impressão de movimento, utiliza-se taxas que superaram os 30 fps (frame por segundos). A subdivisão dos polígonos é chamada de *Tessellation* onde, quanto mais é aplicado ao objeto, mais suaviza o ângulo das arestas em relação a aresta seguinte (GREGORY, 2009).

Para realizar a montagem dessas cenas e objetos tridimensionais os motores de jogos utilizam motores gráficos que necessitam de dados formados por *arrays* dos vértices dos triângulos dos objetos 3D. Assim, esse processo de modelagem tridimensional fica a cargo dos motores gráficos onde é feita a abstração para os hardwares. Os motores gráficos mais conhecidos são DirectX, Edge, Glide, libgcm e o OpenGL também responsáveis pela iluminação, texturas, câmeras, textos e fontes Brexó; Sant’Ana (2017) (AGUILAR,2017).

2.5.2 Simuladores aplicados na robótica móvel

As simulações aplicadas à robótica móvel é são as mesmas aplicadas à robótica em geral, porém existem alguns simuladores como Gazebo, ARGoS, Webots,V-Rep ,Vortex mais utilizados pelos pesquisadores para esse fim, conforme apresentado no trabalho de Ivaldi et al (2014). Existem outros simuladores utilizados por pesquisadores para a robótica móvel como o ADAMS, Autodesk Inventor, Bullet, ODE, Morse, roborobo, SimTwo, SimRobots e USARSim, mas que não foram considerados neste trabalho, o que não os tornam menos significativos, apenas menos utilizados. Apresentar-se-á, neste trabalho, a arquitetura dos principais simuladores e suas principais característica que tornam estes simuladores mais atrativos no uso da robótica móvel.

2.5.2.1 Gazebo

O Gazebo é um simulador *open-source* de múltiplos robôs para cenários externos, capaz de simular uma população de robôs, sensores e objetos. O Gazebo permite vários motores de física, mas o mais comum é o uso do ODE. É capaz de proporcionar uma simulação de alta fidelidade em cenários complexos, permitindo uma variedade de aplicação. O simulador apresenta o modelo do KUKA youBot usando uma abordagem cinemática, logo as rodas não se movem, apenas o veículo se move na direção desejada Greef (2015). O Gazebo possui

arquitetura distribuída, formada por bibliotecas separadas para simulação da física, renderização, interface do usuário, comunicação e geração de sensores. É constituído por dois softwares, um como servidor (para a simulação da física, renderização e sensores) e outro como cliente (responsável pela parte gráfica da *interface* de interação com a simulação) (GAZEBO, 2017).

A arquitetura do Gazebo por dependência de módulos é representada na Figura 2.9:

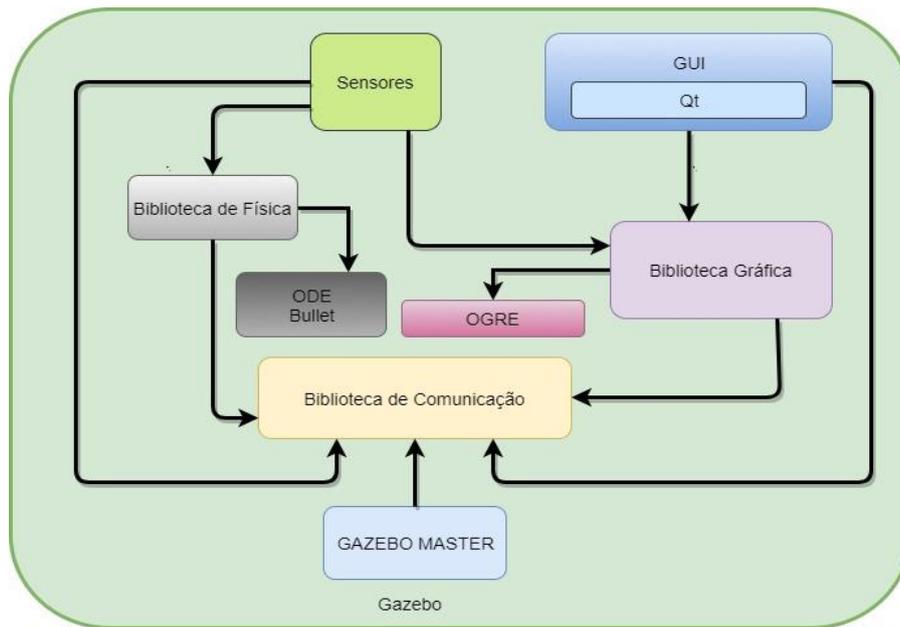


Figura 2.8 – Arquitetura do Gazebo.

Os requisitos de hardware para a execução do Gazebo são: GPU dedicada (Nvidia tem bom desempenho no Ubuntu), CPU Intel i5 ou equivalente e 500MD livres em disco.

2.5.2.2 Argos

O Argos é um simulador completo para análise de diferentes tipos de robôs, com possibilidade de simulação de múltiplos robôs. É o primeiro desse tipo, eficiente em termos de desempenho e é flexível, sendo altamente personalizável. O ARGoS permite particionar o espaço de simulação em vários subespaços além do uso de diferentes mecanismos físicos (PINCIROLI et al. 2012)

Para tornar o ARGoS flexível, projetou-se para ser modular em todos os níveis. Seus componentes foram implementados como módulos de software que podem ser selecionáveis em tempo de execução. Estes módulos, também chamados de *plug-ins*, podem ser modificados

livremente pelos usuários, deixando-os completamente personalizáveis para qualquer experimento. Os *plug-ins* são compostos por código de robôs, sensores e atuadores, também são *plug-ins* motores de física e gráficos. Cada *plug-in* tem diferente nível de precisão em custo computacional (PINCIROLI et al. 2012).

A arquitetura do ARGoS pode ser representada pela Figura 2.10, onde cada retângulo representa um *plug-in* definido pelo *Webots*

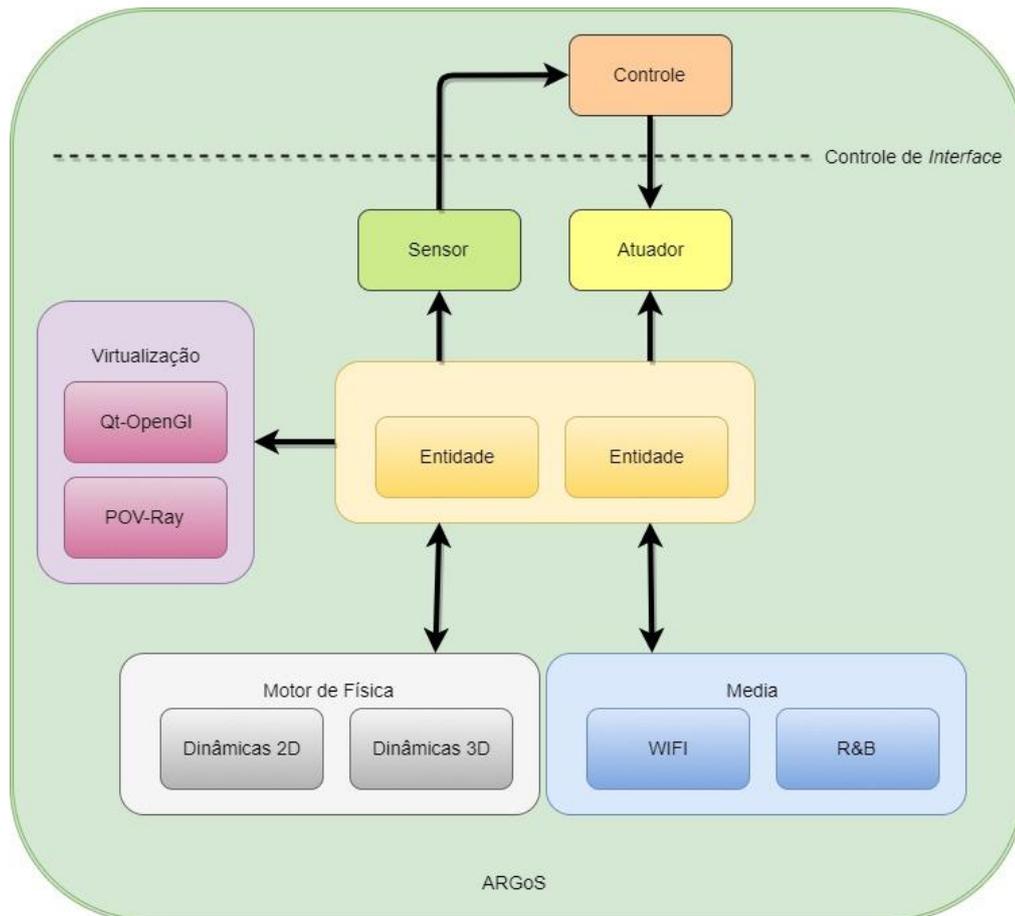


Figura 2.9 – Arquitetura do ARGoS (Adaptado de ARGoS, 2017).

O Webots, atualmente, é um simulador comercial de robôs amplamente utilizado para robótica educacional. Foi desenvolvido, inicialmente, para os robôs Kepera3. Utiliza como motor de física o ODE em suas simulações. O Webots, além de ser utilizado em robótica educacional, também é utilizado em pesquisas com robôs móveis, prototipagem de robôs móveis, pesquisas de locomoção de robôs, pesquisa de comportamento adaptativos (GREEF, 2015).

Outra característica do Webots é aceitar controladores feitos em diversas linguagens de programação, como C/C++, Java, Python e Matlab. Entretanto, para linguagens interpretadas é necessária a instalação de software adicional (WEBOTS,2017). O simulador permite ainda controles de software de terceiros como labView, Lisp através de uma interface de comunicação TCP/IP(MICHEL, 2004).

Um ponto positivo do Webots é que ele foi desenvolvido com a finalidade de ser aplicado em um robô real. Segue o ciclo de modelagem, programação, simulação e aplicação, conforme a figura 2.11 .

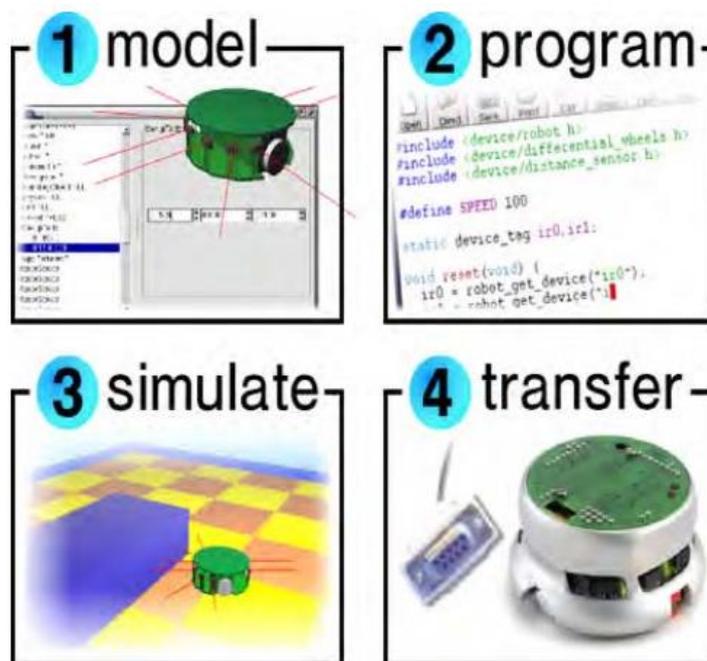


Figura 2.10 – Estágios de desenvolvimento Webots, Fonte:(Michel 2004).

A etapa de simulação depende do recurso de computação disponível e do grau de complexidade do modelo, mas pode ser até 300 vezes mais rápido que a execução do robô real, usando o recurso de simulação rápida. Simulações de robôs complexos com articulações mecânicas requerem o uso de um motor de física, que, no caso do Webots, é desempenhado pelo ODE Michel (2004).

A transferência do código está disponível para alguns robôs comercial como o Khepera, Lego MindStorms e Hemisson. Podem ser feito por fio ou sem fio e ainda permitem controle remoto dos robôs (HOHL et al. 2006).

Os requisitos de hardware para a execução do Webots são: CPU dual core de 2GHz, 2GB de RAM, GPU NVIDIA ou AMD com, pelo menos, 512 MB de RAM.

2.5.2.3 V-Rep

O V-REP é um simulador de robôs com ambiente de desenvolvimento integrado que usa arquitetura de forma distribuída de controle, onde cada modelo pode ser controlado separadamente através de scripts. Permite comunicação com ROS, acesso remoto ou personalização de solução. O simulador é extremamente versátil pois, aceita controladores escritos em C / C ++, Python, Java, Lua, Matlab ou Octave. Sendo utilizado para simulações de fábrica, monitoramento, robótica educacional e prototipação e verificações rápidas (V-REP, 2017).

Para permitir, assim como os demais simuladores, criar cenários complexos, sua estrutura deve ser distribuída, ou seja permite a execução de cada tarefa de forma distribuída em cada núcleo da CPU ou distribuídos em várias máquinas (E. ROHMER S. P. N. SINGH, 2013).

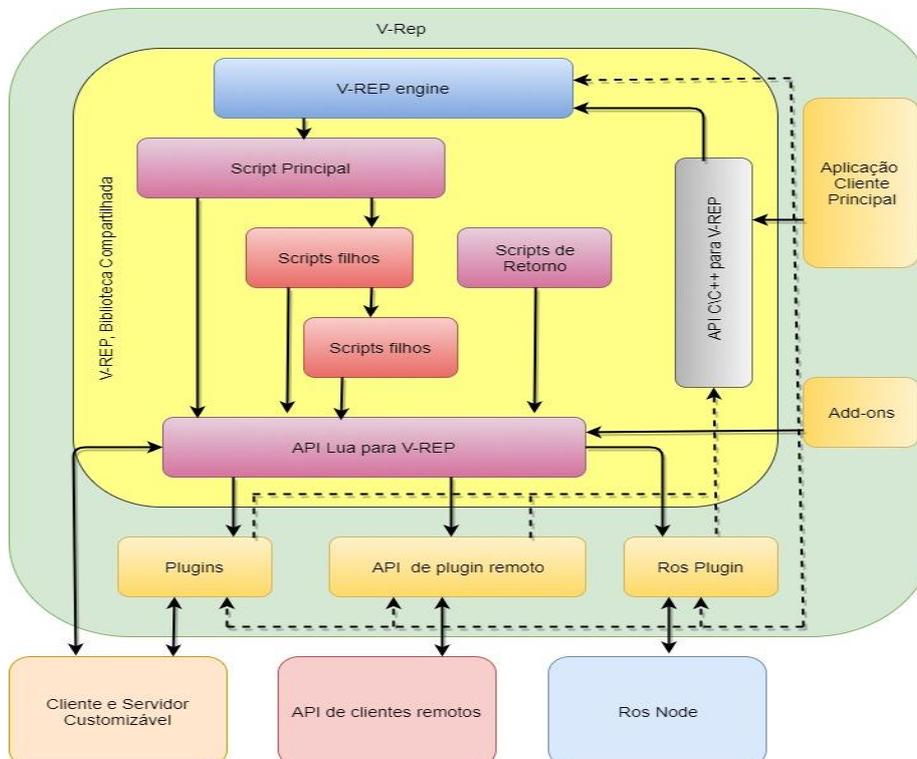


Figura 2.11 – Arquitetura do V-Rep (Adaptado de V-Rep, 2017).

2.5.2.4 Vortex

O Vortex é um simulador multi-corpo desenvolvido pela CM-LABS, baseado nas leis fundamentais da física, sendo otimizado para trabalhar em simulações em tempo real de alta precisão. É utilizado para simulação de veículos, robôs terrestres e marítimos, equipamentos pesados, treinamento de operadores e prototipagem. Apresenta um SDK flexível e pode adicionar a física do movimento e interações entre os objetos aplicados na simulação Tang et al. (2011). Assim, não utiliza um motor de física de terceiros comum nos outros simuladores. O Vortex utiliza sua própria representação da dinâmica dos corpos, sua implementação é representada na figura 2.13

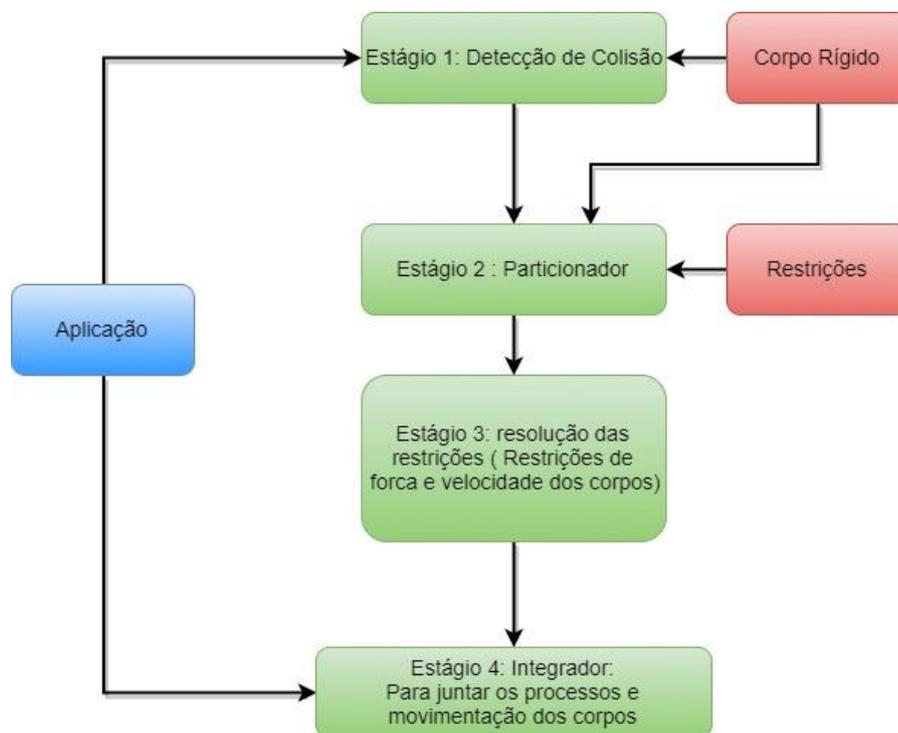


Figura 2.12 – Física Vortex.

Porém, necessita de um recurso computacional alto, comparado com os demais simuladores. Os requisitos de hardware para a execução do Vortex, recomendados pela CM-LABS são: CPU 3.4GHz (i7-47xx ou superior), 32GB de memória RAM e GPU GTX770 ou superior.

2.6 Considerações finais

O referencial teórico apresentado neste capítulo serve de base para o entendimento sobre as dinâmicas envolvidas no sistema de locomoção dos veículos robóticos e em seu atuador, bem como a teoria do controlador *Fuzzy*, além da teoria do funcionamento dos simuladores de robótica que será utilizado para a validação da estratégia de modelagem da dinâmica de AGVs proposta neste trabalho.

Capítulo 3

TRABALHOS CORRELATOS

De acordo com Clarke (2001) e Cordeiro et al. (2007), a revisão sistemática responde a uma questão bem formulada utilizando métodos sistemáticos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar pesquisas relevantes, e coletar e analisar dados de estudos. Conforme Kitchenham (2004) e Pai et al. (2004), esse método busca produzir uma síntese total e imparcial que segue um processo claro e bem definido e aberto.

Seguindo essas abordagens de revisão sistemática e com o propósito de realizar a revisão da bibliografia de forma organizada e estruturada do tema, elaborando uma síntese dos conceitos teóricos e dos trabalhos relacionados, assim os resultados por estes alcançados. Para tornar as fontes mais abrangentes, foram utilizadas as principais ferramentas de buscas acadêmicas que englobam em suas pesquisas várias bases de dados. Ainda foi realizada busca manual e incorporada à base de artigos selecionado pelo laboratório Tear. As buscas realizadas por *strings* foram formadas por operadores lógicos e truncamentos a partir das palavras chaves. As *strings* de busca foram elaboradas com o propósito de trazer:

- Trabalhos com mesma técnica ou abordagem propostas nesta pesquisa, considerando as ainda diferentes áreas, mas que oferecem técnicas que podem ser relevantes ao trabalho.
- Trabalhos com abordagens diferentes, mas que apresentam mesmo tema com foco na robótica móvel com tração diferencial, seguidor de linha que expõem um modelo cinemático ou dinâmico.
- Trabalhos com simuladores de robótica com foco na robótica móvel, que apresentem os recursos e características desses softwares.

- Trabalhos de sistemas de controle *fuzzy* e técnicas *fuzzy* com foco nos AGVs e que comparam o *Fuzzy* com controles clássicos.

Além disto, as *strings* foram organizadas de forma que facilitem o acesso às fontes que foram pesquisadas e aceitas após filtros de seleção com base nas diretrizes da revisão sistemática. Neste aspecto de organização, foi utilizado o software Mendeley de gerenciamento de referência bibliográfica, permitindo listar rapidamente por publicação, autor e ano além de auxiliar na criação da síntese de cada trabalho pesquisado.

Antes de realizar o processo investigativo sobre a questão central deste trabalho, foi realizada uma pesquisa de relevância acadêmica do tema deste trabalho. Também foi realizada uma busca na base de dados de patentes da Derwent, no sistema de busca do Periódico CAPES e Google Acadêmico sobre a *string* de busca “Automated Guided Vehicle” em títulos de artigos e patentes realizadas. Conforme observado na Figura 3.1, há diminuição de artigos deste tema, o que sugere que este está em declínio. Entretanto, há um crescimento no índice de patentes sobre o tema, indicando que ainda é relevante, apesar da diminuição dos artigos.

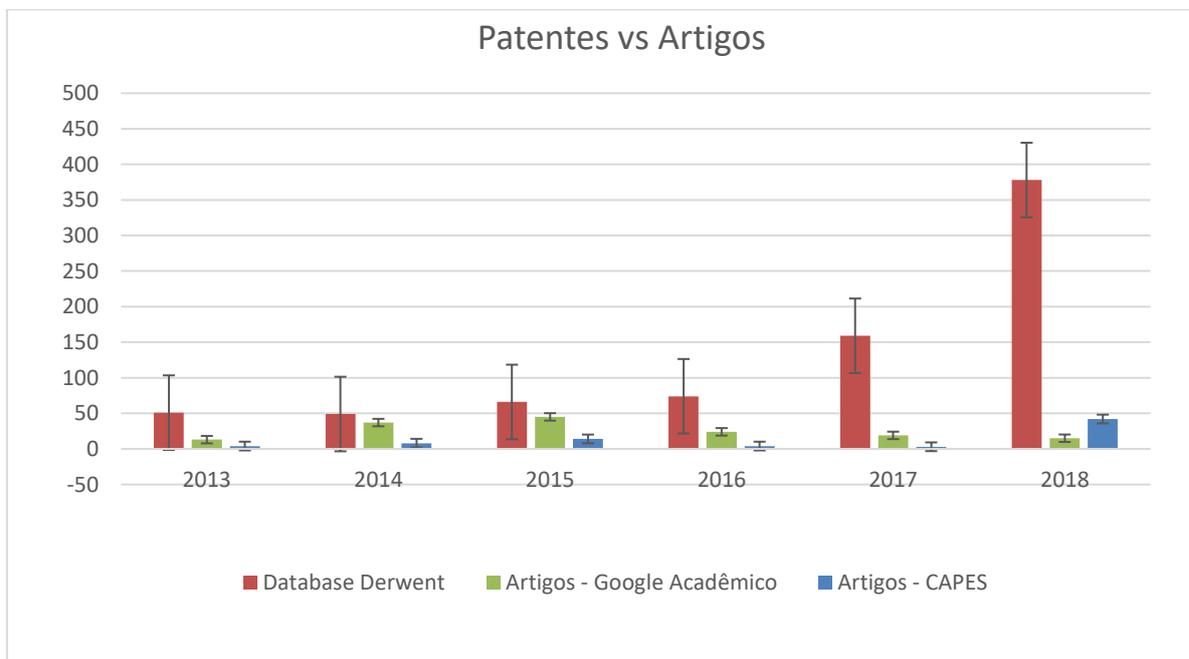


Figura 3.1 – Gráfico Patentes/Artigos por Ano.

Contudo, os AGVs exigem um controle capaz de contornar as não linearidades do sistema. Desta forma, é indispensável a informação do estado futuro e atual para o controle, devido ao seu comportamento aperiódico. Logo, para realizar o controle foi optado pelo

controlador *Fuzzy*. Uma técnica de controle que superou controles clássicos, pois estes tratam de forma inteligente as características não lineares do sistema do AGV, conforme trabalhos apresentados por Mac et al. (2016), Dianyong e Hui (2003), Sakir et al. (2017) e Kodagoda et al. (2002).

Na abordagem de Kodagoda et al. (2002) utilizou-se a lógica *fuzzy* para a síntese das leis de controle, facilitando a incorporação de heurísticas de controle e garantindo a estabilidade no controle de direção do veículo controlado por um computador industrial. E, de acordo com Sakir et al. (2017), o sistema de inferência *fuzzy* é o que apresenta melhor resultado e é o mais popular usado no campo de controle e robótica. O método garante a entrada de vários parâmetros no sistema, como distância, posição, ângulo e largura da estrada. A relação do veículo e sua carga causam maior impacto na mobilidade. O sistema de inferência *Fuzzy* é capaz de obter saída do sistema de controle com base em entradas de valores linguísticos, ajudando AGV a obter uma velocidade constante.

No trabalho de Dianyong and Hui (2003) seu controle *fuzzy* apresenta auto ajustes para melhorar o desempenho do controle principal e reduzir a complexidade do modelo do sistema do projeto, sendo esta abordagem adaptativa eficiente em sistema não linear, conforme visto neste trabalho.

Omrane et al. (2016) descreve a implementação de robô seguidor de linha, diferentemente de outros trabalhos que utilizam um controle para navegação e outro para contorno de obstáculo. Em seu trabalho empregou um único controlador *fuzzy* para navegação e para evitar obstáculos, avaliando este controle por simulação usando o MATLAB e SIMIAM. Porém, utilizou uma modelagem puramente cinemática do robô. No trabalho de Resende et al. (2011), foi exposto um controlador *Fuzzy* Takagi-Sugeno de rastreamento de trajetória para um robô móvel. O controlador utilizado permite definir ganhos diferentes de acordo com os valores da velocidade e pelo erro de rastreamento. O ruído intrínseco da odometria do robô é corrigido no próprio controlador sem a necessidade do uso de filtro, mostrando o quão robusto pode ser um controle *fuzzy* a pequenos ruídos.

A abordagem de Li et al. (2016) mostra um sistema de controle de AGV mais suave e estável implementando uma fusão de técnica entre o PID e *Fuzzy* e ainda, para reduzir os ruídos no sistema de reconhecimento físico, foi aplicado o filtro de Kalman, que prevê a posição do AGV no momento seguinte, apresentando melhor desempenho que um controle clássico.

No trabalho de Renawi et al. (2017) foi apresentado o modelo cinemático e o modelo dinâmico usando equações de Lagrange após generalização da coordenadas em vetores de um robô móvel não-holonômico de movimentação diferencial (Kobuki). Para validação do controlador utilizado para rastreamento do trajeto, foi empregado o simulador Gazebo em confronto com o modelo real, o qual resultou em uma diferença da odometria real e à simulação do robô Kobuki. As trajetórias utilizadas nos testes foram em formato de quadrado e de rosa. Em Sharma (2016) a abordagem é similar, com modelagem da cinemática e da dinâmica baseada em Lagrange mas, com controle por modo deslizante do rastreamento do trajetória. Para validação do modelo robô móvel utilizou o MATLAB e para resolução do sistema do resultante usou o ODE45.

Para garantir que a técnica de controle obtenha o desempenho esperado é fundamental uma representação próxima do modelo, com este intuito, no trabalho de Kumar e Mija (2015), foi realizada a modelagem do motor CC para controle de sua velocidade por um PID adaptativo com técnica de controle por modo deslizante dinâmico, avaliando o desempenho do controlador proposto por simulação usando o MATLAB e o motor CC linear com perturbações. O controle da velocidade do motor CC realizado por Singh (2015) com a técnica SMC que compara, usando simulação feita no MATLAB, um motor linear e o não linear, o controle PID com o controle SMC. Os resultados mostram que o SMC oferece melhor desempenho que o PID principalmente em modelos não lineares, o qual o PID teve pior resultado. O SMC tem uma natureza robusta na presença de tais distúrbios.

No trabalho de Archila e Becker (2013) foi definido um modelo matemático para projeto de um AGV similar ao utilizado neste trabalho, com seis rodas e com tração diferencial nas rodas do meio de cada lado, utilizados em FMS (Sistema Flexível de Manufatura). O modelo proposto para projeto de AGV, com modelagem da cinemática e dinâmica do AGV, para a área de mecânica, elétrica e controle utilizado o CAD e a ferramenta CAE desenvolvida pela SolidWorks. O controle do modelo matemático do AGV foi projetado receber do odômetro a posição e a velocidade das rodas. O controle do AGV foi realizado em três partes: primeiro, o controle do motor que pode ser cinemático ou dinâmico; segundo, o planejamento do caminho; e terceiro, o planejamento de tarefas realizado pelo sistema SCADA, apresentando um movimento cinemático do AGV. Hatab e Dhaouadi (2013) também apresentam uma modelagem matemática de um robô móvel com rodas diferenciais usando o método de Lagrange e o método de Newton-Euler, mas neste trabalho é utilizada a modelagem do motor CC incorporada no modelo dinâmico do robô, mostrando a equivalência das duas abordagens

de modelagem matemática da dinâmica, por Lagrange e pelo método de Newton-Euler, do robô móvel com tração diferencial.

Em trabalhos com controles puramente cinemáticos ou com negligência da dinâmica dos atuadores apresentam grande perda de acurácia no modelo real. De acordo com apresentado por Hwang (2016) comparando um robô tipo veículo, que apresentava a dinâmica do motor contra os modelos sem a dinâmica do motor, mostrou que o modelo sem a dinâmica fica instável e não tem controle adequado do veículo.

Para facilitar trabalhos acadêmicos sobre robótica são utilizados software de simulação que realizam a análise da dinâmica dos corpos presentes no modelo, permitindo ao pesquisador focar apenas em seu experimento. Como demonstrado por Tang et al. (2011) que, após realizar a definições mecânicas do veículo, mostrou que o simulador fez uma representação correta da dinâmica do veículo, apesar de simplificada. Esses simuladores são utilizados para prototipação, facilitando o teste de controle do robô, como realizado por Gomes et al. (2016), que utilizou o simulador MORSE em conjunto com o ROS para avaliar seu controle PID do robô PIONER3D guiado por uma câmera RGB, deixando toda cinemática do veículo por conta do software. No trabalho de Michel (2004), após as etapas de modelamento, controle e simulação do robô, é realizada a transferência desse controle para um robô real validado o controle. Feita por meio do simulador Webots, permite a transferência de forma simplificada para alguns modelos contemplados no software, permitindo ainda o acompanhamento da simulação de forma sincronizada com os movimentos do robô real.

Em outros trabalhos, fica evidente o ganho com a utilização dos simuladores permitindo um controle do ambiente simulado com múltiplos robôs e sensores. Rohmer et al. (2013) mostra que o Simulador V-REP permite integração com diversos Add-ons, Plug-ins e API deixando o software extremamente flexível e configurável, permitindo ainda comunicação com o ROS. A simulação em V-REP é montada por uma Hierarquia tipo árvores, onde cada objeto da cena pode ser composto por: juntas, formas, sensores de proximidade, sensor de visão, sensor de força, gráficos, câmeras, luzes, caminhos, entre outros. O módulo responsável pela cinemática, permite tanto cálculo da cinemática direta, quanto da cinemática inversa. O módulo da dinâmica é responsável pelo comportamento dos corpos rígidos no cenário virtual, podendo ser utilizado pela biblioteca de física de terceiros, como a Bullet ou ODE.

Greef (2015) utiliza em seu trabalho o simulador USARSim baseado no motor de jogos Unreal UDK com motor de física da PhysX da NVIDIA para validação do controle do robô

KUKA youbot, avaliando o atrito das rodas mecanum. O simulador foi implementado, aproveitando os recursos do motor de jogos. A abordagem de Pires et al. (2014) utiliza diretamente o motor de jogo Unity 3D para implementar uma plataforma robótica teleoperada.

PROPOSTA DO TRABALHO

4.1 Descrição do Trabalho

O presente trabalho tem como proposta a validação de uma estratégia de modelagem simplificada para representar dinâmica de um AGV com tração diferencial, seguidor de linha com câmera RGB, por meio da dinâmica dos atuadores. Para essa simplificação, será considerado que a variação de massa esteja distribuída de forma uniforme, assim teremos a metade do peso em cada motor. Também se espera que essa estratégia possa ser aplicada em cenário real e que obtenha um resultado melhor que no simulador MORSE, que utiliza apenas a representação cinemática, aplicando as mesmas condições de parâmetros do corpo rígido que moldam o comportamento do veículo.

A elaboração desta proposta será realizada em duas etapas:

- **Modelagem Matemática:** será realizada uma síntese dos principais modelos de representação de motor para gerar um método numérico, resultando em valores discretos no domínio do tempo para utilização na simulação.
- **Simulação:** será desenvolvida para representar o comportamento da pista em resposta ao controlador, servindo de entrada para o controle por meio de uma câmera RGB do AGV. A simulação da pista deve respeitar o modelo matemático proposto nesta pesquisa e trabalhar em conjunto com motor gráfico presente no Unity3D.

A modelagem matemática do motor CC será desenvolvida utilizando o MATLAB e considerando as especificações do motor fornecidas pelo fabricante para o cálculo da função de transferência, que levará em consideração a resistência da armadura, a indutância, a inércia, o

atrito viscoso, o atrito do torque, a constante do torque, a constante de tensão e a corrente máxima do motor.

Na etapa de simulação será utilizado o motor de jogos Unity3D que usa o DirectX 11 ou OpenGL mostrado na figura 4.1., que emprega o modelo da dinâmica do motor, levando em consideração a massa total do veículo. Os parâmetros de peso, de dimensão do veículo e da roda do AGV serão definidos conforme o veículo real, assim como suas características de mobilidade.



Figura 4.1 – Motor de Jogos Unity3D

A implementação da proposta ocorreu conforme o fluxo seguinte (representado na Figura 4.2), onde, inicialmente, realizaram-se os cálculos, conforme o modelo do motor do AGV. Posteriormente, esse modelo foi atribuído no Matlab, afim de gerar a informação da resposta da função de transferência a um degrau unitário. A resposta obtida pelo Matlab foi então discretizada para ser empregada no sistema de simulação feito no Unity. Uma câmera RGB virtual captou as imagens geradas pelo simulador, com taxa de 30 FPS, sendo este o valor padrão em câmeras reais. As imagens captadas foram, então, processadas pelo sistema de visão computacional, que coletou as informações que alimentaram o controle Fuzzy/PID e este as reenviou para o simulador.

Com utilização desta configuração para validação da proposta, é indispensável avaliar o tempo de gasto em cada etapa para garantir uma simulação mais próxima do cenário real.

Para isto, foi estipulado o tempo entre a captura da imagem pela câmera RGB e o processamento da imagem, o sistema de controle e os scripts aplicados no simulador, até sua representação pelo motor de jogos.

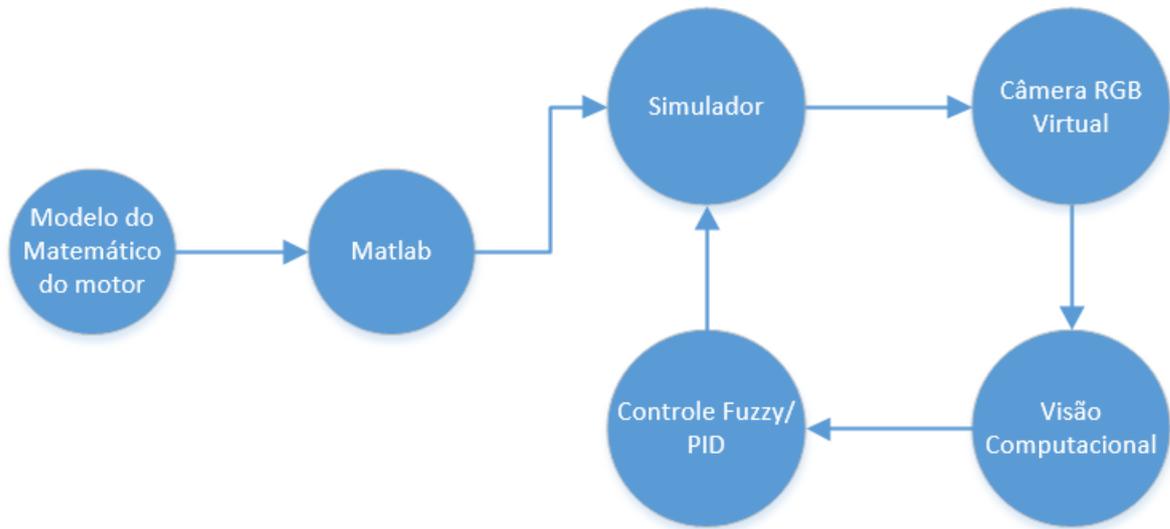


Figura 4.2 – Fluxo de dados da estratégia

Finalmente, toda documentação gerada no trabalho, juntamente com os futuros artigos publicados e o sistema de validação servirão para implementação do AGV em cenário real.

4.2 Modelo Matemático Proposto

A estratégia de modelar o atuador do AGV serviu para representar a dinâmica total do veículo de forma simplificada, pois é o principal componente responsável pela locomoção. As demais forças foram consideradas perturbações no motor. O modelo da função de transferência do motor controlado pela corrente de armadura que foi utilizado é visto na equação 4.2.1, sendo T_A o torque de atrito e T_C o torque da carga.

$$\omega(s) = G_1(s)V(s) + G_2(s)[T_A(s) + T_C(s)], \quad (4.2.1)$$

onde:

$$G_1(s) = \left. \frac{\omega(s)}{V(s)} \right|_{T_A(s) + T_C(s) = 0}$$

$$G_2(s) = \frac{\omega(s)}{T_A(s) + T_C(s)} \Big|_{V(s)=0} \quad (4.2.3)$$

O diagrama do motor CC utilizado é representado pela Figura 4.3, de acordo com a tensão de entrada V , dada pelo drive de controle de motor do AGV, gerando uma velocidade angular resultante.

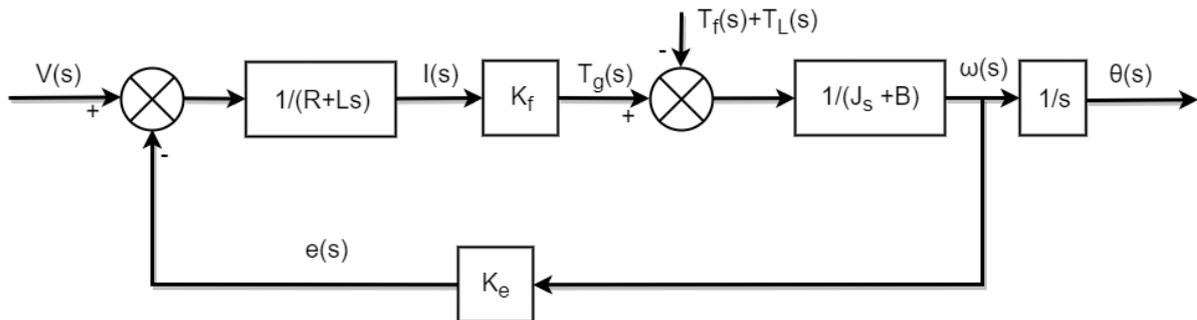


Figura 4.2 – Diagrama de blocos Motor CC com perturbações.

4.3 Sistema de Validação

A estratégia de validação se compõe de uma simulação puramente cinemática e uma segunda, com a dinâmica dos atuadores do AGV. Com o intuito de validação dos experimentos, necessitou-se estipular os cenários de testes e como seriam realizados, bem como os parâmetros e variáveis utilizados para sua elaboração.

Desta forma, definiram-se as trajetórias utilizadas nos cenários simulados. Conforme Bostelman and Bourgoigne (2015) e algumas das recomendações da ASTM F45, constituem-se por duas pistas de teste: uma circular, com 3 metros de diâmetro e outra quadrada, com lado 3m. Levando em consideração algumas características do modelo, adicionaram-se mais duas trajetória em forma de infinito e em forma de oito digital, conforme apresentado no capítulo 5. Avaliou-se o erro médio, o erro máximo e o desvio padrão das medições. No cenário virtual, deve-se estipular o atrito, considerando os materiais envolvidos para sua representação.

O sistema de controle utilizado seguiu a figura 4.4 em todas as pistas, tanto para os cenários cinemáticos, quanto para os com a dinâmica dos atuadores.

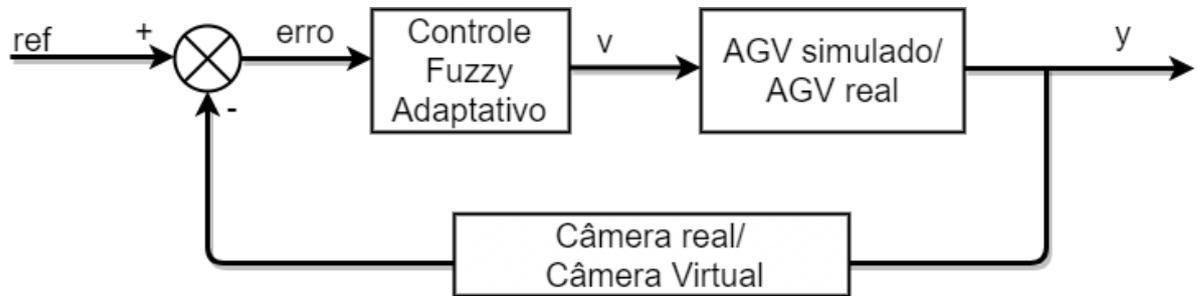


Figura 4.3 – Diagrama de Blocos do Sistema de controle.

O sistema de validação como parte do esforço para falsificar a hipótese foi separado em dezesseis experimentos, afim de englobar todos os cenários, tanto na cinemática quanto na dinâmica conforme a Figura 4.5.

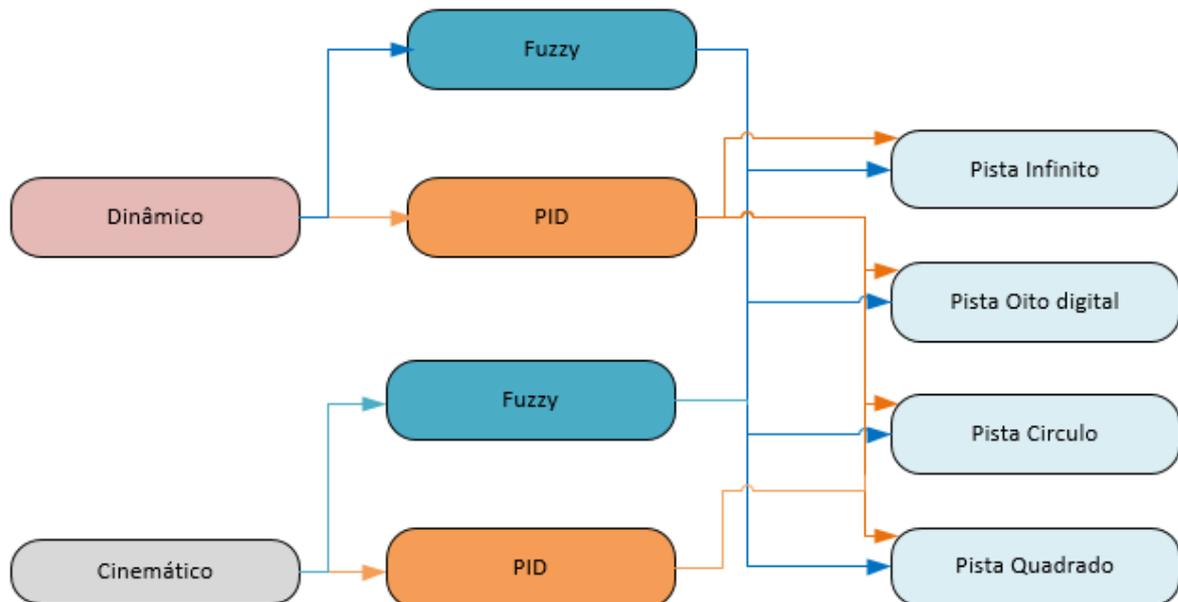


Figura 4.5 – Sistema de Validação.

4.3.1 Unity Cinemático

O primeiro experimento ocorreu sem considerar a massa do veículo na simulação, apenas as características de dimensões e das rodas, assim como o empregado no simulador de

robótica MORSE, no entanto, desenvolvido por meio do Unity3D. Para isso, desativou-se o motor de física para teste apenas cinemático do AGV. O componente de sensoriamento externo realizado pela câmera foi implementado no AGV simulado por meio de uma câmera virtual com captura interna no cenário virtual. O controle executou-se no mesmo computador em paralelo ao Unity3D. Este experimento foi realizado para comparações futuras com a proposta da dinâmica dos motores, afim de mensurar a distância entre as estratégias de simulação de robôs, uma vez que este simulador pode auxiliar na sintonia do controle do modelo real.

4.3.2 Unity Dinâmico

Este experimento ocorreu utilizando o Unity 3D conjuntamente com os dados obtidos pelo Matlab através do modelo do motor. Ou seja, o comportamento do AGV simulado considerou a massa do veículo para realização do cálculo da dinâmica do sistema, além da dinâmica do atuador que fez parte da proposta. Logo, apresentaram-se as inércias provocadas pela massa das rodas em conjunto com estrutura do veículo. O AGV simulado, assim como o cinemático, apresentou uma câmera virtual para o seguimento da linha. O controle do AGV também se executou em paralelo ao simulador, com o objetivo de atingir a resposta desse sistema e esta se distancie do puramente cinemático, provando para representação de AGV's, que uma grande variação de carga não poderia ser desconsiderada na dinâmica do modelo para controle.

4.3.3 Resultados Esperados

Com os testes, espera-se ainda que o modelo proposto apresente melhor acurácia, tanto na simulação, quanto na representação do modelo real. E, por fim, que, após sintonizar o controle *fuzzy*, controle *fuzzy* adaptativo ou mesmo PID realizada no simulador, permita-se diretamente no modelo real do AGV.

Capítulo 5

DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, apresentar-se-ão detalhes dos aspectos gerais aplicados no desenvolvimento dos dezesseis cenários de testes definidos na proposta, seguindo a estratégia de validação da hipótese explanadas no capítulo anterior, além da demonstração dos cenários, das técnicas de visão do veículo, do controle PID, do controle *Fuzzy* adaptativo e do modelo do motor elétrico empregado no simulador, por serem necessários para a realização dos ensaios.

5.1 Considerações Iniciais

A fim de obter um melhor entendimento de como realizaram-se os testes e montagem do banco de dados utilizados para a validação da proposta, detalhar-se-ão alguns aspectos importantes na criação e execução do experimento.

O primeiro aspecto é o desenvolvimento das pistas utilizadas para a coleta dos dados dos sensores que determinam a acurácia dos controles. Para isso, realizou-se uma demarcação da guia da trajetória com uma fita preta de 19mm de largura fosca para aumentar o contraste em relação a textura do piso de concreto comumente empregado nas indústrias. Logo, foi considerada a mesma proporção da pista e linha na modelagem da guia com a mesma largura do ambiente real. Para tornar a análise do comportamento do veículo simplificada, as pistas tiveram demarcação do início ao fim da coleta dos dados. Por objetos de colisão para identificação no ambiente do Unity, no módulo da visão computacional, utilizaram-se traços vermelhos perpendiculares à linha de trajetória. Isto gerou um banco de dados com intervalos bem definidos para cada região percorrida pelo veículo. Antes dos experimentos em cada pista, foi aplicado em uma linha reta afim de estimar o tempo de estabilização do controle aqui chamado de $T1$, de modo que, após esse teste, auferiu-se a distância mínima $D1$ para a coleta dos dados do controle entre as estações $E1$ e $E2$.

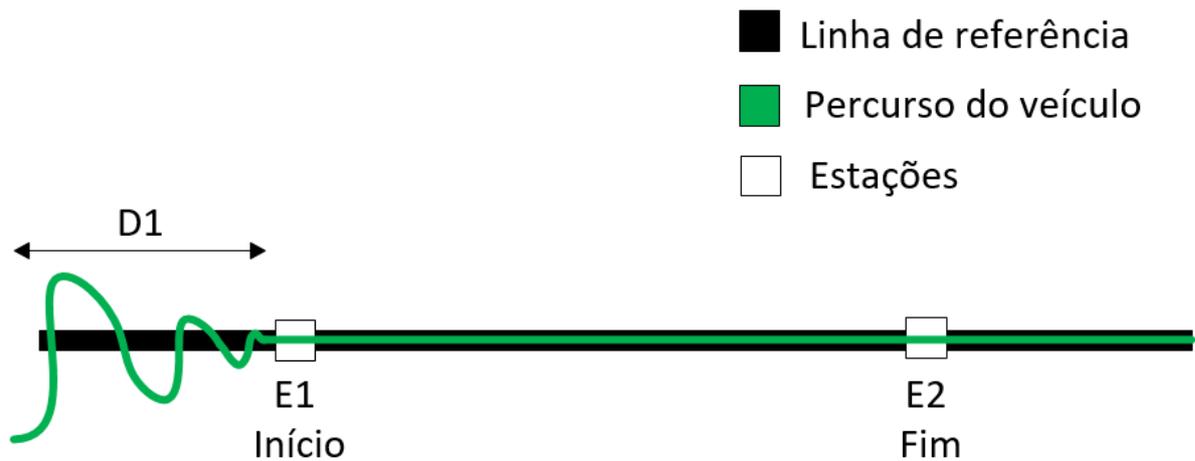


Figura 5.1 – Pista 01

A segunda pista, traçada em uma forma circular, inscrita em um quadrado de 3x3m conforme a ASTM F45.02, medindo a resposta do controle em curvas não acentuadas, contabilizou cada volta ao passar novamente pela origem E1. A terceira pista apresentou o quadrado externo da segunda pista, servindo para testar as curvas com angulação de 90° e provocar uma maior perturbação no controle. Nesta pista introduziu-se ao veículo a noção da estação atual E_n e futura E_{n+1} conforme a Figura 5.2(b).

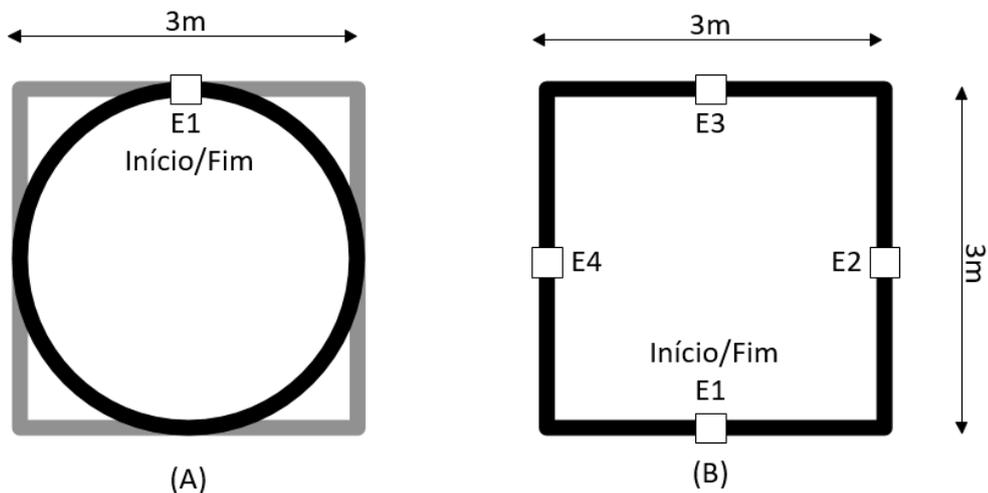


Figura 5.2 – (A) Pista 02 e (B) Pista 03

As duas últimas pistas eram dois quadrados, em formato de oito digital e o formato de infinito conforme a Figura 5.3., tornando-as mais realistas, com os desafios dos ambientes industriais ao ter múltiplas estações com diferentes rotas e tratando o problema das bifurcações da pista. As locomoções sobre as pistas foram realizadas no sentido horário e anti-horário, uma vez que o modelo físico, assim como o modelo 3D, não apresentou uma construção simétrica. Logo, poderia ocorrer um comportamento diferente para cada sentido por ter um centro de massa deslocado do centro geométrico.

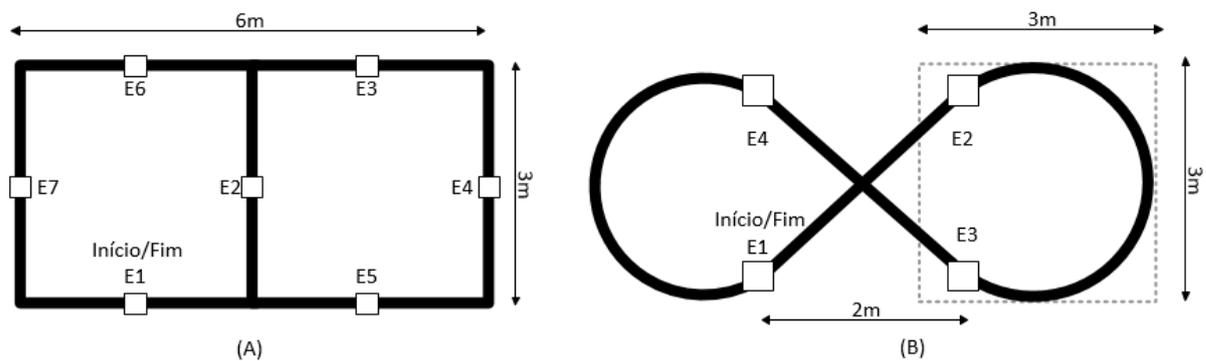


Figura 5.3 – Pista formato oito digital e infinito

Em cada pista utilizou-se dois tipos de controle, o PID e o *Fuzzy*, para minimizar a possibilidade de vício a um tipo de controle específico. A velocidade linear média aplicada como referência nos experimentos foi de 1,25 m/s, sendo uma velocidade superior ao trabalhado em alguns artigos acadêmicos como do Bostelman et al. (2015) e Gomes et al. (2016), mas, conforme aplicações comerciais, como o Kiva (D'Andrea, Raffaello, 2012) e KMP 1500 (KUKA, 2018). Após o uso dos controles PID e *Fuzzy* armazenaram-se os dados das respostas do motor, o erro do ângulo e a distância em relação à linha de referência, com o intuito de tornar visível o comportamento do veículo em cada cenário, tornando possível uma análise das respostas esperadas de acordo com a literatura, em confronto com as respostas medidas nos experimentos.

Normalmente há um erro amostral por ser imensurável o número de repetições de testes e de coletas. Seguindo os padrões presentes em alguns artigos acadêmicos da área seria superior a dez repetições para cada pista, conforme o trabalho de Bostelman e Bourgoigne (2015), nos testes de *hardware*. Entrando, para testes de *software* dos simulados, foram executados apenas uma vez em cada cenário, por não apresentarem qualquer erro experimental e nem qualquer alteração nos dados da simulação anterior. Apesar de simularem uma câmera virtual que pode

ter pequenas variações nas taxas de captura, não houve a necessidade de repetir mais de uma vez, por não ser visível no sistema essas alterações a uma taxa de 30 FPS.

5.2 Descrição dos Cenários

Nos cenários com modelos puramente cinemáticos, apresentou-se uma modelagem simplificada do AGV no Unity 3D com chassi e modelo de acordo com as dimensões do modelo físico do veículo preservando a escala. As velocidades angulares e lineares dos veículos foram dadas pelo modelo cinemático do Capítulo 4, sendo similar ao modelo do MORSE que utiliza o *Differential Driver Actuator* nos robôs móveis com tração diferencial como o Segway RMP 400 e o Pioneer 3-DX.

Essa estratégia teve como objetivo realizar um paralelo com o MORSE e o modelo cinemático para efeito de comparação com o modelo dinâmico da estratégia.

A câmera virtual estava posicionada no centro do veículo, assim como o modelo real, com distância de 152,4 mm do piso formando um ângulo de 90° e uma abertura de captura de 100 x 100 mm conforme figura 5.4.

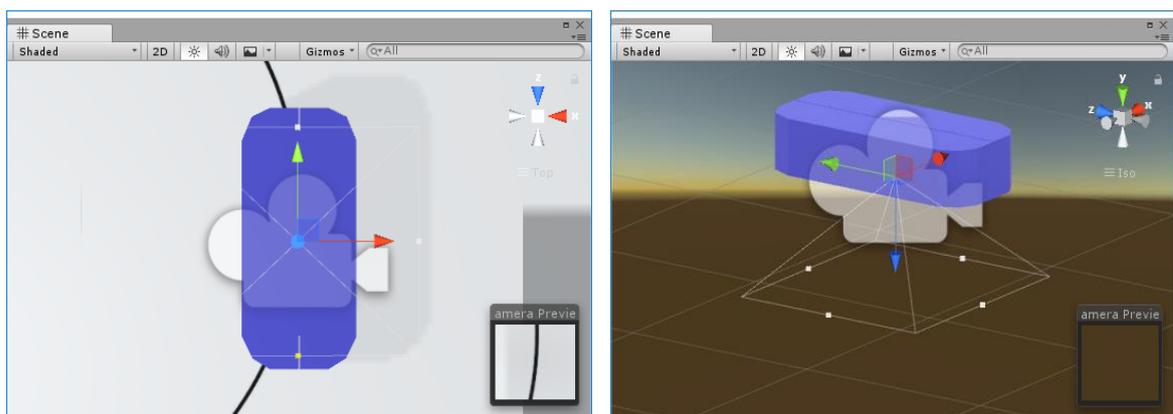


Figura 5. 4 – Modelo do AGV no UNITY 3D e Captura da câmera virtual.

A câmera virtual apresentou um valor de FPS dependente do poder computacional do hardware. Nos ensaios deste trabalho sua taxa foi de 70 FPS com variação de 2%, sendo superior a uma câmera CMOS padrão utilizada para vídeo conferência, a qual apresenta, em

média, uma taxa em torno de 30 a 60 FPS. Logo, limitou-se a taxa de captura da câmera virtual para 30 FPS. O *workstation* usado para simulação apresentou um processador i7-3537U com 2.5GHz, 8 GB de RAM, placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 550 Ti, DirectX 11, Unity 2017 versão 2017.1.0f3 Personal.

Os cenários das simulações da dinâmica, são semelhantes aos dos cinemáticos em termos de configuração de posição do veículo e dimensões, mas foi adicionado a dinâmica do veículo pela estratégia de incorporar na dinâmica do atuador. Logo após o cálculo da função de transferência do motor obteve-se a informação da velocidade angular de cada roda que foi empregada na simulação.

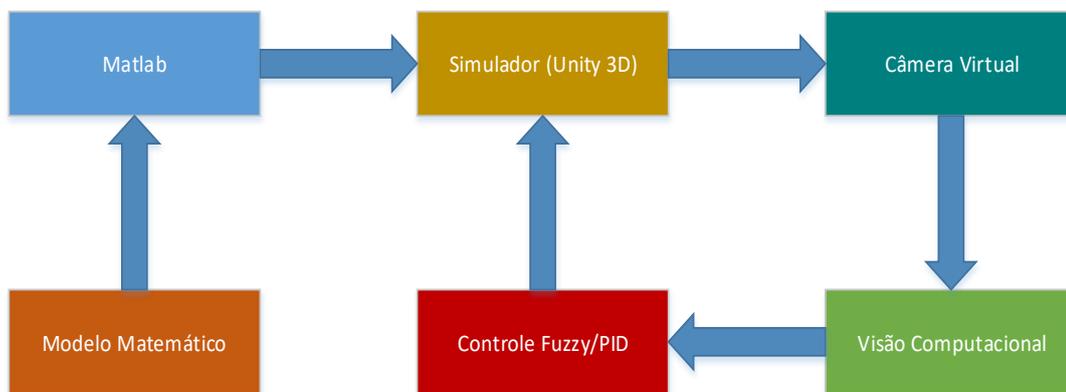


Figura 5.4 – Esquemas do cenário 02.

Sendo o intuito desses experimentos a representação da dinâmica do motor elétrico, com efeito de carga, desenvolveu-se a partir da função de transferência, respeitando em partes a inércia mecânica do modelo. Para elaborar essa função, utilizou-se os dados fornecidos pelo fabricante da resistência do campo de armadura (R), a indutância (L), a inercia do total do rotor (J) e o coeficiente de atrito viscoso (B).

O objetivo destes cenários dinâmicos era o de realizar o confronto com uma simulação puramente cinemática do veículo.

5.3 Sistema de Visão do AGV

O sistema de visão é responsável por informar aos controles a distância e a angulação do veículo em relação à linha guia por meio de uma câmera RGB. Entretanto, em algumas

situações as imagens capturadas pelo sensor poderiam apresentar ruídos ou até mesmo pequenos artefatos por interferência externa, necessitando de algumas transformações e utilização de filtros para remover estas interferências. Os ruídos poderiam surgir de diversas formas, como por iluminação, condições climáticas, tipo de sensor e posição do objeto de interesse (MARENGONI; STRINGHINI, 2010). Logo, foi necessária uma etapa de pré-processamento para redução dessas imperfeições, onde utilizou-se técnicas clássicas de visão computacional.

A primeira técnica utilizada para melhoria da imagem foi a equalização de histograma para diminuir efeitos provocados pela variação de iluminação na trajetória do robô. Após essa técnica usou-se o filtro Gaussiano para suavização e diminuição do ruído do tipo sal e pimenta, em seguida, a binarização, para tornar alto o contraste e facilitar a detecção da região de interesse e, por fim, a transformação morfológica de fechamento para eliminação de artefatos e aberto para voltar com o tamanho real da linha de guia da trajetória. Porém, a transformação morfológica se mostrou custosa para o *hardware* embarcado do veículo. Então, realizou-se uma diminuição na pirâmide de escala tornando todos os processos mais rápidos e ajudando, inclusive, o filtro gaussiano.

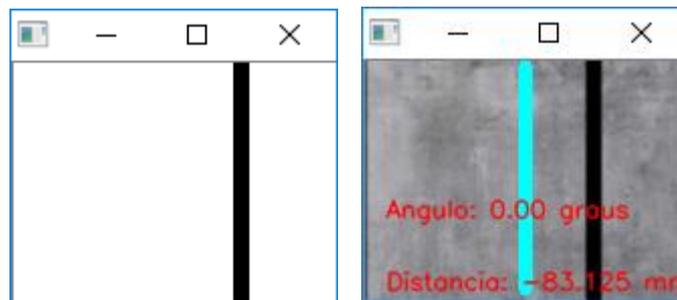


Figura 5. 4 – Imagem Original (a) Imagem com Pré-processamento (b).

Na etapa de processamento da imagem, identificaram-se cinco pontos centrais na imagem de captura da câmera, as quais geram linhas horizontais de referência em sua interseção com a linha guia, para determinar a distância em relação ao veículo. Também permitiram identificar quais os ângulos dos segmentos de reta que ligam esses pontos formando, em relação ao veículo conforme a Figura 5.5. Esse tipo de abordagem possibilita analisar o comportamento

da trajetória em um pequeno intervalo, de modo que, utilizando os pontos centrais, seja possível informar para o controle dados passados e futuros da trajetória.

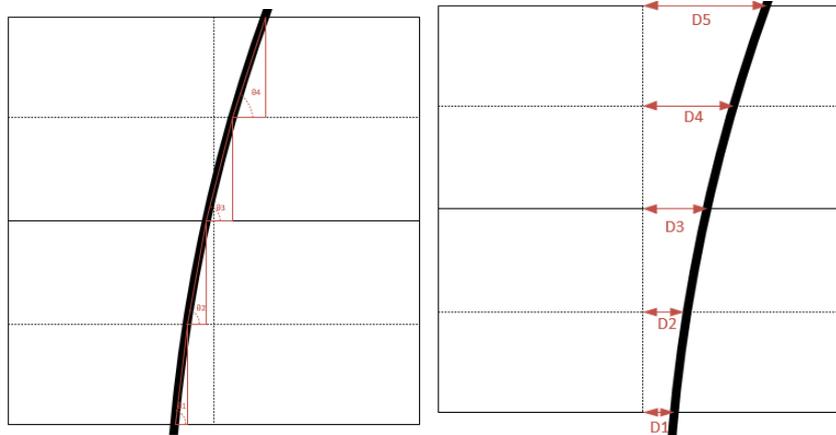


Figura 5. 5 – Imagem das medidas da pista: (a) Relação da distância (b) Relação do ângulo

Com as informações da distância e ângulo da linha guia e sabendo que não existe variação da distância do sensor CMOS em relação ao solo, o próximo passo foi transformar essas informações de pixel da imagem em uma unidade de medidas em metros. Sendo θ_d o ângulo do campo de visão, d a distância entre a câmera e a superficial de captura, d_p a distância aproximada que representava cada pixel determinada pela relação trigonométrica mostrada na equação 5, pois supõe-se que o plano do solo está perfeitamente em paralelo com o plano do sensor da câmera.

$$d_p = \frac{h_r}{h_{dig}} \cong \frac{2d \tan \frac{\theta_d}{2}}{\sqrt{W^2 + H^2}} \quad (5)$$

Sendo h_r o comprimento da diagonal da superfície capturada em metros, h_{dig} o comprimento da diagonal em pixels, H a altura da imagem e W a largura da imagem em pixels, conforme a Figura 5.6.

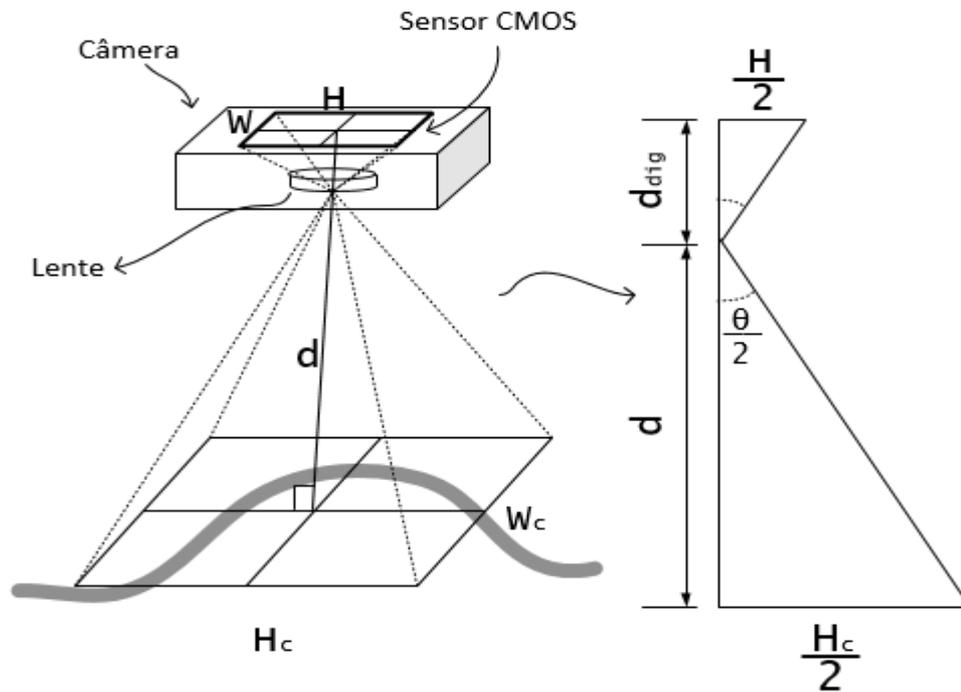


Figura 5.6 – Parâmetro de distância da câmera à superfície.

O ângulo relativo aos segmentos de retas formado pelos pontos centrais em relação a uma linha paralela ao eixo H, conforme a Figura 5.6 é dado pela equação 5.1.

$$\theta_{P_\alpha P_\beta} = \tan^{-1} \left(\frac{x_\alpha - x_\beta}{y_\beta - x_\alpha} \right) \quad (5.1)$$

Sendo $\alpha=1,2,\dots,5$ e $\beta=1,2,\dots,5$ dos pontos de interesse $P_\alpha=(x_\alpha, y_\alpha)$ e $P_\beta=(x_\beta, y_\beta)$ da linha guia.

5.4 Sistema de Controle PID

O controle PID ou controladores de três termos é uma técnica de controle de sistemas amplamente usada em ambientes industriais, baseadas em três termos: o proporcional, o integral e o derivativo, conforme a equação de transferência 5.2 (DORF, 2005).

$$G_c(S) = K_p + \frac{K_I}{S} + K_D S \quad (5.2)$$

Sendo representada em função do tempo pela equação 5.3.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (5.3)$$

Mesmo não sendo foco central do trabalho, é necessária a sintonização e a utilização do controle para a realização dos experimentos. Então, para realização da sintonia do controle PID foi utilizado o método clássico de Ziegler e Nichols (ZIEGLER e NICHOLS, 1942), para malhas fechadas com oscilação. Esse método realiza a sintonia por extração de dados mediante experimentos para definir valores do K_p , K_i , K_d . Seguindo este método, foi ajustado os K_i e K_d a zero, a princípio, para transformar o controlador em um controle puramente proporcional. Assim, ajustando o controle proporcional para uma linha reta de X m até que seja capaz de seguir, mesmo com grande oscilação. Após, foi sendo reduzido o valor de K_p até diminuir a oscilação e torná-lo mais constante. Após esse processo, foram calculados os valores de K_p , K_i e K_d pela seguinte tabela:

Tabela 5.1 - Base de regras de cálculo das ações do controlador.

Tipo de controle	K_p	K_i	K_d
P	0,5 K_C	0	0
PI	0,45 K_C	0,8 T_C	0
PID	0,6 K_C	0,5 T_C	0,125 T_C

Sendo K_C o ganho crítico, por estar no regime de oscilação do processo de malha fechada e T_C o período crítico.

Com este método, obtivemos como valor de $K_p = 2,2$; $K_i = 1,2$; $K_d = 2$. A utilização deste método não garante os melhores valores, porém já permite a correta locomoção do veículo seguindo a linha. O erro médio apresentado pelo PID com essa sintonia foi de X em uma velocidade linear média de X.

As variáveis de controle foram a distância do centro geométrico do veículo em relação à linha e o ângulo do veículo em relação à tangente da linha guia, controlando a velocidade do motor de cada roda. O Algoritmo implementado de forma simplificada para o controle PID é dado pelo Pseudocódigo abaixo, conforme aplicado em Salem (2013).

```

1: Leia Kp, Ki, Kd;
2: rro_anterios=0;
3: Integral=0;
4: Leia Posicao_de_referencia;
5: Enquanto(verdade):
6:   Leia Posicao_atual;
7:   Erro= Posicao_de_referencia -Posicao_atual;
8:   Proporcional = Kp+Erro;
9:   Integral = Integral + Erro*dt;
10:  Derivativo =(Erro -Erro_anterior)/dt;
11:  Derivativo= Kd*Derivativo;
12:  PID= Proporcional+ Integral+Derivativo;
13:  Erro_anterior=Erro;
14: Fim_enquanto

```

Figura 5. 7 – Algoritmo PID típico (SALEM, 2013).

Sendo dt uma amostra de um período de tempo das coletas do sensor ótico do veículo, onde o resultante do controle PID foi aplicado na velocidade angular ϕ_{Dpid} da roda direita e ϕ_{Epid} da roda esquerda do veículo da seguinte forma:

$$\begin{cases} \phi_{Dpid} = \frac{(V_{total} + |\phi_{total}|)}{R} + PID \\ \phi_{Epid} = \frac{(V_{total} - |\phi_{total}|)}{R} - PID \end{cases} \quad (5.3)$$

5.5 Sistema de Controle *Fuzzy* Adaptativo

A base de dados *fuzzy* e a base de regras *fuzzy* foram criadas a partir dos trabalhos e das bases de dados do laboratório, que determinaram as variáveis mais relevantes para o controle do sistema do tipo Mandani. O sistema *fuzzy*, de forma macro, apresenta duas entradas para duas saídas, de acordo com a Figura 5.1.

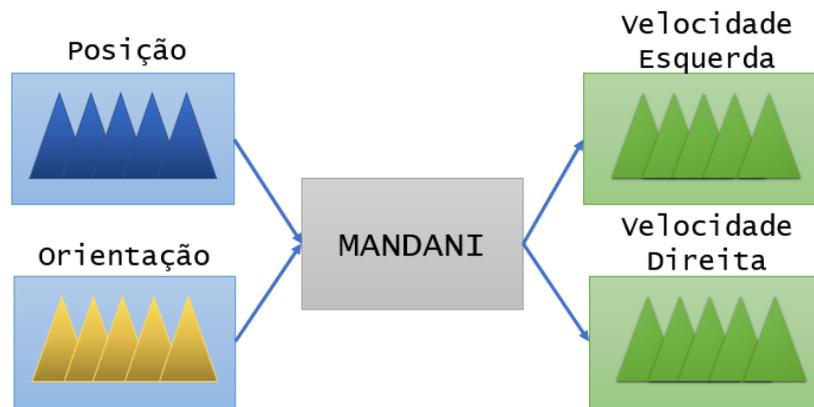


Figura 5.1 – Estrutura de entradas e saídas do sistema de controle *fuzzy* adaptativo (Adaptado de Rodrigues 2017).

A base de dados *fuzzy* criada utiliza as duas entradas: a distância do veículo à linha e a angulação entre o veículo e a linha, com duas saídas que determinam a velocidade em cada roda do veículo. Cada variável foi dividida em cinco partições triangulares escolhidas empiricamente, conforme a Figura 5.2, por especialista.

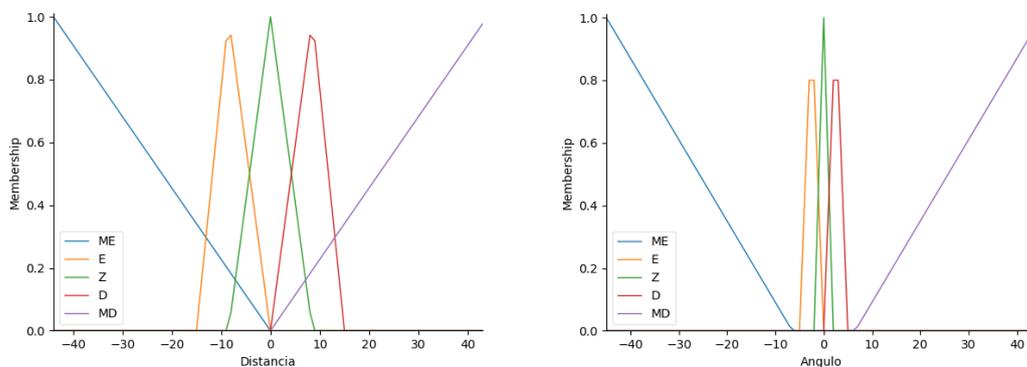
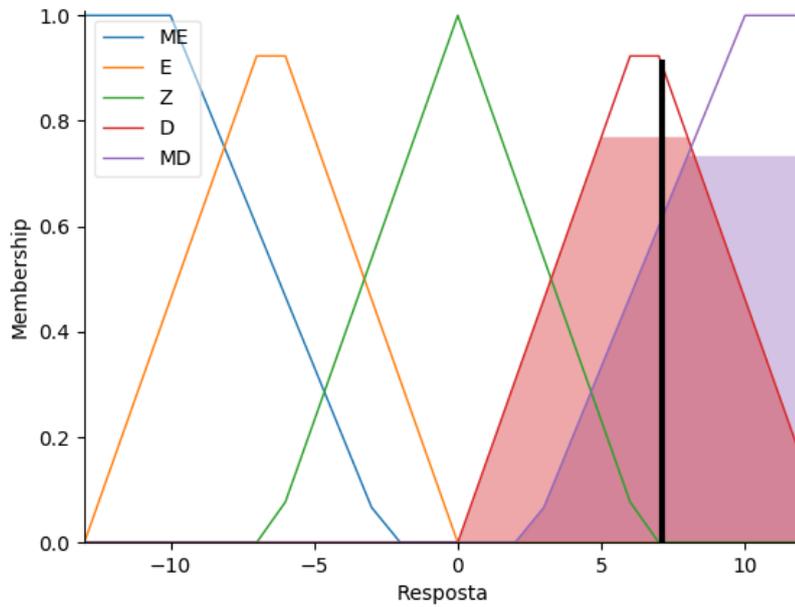


Figura 5.2 – Exemplo do conjunto de variáveis linguísticas referentes à distância e orientação.

Figura 5.3 – Exemplo do conjunto de variáveis linguísticas das velocidades impostas às rodas.



De acordo com base de dados do laboratório foi elaborada a base de regras *fuzzy*, vista na Tabela 5.2:

Tabela 5.1 - Base de regras *fuzzy*

Entrada Ângulo	Entrada Distância	Saída Velocidade E	Saída Velocidade D
MN	MN	MP	MN
MN	N	MP	N
MN	Z	MP	Z
MN	P	P	MP
MN	MP	P	MP
N	MN	MP	MN
N	N	MP	N
N	Z	MP	N
N	P	MP	MP
N	MP	P	MP
Z	MN	MP	Z
Z	N	MP	P
Z	Z	MP	MP
Z	P	P	MP
Z	MP	Z	MP
P	MN	MP	MP
P	N	MP	P
P	Z	P	MP
P	P	Z	MP
P	MP	Z	MP
MP	MN	MP	P
MP	N	MP	MP

MP	Z	Z	P
MP	P	Z	MP
MP	MP	N	MP

Onde MN- muito negativo, N- Negativo, Z- Zero, P- Positivo e MP- Muito positivo.

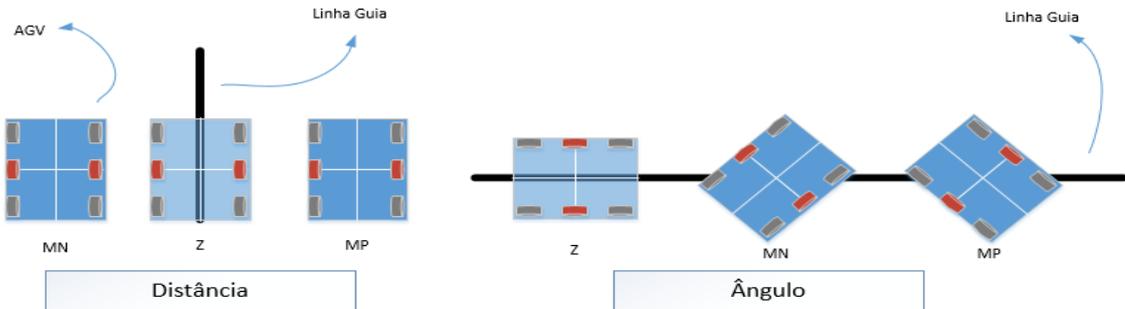


Figura 5.4 – Representação das escolhas de nomenclaturas das funções de pertinência.

No contexto da velocidade angular do veículo, MP e P indicam o sentido de rotação anti-horária, MN e N o sentido horário de rotação. Contudo, é realizada a *defuzzificação* das respostas da inferência para valores escalares. Neste trabalho, utilizou-se a *defuzzificação* por centroide.

5.6 Modelagem do Motor Elétrico no Unity

A modelagem foi baseada no do motor Maxon EC 60 flat Ø68 mm *brushless* de 100 Watt, modelo 412819, de acordo com os parâmetros do *datasheet* do fabricante, representado na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dados e características do motor Maxon modelo 412819

Dados do motor	Valores
Voltagem nominal	12 V
Velocidade sem carga	3710 rpm
Corrente sem carga	671 mA
Velocidade nominal	3260 rpm
Torque Nominal	231 mNm
Corrente Nominal	7,81 A

Torque de parada	2850 mNm
Corrente de parada	93.5 A
Max. eficiência	84 %
Características	Valores
Resistência do terminal fase a fase	0,128Ω
Indutância do terminal fase a fase	0,0615 mH
Constante de torque	30.5 mNm/A
Constante de velocidade	313 rpm/V
Velocidade/torque gradiente	1,32 rpm/mNm
Constante de tempo mecânico	16,7 ms
Inércia do Rotor	1210 gcm ²

Sendo o modelo matemático do motor DC *brushless* dado por:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1} \quad (5.4)$$

Então, os valores de K_e , τ_m e τ_e podem ser calculados pela equação 5.5 para obtermos o modelo específico desse motor dado pelo:

$$\tau_e = \frac{L}{3 \cdot R} \quad (5.5)$$

$$\tau_e = \frac{0,0615}{3 \cdot 0,128} \quad (5.6)$$

$$\tau_e = 0,0236 \quad (5.7)$$

Como τ_m é dado em função de R, J K_e e K_t temos:

$$\tau_m = \frac{3 \cdot R_\phi \cdot J}{K_e \cdot K_t} = 0,0167 \quad (5.8)$$

Logo, pela equação 5.8 podemos obter o valor de K_e :

$$K_e = \frac{3 \cdot R_\phi \cdot J}{0,0167 \cdot K_t} = \frac{3 \cdot 0,128 \cdot 0,00121}{0,0167 \cdot 0,0305} = 0,0912 \frac{V \cdot s}{rad} \quad (5.9)$$

Então temos:

$$G(s) = \frac{10,962}{0,0167 \cdot 0,0236 \cdot s^2 + 0,0167 \cdot s + 1} \quad (5.10)$$

Tal função de transferência descreve um motor sem carga, entretanto, para o emprego da estratégia, foi necessário ter a função de transferência do motor com variação de carga para a simulação dos cenários que apresentam a dinâmica. Logo, pelas definições feitas anteriormente na proposta, podemos considerar que o peso é pontual sobre o motor, considerando o peso da própria roda do veículo. Sendo assim, a inércia da roda é dada pela equação 5.10.

$$I_{\text{roda}} = \frac{M \times R^2}{2} \quad (5.10)$$

Logo, podemos escrever a função de transferência como:

$$K_e = \frac{3 \times R_{\phi} \times (J + I_{\text{roda}})}{0,0167 \times K_t} \quad (5.9)$$

Em particular, para um veículo com chassi de 60kg temos:

$$K_e = \frac{3 \times 0,128 \times (1,21 \times 10^{-4} + 0,0375)}{0,0167 \times 30,5 \times 10^{-3}} \quad (5.9)$$

Finalmente, temos a função para esse caso de:

$$G(s) = \frac{0,0352}{0,0167 \times 0,0236 \times s^2 + 0,0167 \times s + 1} \quad (5.10)$$

5.7 Resultados e Análise dos Cenários de Teste

Os experimentos seguiram a ordem dos modelos cinemáticos para os dinâmicos, uma vez que é necessária a comparação dos cinemáticos com os resultados dos dinâmicos. Nos experimentos, considerou-se como critério de avaliação nos motores simulados a velocidade angular e a tensão aplicada e, no veículo, avaliou-se a velocidade linear, a velocidade angular, a aceleração, o erro médio, o desvio padrão e a variância do ângulo do veículo em relação à tangente e à linha.

Os dados no modelo virtual foram coletados por meio de um script que iniciou mediante a colisão do veículo ao ponto da estação inicial (*Collider* sem *rigidbody*), que informou a

estação atual, salvando os dados mencionados no parágrafo anterior em um arquivo e terminando de salvar ao passar na estação final, tornando claro a qual intervalo os dados salvos se referem. O sistema de visão desse processo foi realizado por meio da linha vermelha, como explicado anteriormente.

5.7.1 Cenário de Teste 01 – Unity Cinemático

Esse experimento apresentou o melhor desempenho em termos de acurácia do controle de distância e ângulo em relação à linha em ambos controladores utilizados no experimento, como previsto, por desprezar a massa do veículo na simulação e não apresentar perturbações oriundas da dinâmica sobre o modelo.

5.7.1.1 PID no modelo cinemático

- **Pista Círculo:**

A Pista do círculo apresenta uma variação angular de $0,6^\circ$ a $-0,6^\circ$, após a estabilização do veículo em relação à linha, se manteve entre $0,0^\circ$ a $0,6^\circ$, com maior intervalo de tempo em $0,0^\circ$, com média angular de $0,11^\circ$, variância de $0,057^\circ$ e desvio padrão de $0,23^\circ$ conforme visto na Figura 5.5.

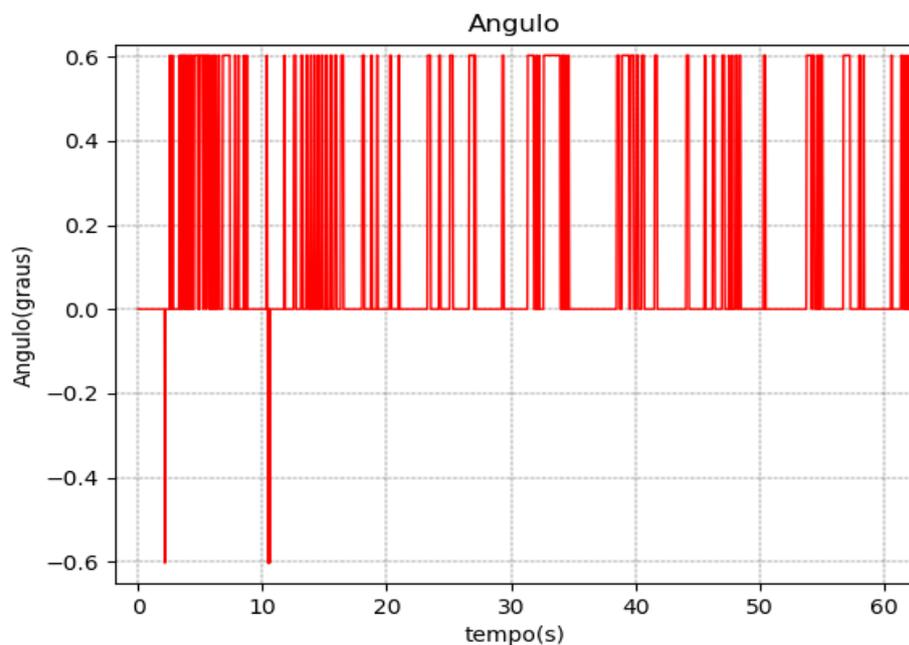


Figura 5.5 Ângulo PID Círculo Cinemático

O erro da distância do veículo foi de 17 mm em relação à linha da trajetória, com uma oscilação de 7mm para esquerda a 30mm para direita, após a estabilização do controle, teve uma variância 0,14mm, com erro médio de 17,23mm e desvio padrão de 0,38 mm.

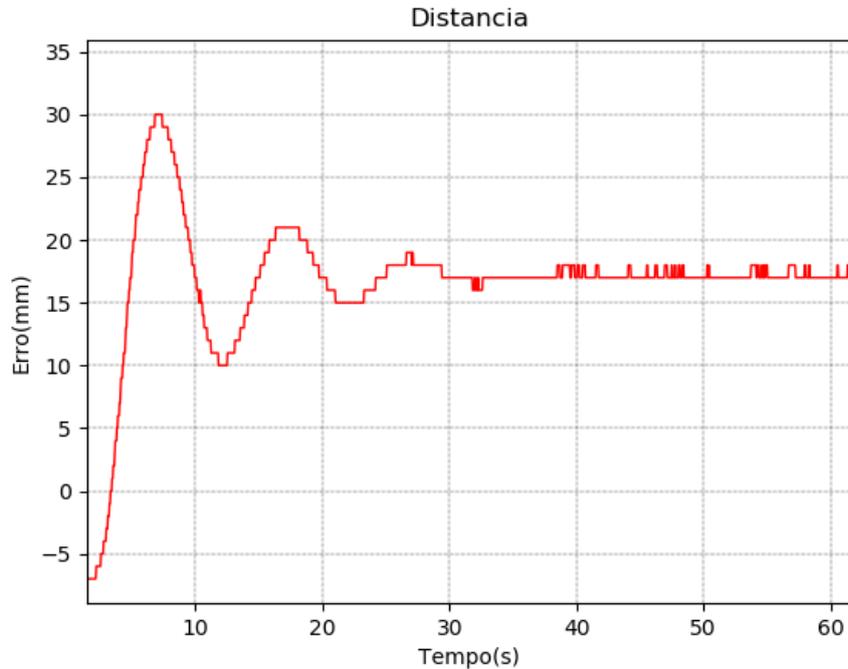


Figura 5.6 Distância PID Círculo Cinemático

Apresentou uma velocidade angular média de 5,6 graus/s, com uma variância de 0,12 graus/s e um desvio padrão 0,35 graus/s, após o período de estabilização.

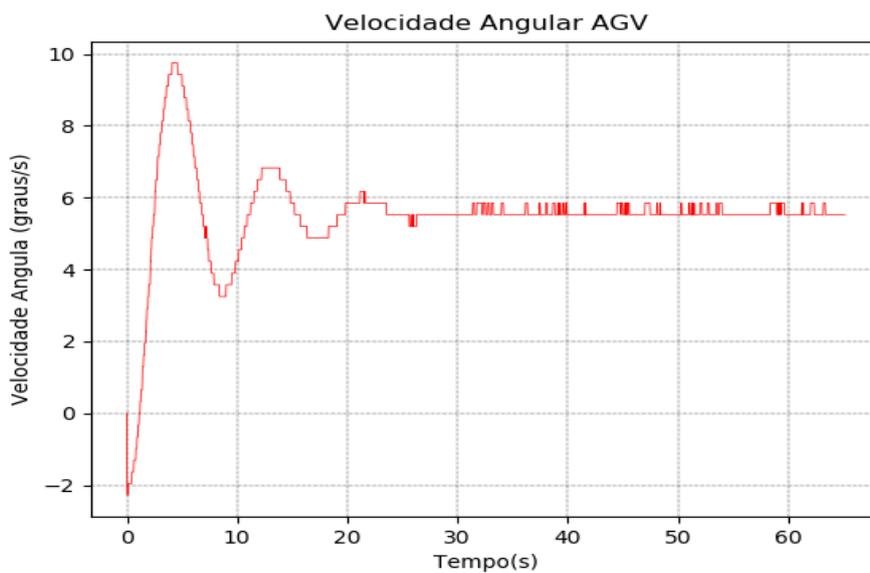


Figura 5.7 Velocidade Angular AGV PID Círculo Cinemático

A Figura 5.8 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

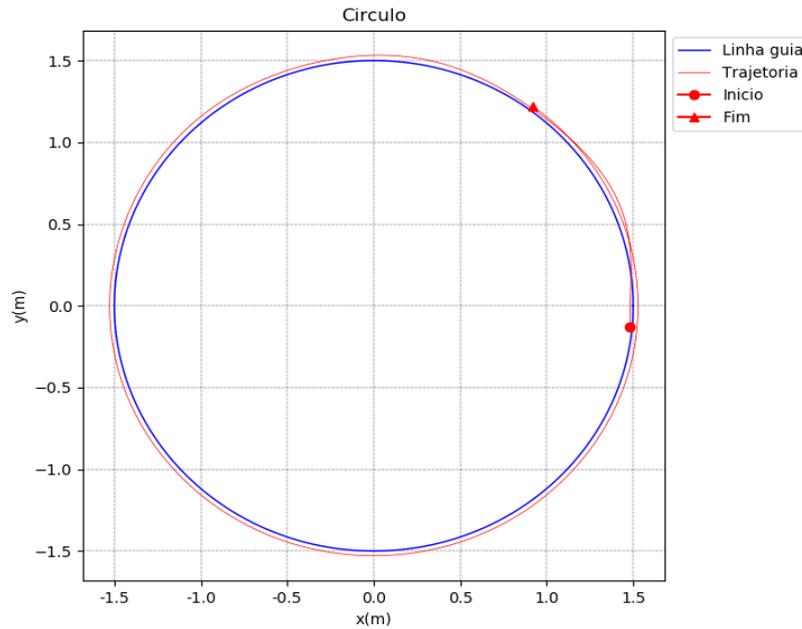


Figura 5.8 Posição PID Círculo Cinemático

A resposta do controle PID que levou em consideração a distância do centro do veículo à linha, como visto na A Figura 5.9, após estabilização, aparentou um desvio padrão de 0,35, com uma variância de 0.12 com média 5,6.

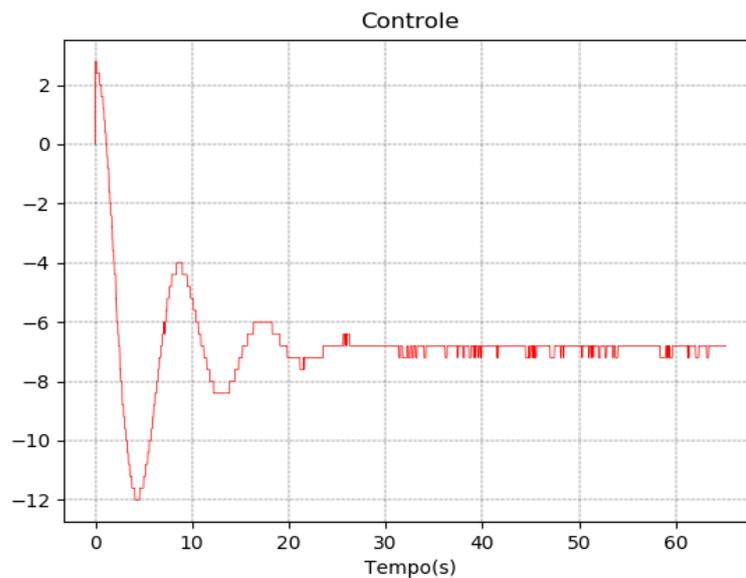


Figura 5.9 Controle PID Círculo Cinemático

- **Pista Quadrado**

A pista do quadrado apresentou uma variação angular maior que as demais pistas de aproximadamente $40,6^\circ$ a $-40,6^\circ$ em regiões de angulação de 90° que ultrapassam a capacidade de medição do projeto do veículo. Em regiões de retas foi visto que os valores de máximo e mínimos ficam entre 0° a 4° , com média angular de $-0,16^\circ$, variância de $3,66^\circ$ e desvio padrão de $1,91^\circ$ conforme visto na Figura 5.10.

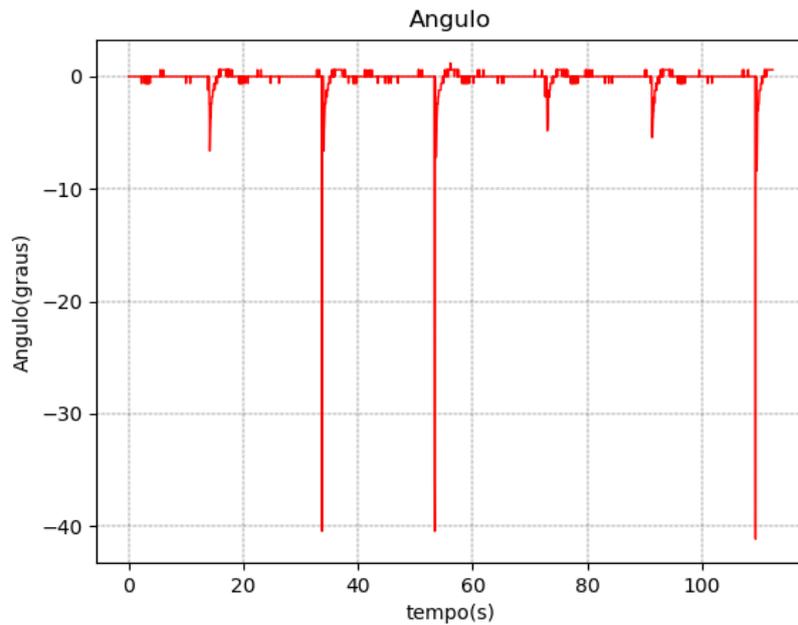


Figura 5.6 Ângulo PID Quadrado Cinemático

O erro da distância do veículo foi de 0 mm em relação à linha da trajetória, após a estabilização do controle, teve uma variância 338 mm, com erro médio de 5,4 mm para esquerda e desvio padrão 18,4 mm.

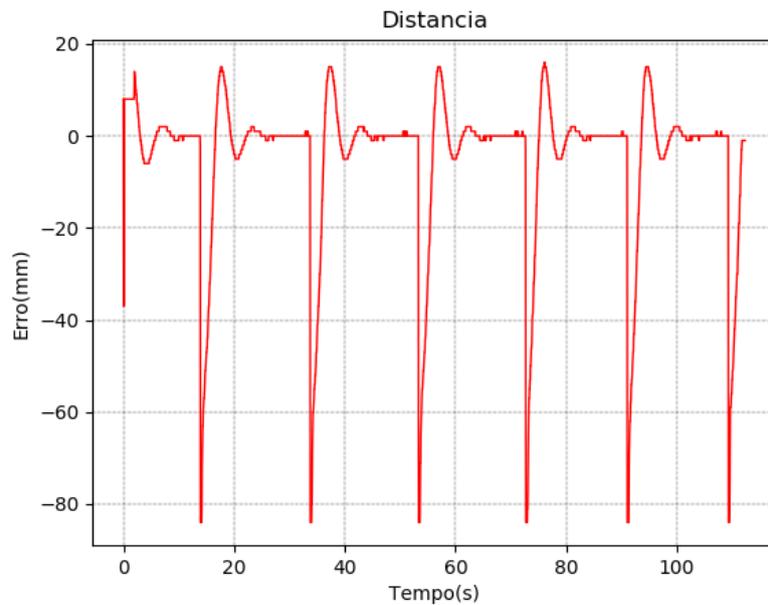


Figura 5.7 Distância PID Quadrado Cinemático.

A pista quadrada apresentou uma velocidade angular média de 4,79 graus/s, com uma variância de 298,16 graus/s e um desvio padrão 17,26 graus/s, apresentando valores de pico de -80 graus/s devido aos ângulos de 90°.

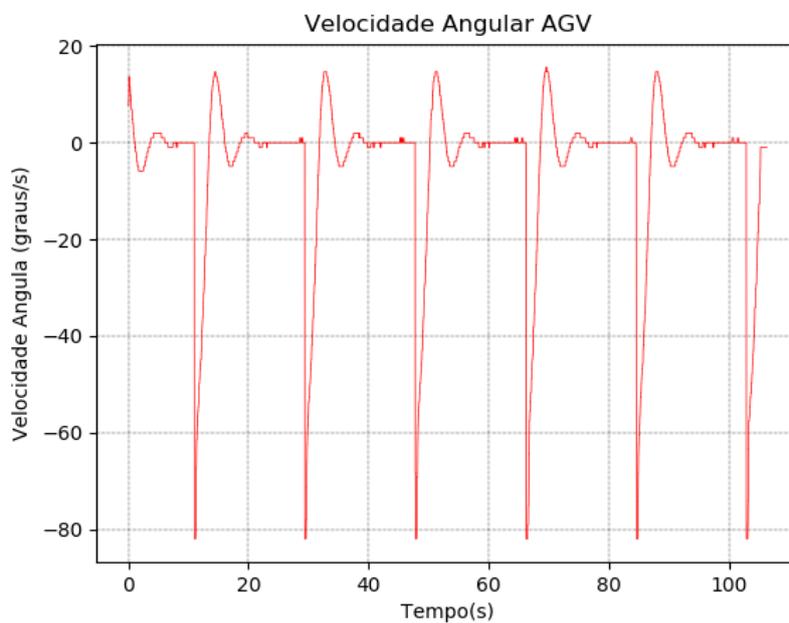


Figura 5.8 Velocidade angular do AGV PID Quadrado Cinemático

A Figura 5.13 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo

onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

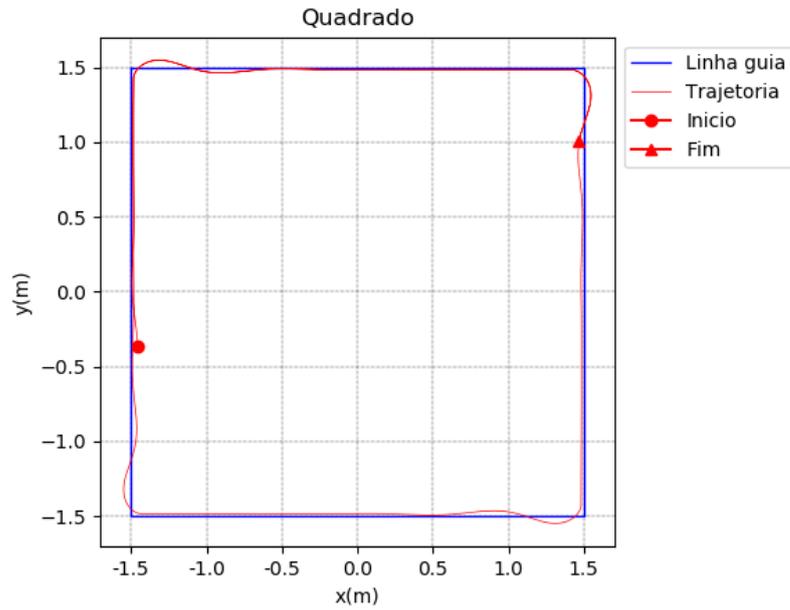


Figura 5.9 Posição PID Quadrado Cinemático.

A resposta do controle PID na pista quadrada, vista na Figura 5.142, apresenta valores máximos de 100, nas regiões de reta fica entre 6 a -6 a, apresentou um desvio padrão de 17,26 com uma variância de 298,18 com média 4,8.

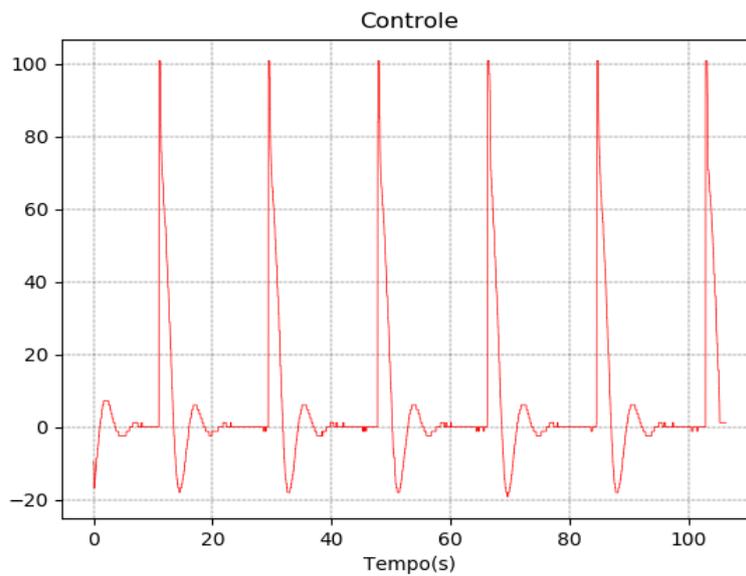


Figura 5.10 Controle PID Quadrado Cinemático.

- **Pista Oito digital:**

A pista do Oito Digital apresentou uma variação angular, maior que as demais pistas, de aproximadamente $40,6^\circ$ a $-40,6^\circ$, em regiões de angulação de 90° , que ultrapassou a capacidade de medição do projeto do veículo. Em regiões de retas, viu-se que os valores de máximo e mínimos ficaram entre 0° a 4° . Com média angular de $0,04^\circ$, variância de $0,24^\circ$ e desvio padrão de $0,49^\circ$ conforme visto na Figura 5.15.

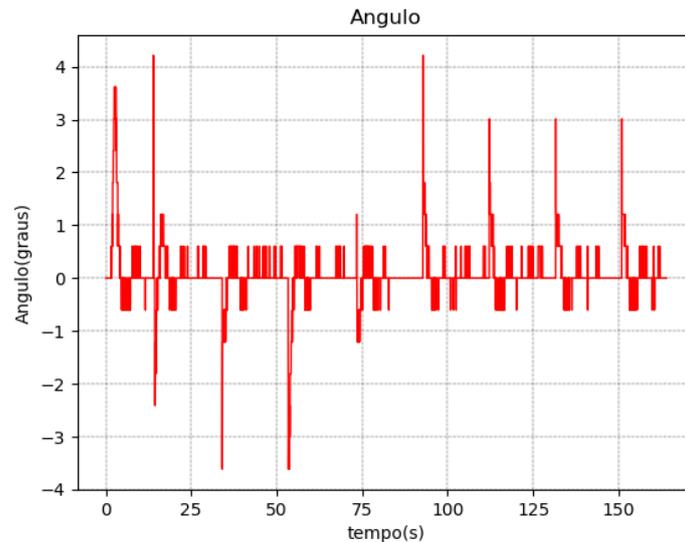


Figura 5.11 Ângulo PID Oito Digital cinemático.

A distância do veículo foi de 10 mm em relação à linha da trajetória, com uma oscilação de 74 mm a 38 mm. Após a estabilização do controle, teve uma variância 179,57 mm, com erro médio de 1,01 mm para esquerda e desvio padrão de 13,4 mm.

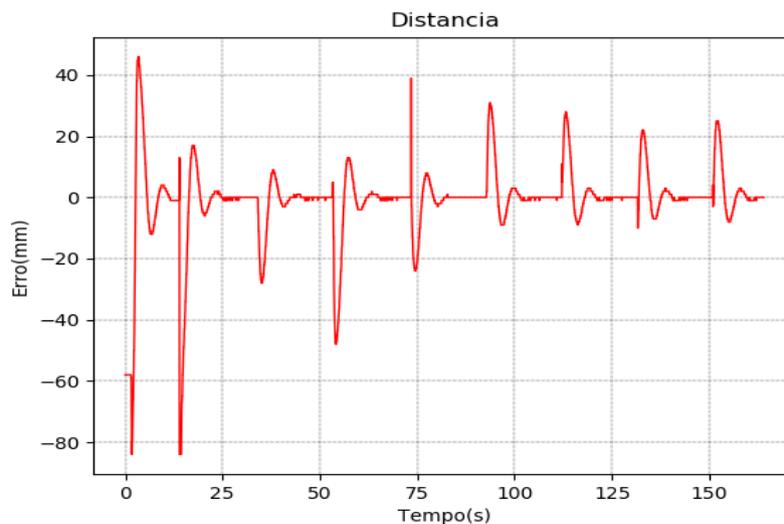


Figura 5.16 Distância PID Oito Digital Cinemático.

A pista Oito Digital apresentou uma velocidade angular média de 0,014 graus/s, com uma variância de 447,61 graus/s e um desvio padrão 21,15 graus/s, apresentando valores de pico de 160 graus/s devido aos ângulos de 90°.

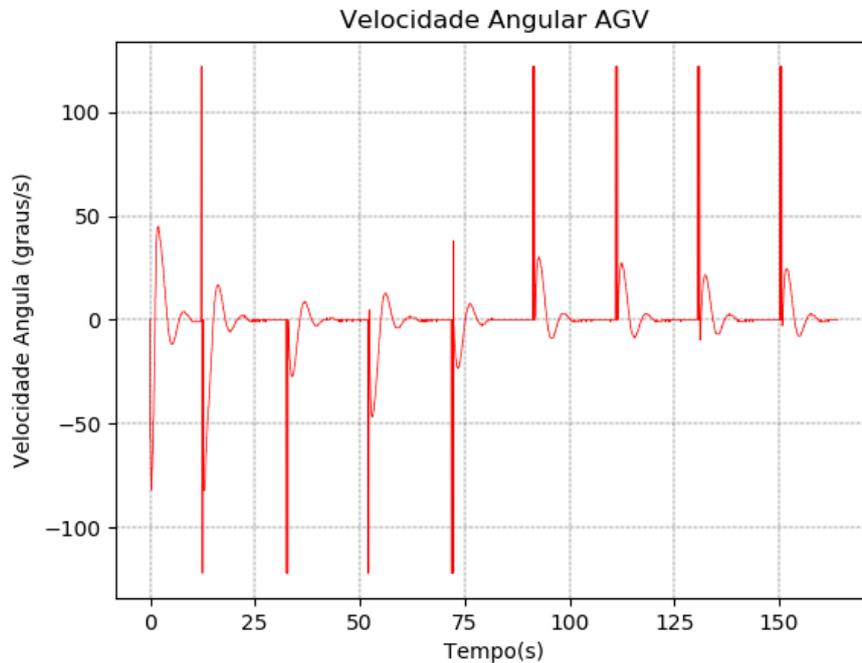


Figura 5.17 Velocidade Angular do AGV PID Oito Digital Cinemático.

A Figura 5.18 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

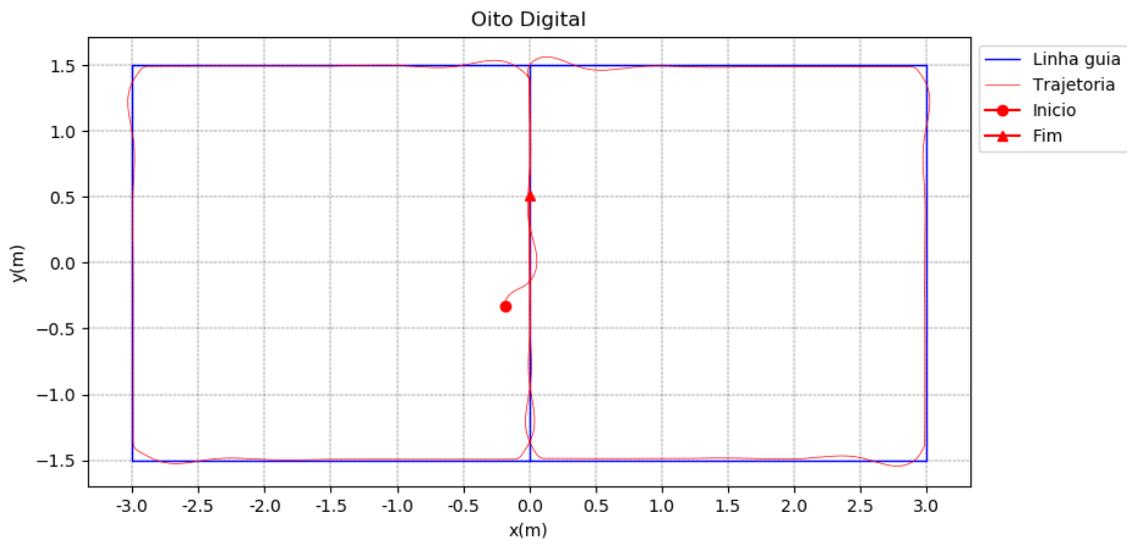


Figura 5.18 Posição PID Oito Digital Cinemático.

A resposta do controle PID na pista quadrada, visto na Figura 5.19, apresentou valores máximo de 150, nas regiões de reta ficou entre 6 a -6, aparentou um desvio padrão de 21,15, com uma variância de 447,61 com média 0,014.

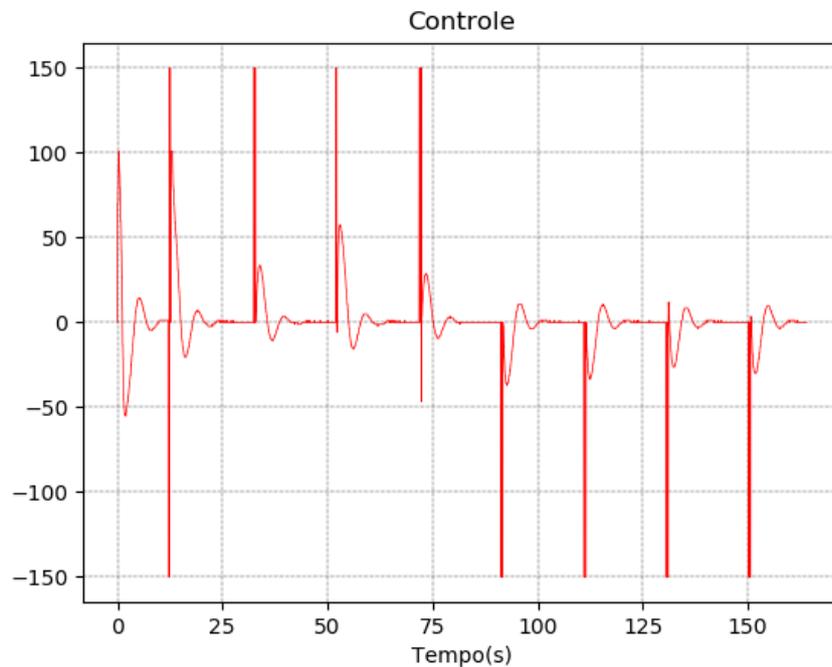


Figura 5.19 Controle PID Oito Digital Cinemático.

- **Pista Infinito:**

A Pista do círculo apresenta uma variação angular de $20,22^\circ$ a $-34,78^\circ$, após a estabilização do veículo em relação à linha, se manteve entre $0,0^\circ$ a $0,6^\circ$, com maior intervalo

de tempo em $0,0^\circ$, com média angular de $0,05^\circ$ para esquerda, variância de $2,77^\circ$ e desvio padrão de $1,66^\circ$ conforme visto na Figura 5.20.

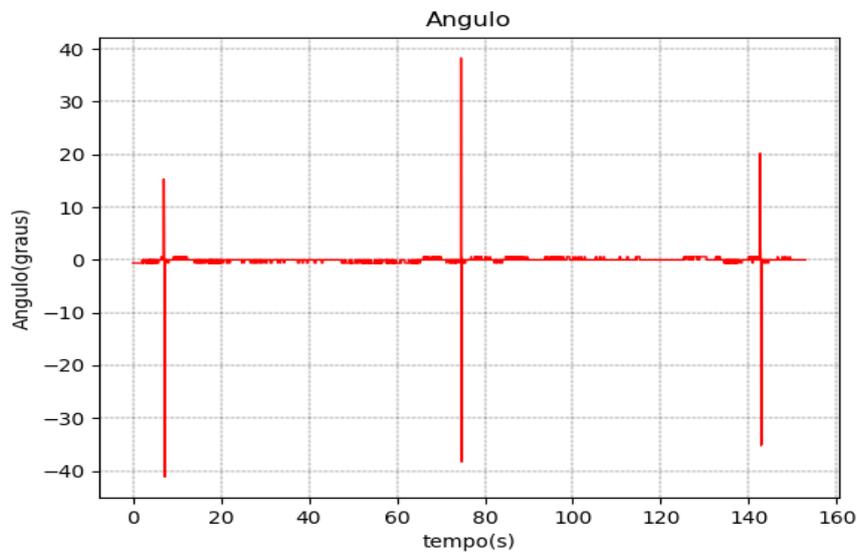


Figura 5.20 Ângulo PID Infinito Cinemático

A distância do veículo foi de 20 mm em relação à linha da trajetória, com uma oscilação de 64 mm para esquerda a 72 mm para direita. Após a estabilização do controle, teve uma variância 245,68 mm, com erro médio de 0,03 mm para esquerda e desvio padrão de 15,64 mm.

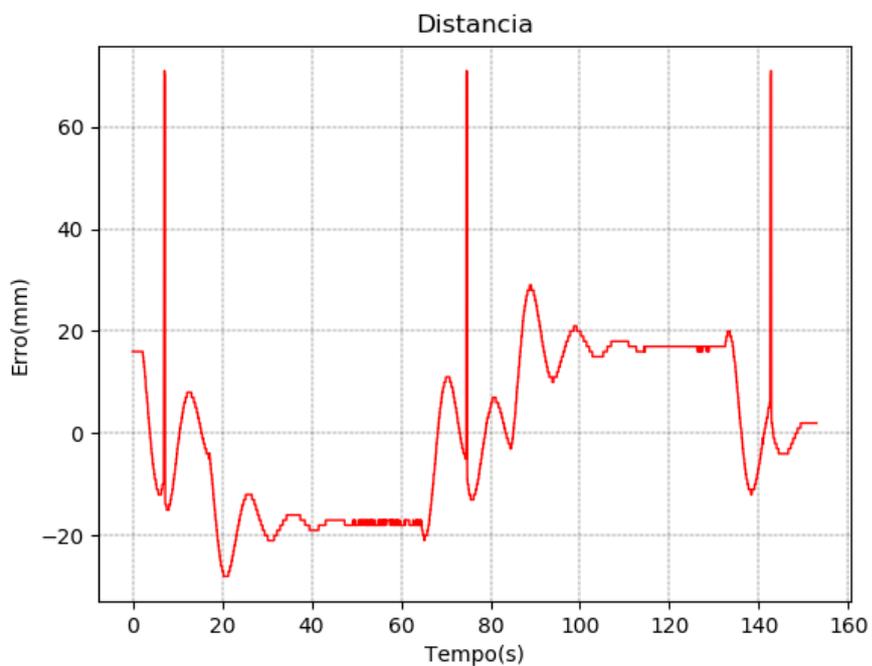


Figura 5.12 Distância PID Infinito Cinemático.

A resposta do controle PID que levou em consideração a distância do centro do veículo à linha, como visto na A Figura 5.22, aparentou um desvio padrão de 5,15, com uma variância de 26,57 com média 0,08.

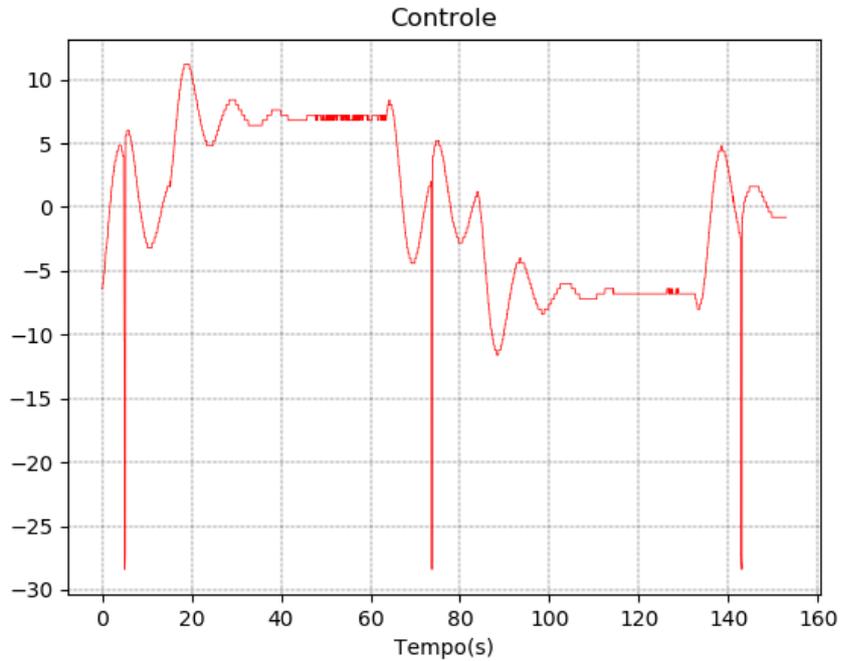


Figura 5.13 Controle PID Infinito Cinemático.

A Figura 5.23 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

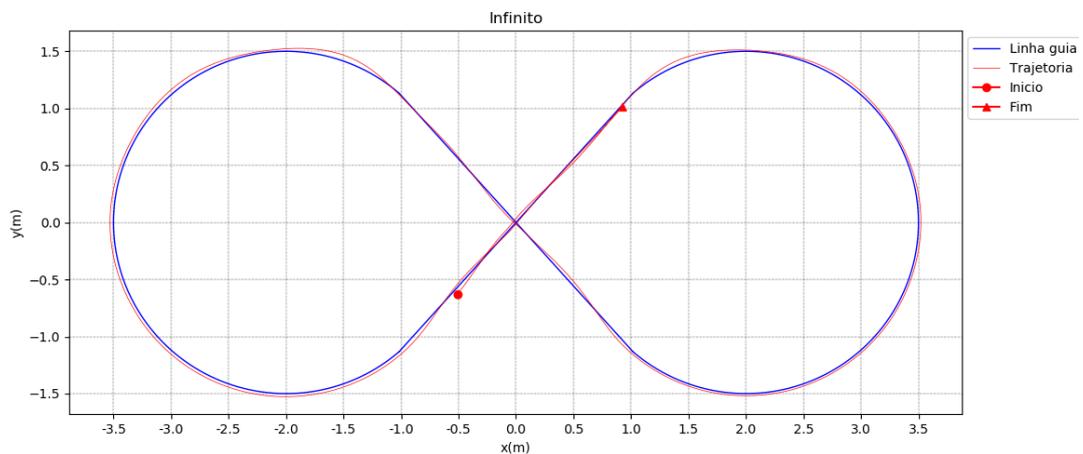


Figura 5.14 Posição PID Infinito Cinemático.

Apresentou uma velocidade angular média de 0,09 graus/s , com uma variância de 25,95 graus/s e um desvio padrão 5,09 graus/s.

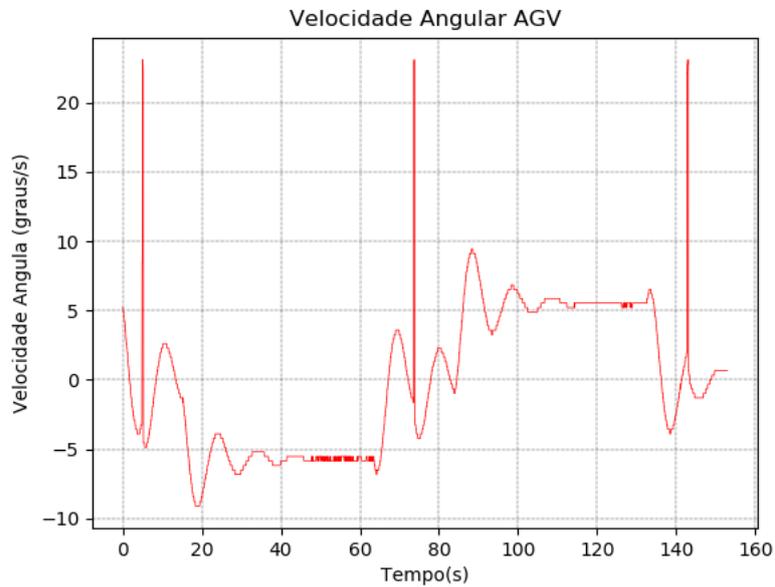


Figura 5.15 Velocidade Angular do AGV PID Infinito Cinemático.

5.7.1.2 Fuzzy no modelo cinemático

- **Pista Círculo:**

A Pista do círculo apresenta uma variação angular de 1° a $-1,2^\circ$, após a estabilização do veículo em relação à linha, com maior intervalo de tempo em $1,0^\circ$, com média angular de $0,82^\circ$, variância de $0,35^\circ$ e desvio padrão de $0,59^\circ$ conforme visto na Figura 5.25.

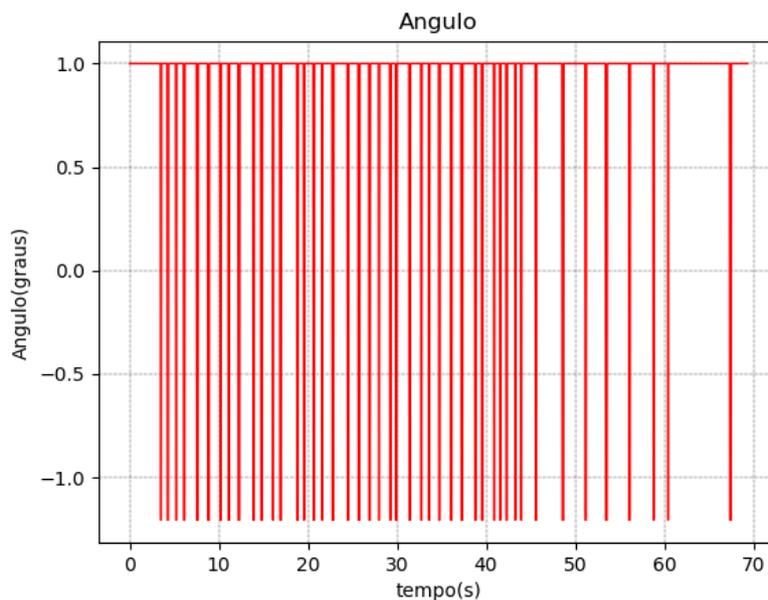


Figura 5.25 Ângulo Fuzzy Circulo Cinemático.

O erro da distância do veículo foi de 23 mm em relação à linha da trajetória, com uma oscilação de 21mm a 24mm para direita, teve uma variância 0,41mm, com erro médio de 22,72 mm e desvio padrão de 0,64 mm.

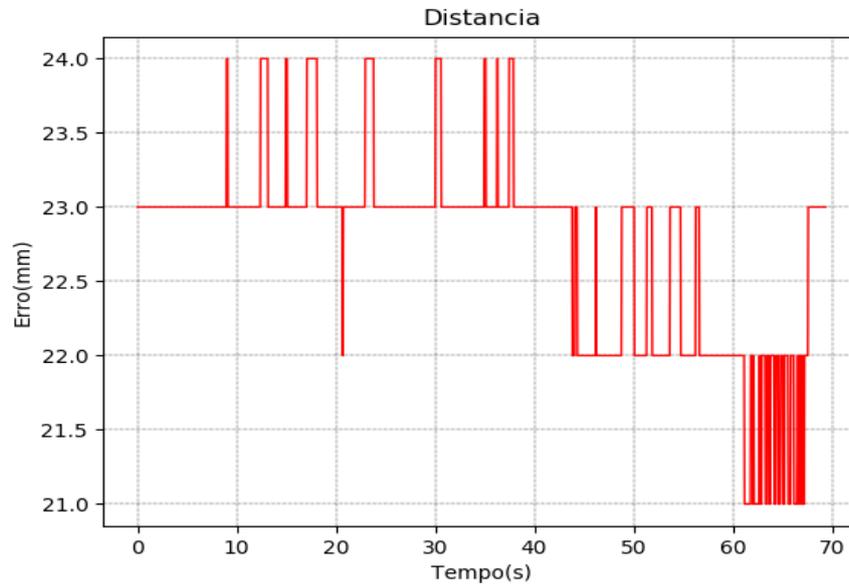


Figura 5.26 Distancia Fuzzy Circulo Cinemático.

A Figura 5.27 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

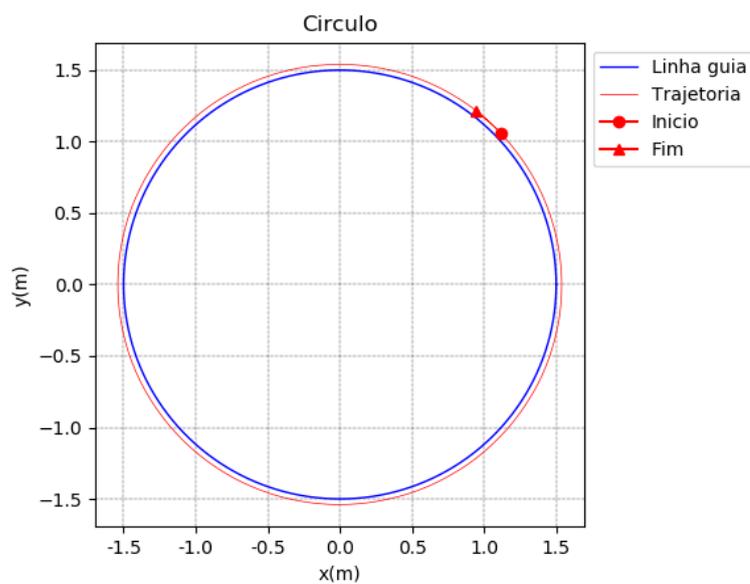


Figura 5.27 Posição Fuzzy Circulo Cinemático.

A resposta do controle *Fuzzy* que levou em consideração a distância e ângulo do centro do veículo à linha, como visto na A Figura 5.28, aparentou um desvio padrão de 2,06, com uma variância de 4,27 com média 5,53.

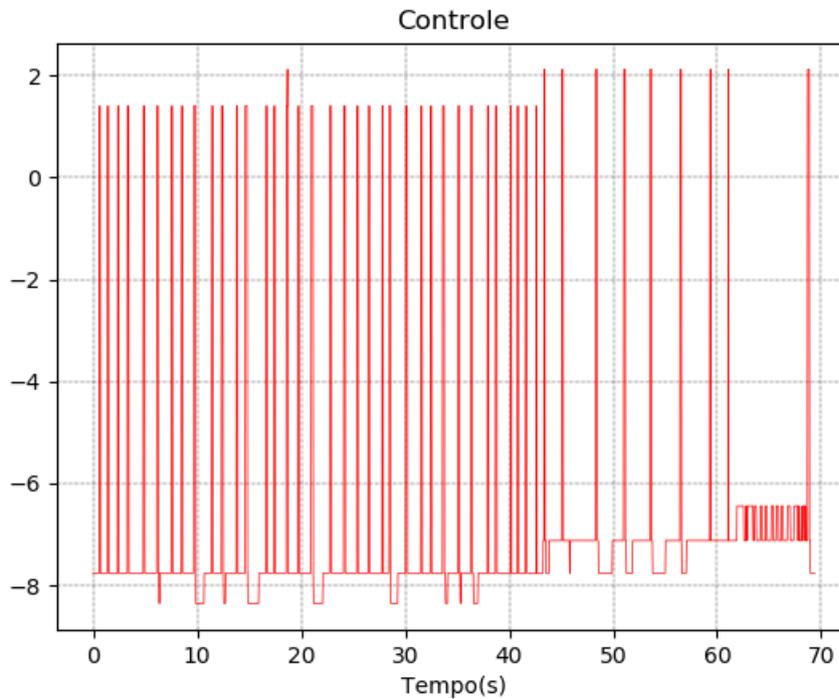


Figura 5.28 Controle *Fuzzy* Circulo Cinemático.

Apresentou uma velocidade angular média de 5,53 graus/s, com uma variância de 4,27 graus/s e um desvio padrão 2,06 graus/s.

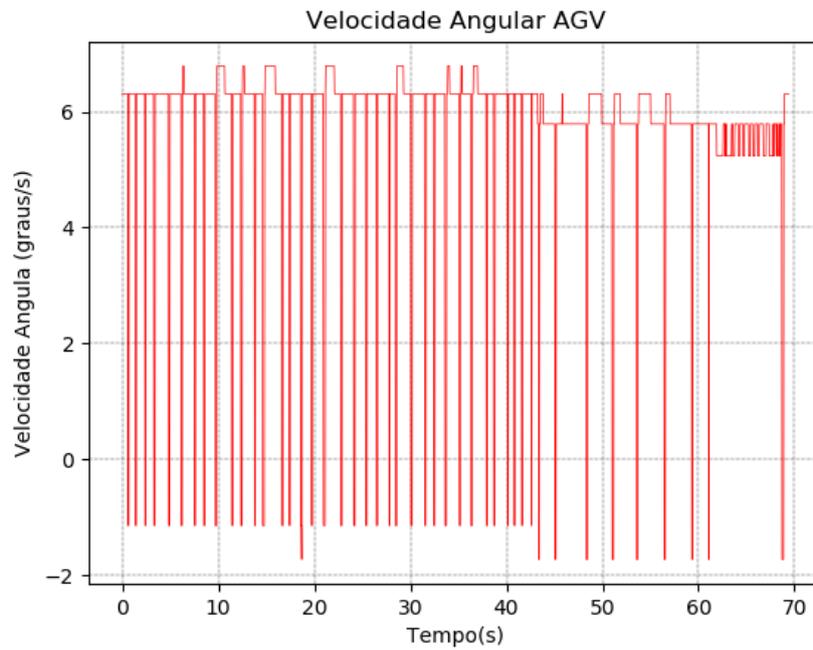


Figura 5.29 Velocidade angular AGV *Fuzzy* Circulo Cinemático.

- **Pista Quadrado:**

A Pista do círculo apresenta uma variação angular de $1,8^\circ$ a -40° , após a estabilização do veículo em relação à linha, com maior intervalo de tempo em $1,2^\circ$, com média angular de $-1,15^\circ$, variância de $63,65^\circ$ e desvio padrão de $7,97^\circ$ conforme visto na Figura 5.30.

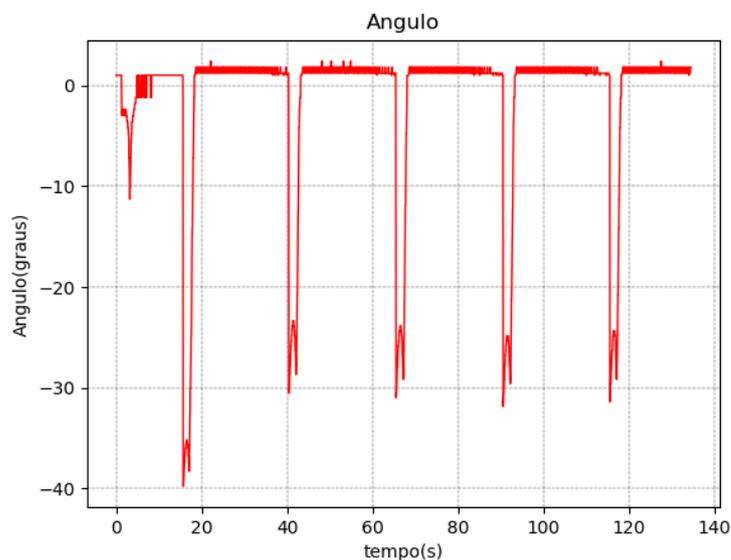


Figura 5.16 Ângulo *Fuzzy* Quadrado Cinemático.

O erro da distância do veículo foi de 43 mm para esquerda em relação à linha da trajetória, com uma oscilação de 43mm para esquerda a 13mm para direita, teve uma variância

181,34 mm para direita, com erro médio de 34,62 mm para esquerda e desvio padrão de 13,46 mm.

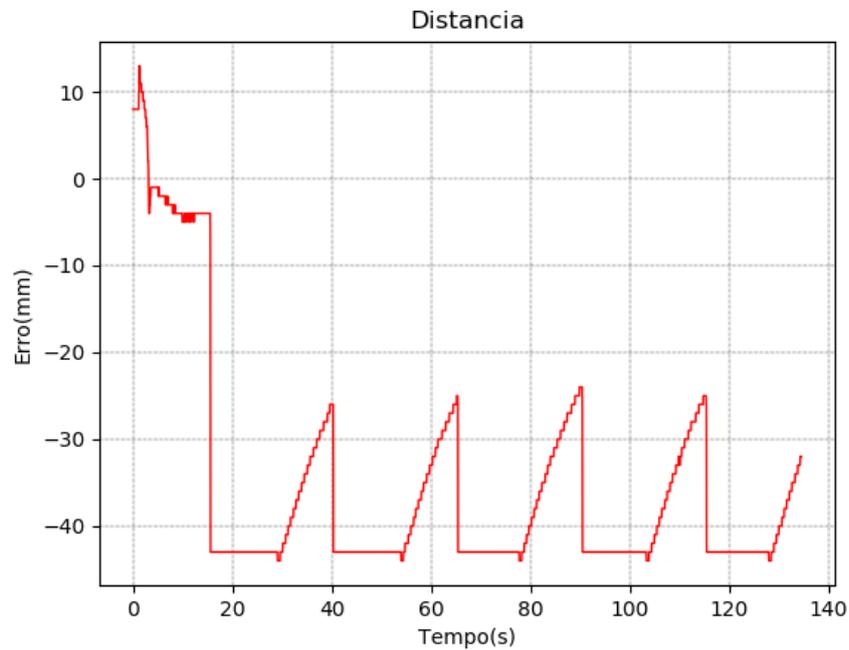


Figura 5.17 Distância Fuzzy Quadrado Cinemático.

A resposta do controle Fuzzy que levou em consideração o ângulo do veículo e a distância do centro do veículo à linha, como visto na A Figura 5.10, se estabiliza entre -2 a 3 nas regiões de reta. Aparentou um desvio padrão de 10,66, com uma variância de 113,81 com média -3,34.

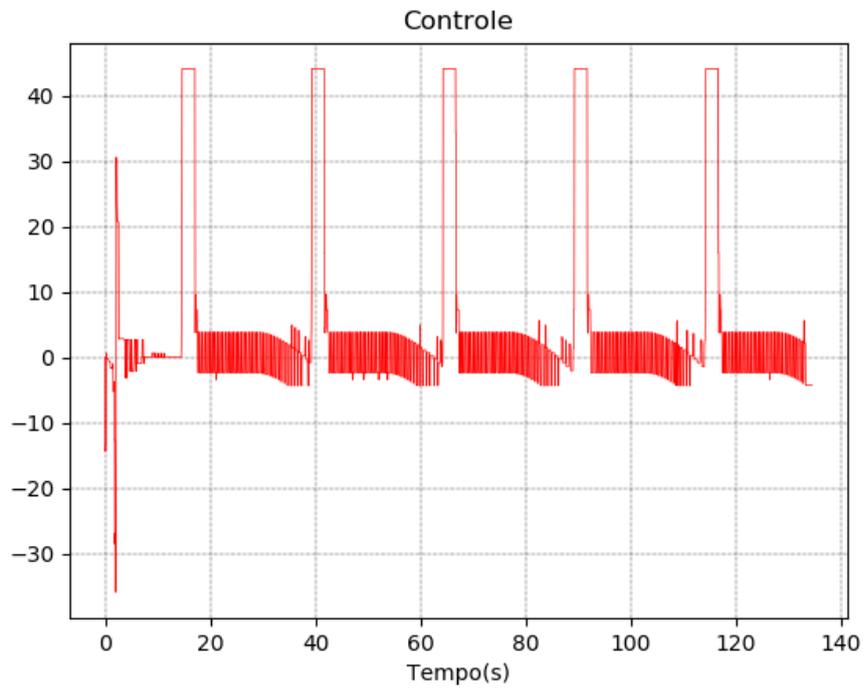


Figura 5.18 Controle *Fuzzy* Quadrado Cinemático.

A Figura 5.33 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

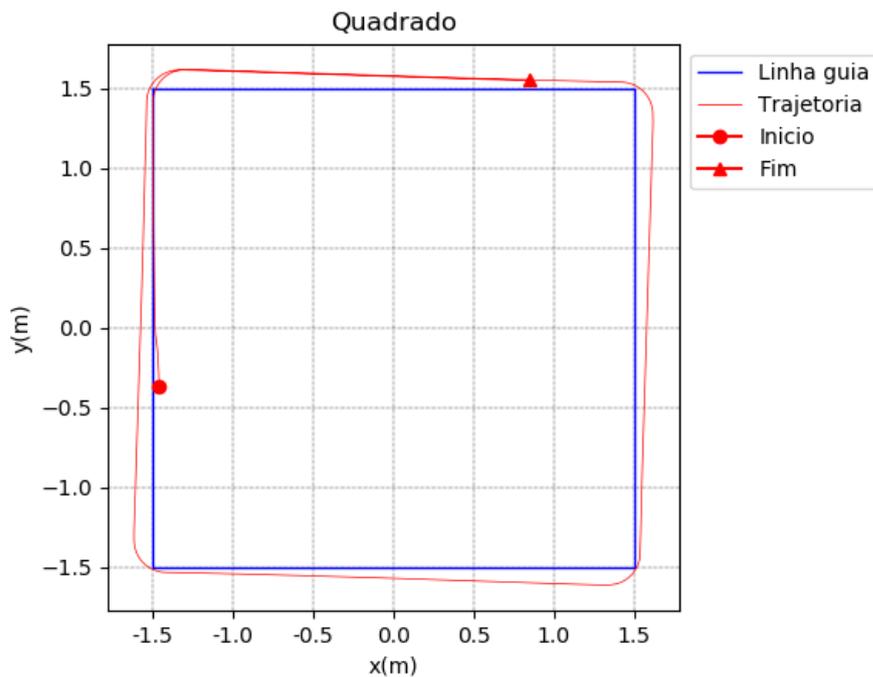


Figura 5.33 Posição *Fuzzy* Quadrado Cinemático.

Apresentou uma velocidade angular média de 3,34 graus/s, com uma variância de 113,81 graus/s e um desvio padrão 10,66 graus/s.

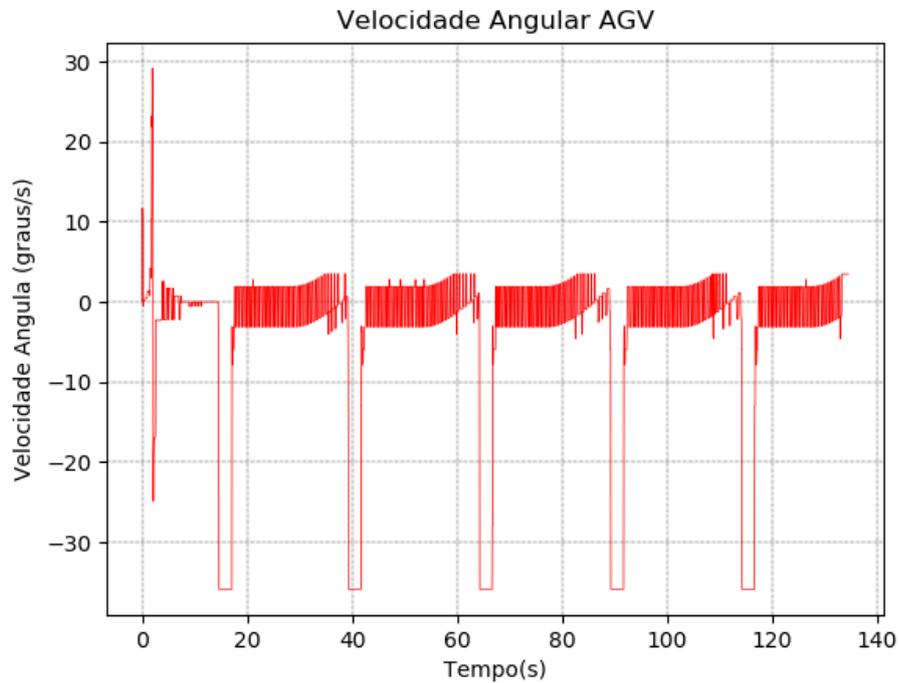


Figura 5.34 Velocidade angular AGV Fuzzy Quadrado Cinemático.

- **Pista Oito digital**

A Pista do Oito Digital apresentou uma variação angular de -48° a 48° , após a estabilização do veículo em relação à linha, se manteve entre 0° a 4° , com média angular de $-0,91^\circ$, variância de $36,2^\circ$ e desvio padrão de $6,01^\circ$ conforme visto na Figura 5.35.

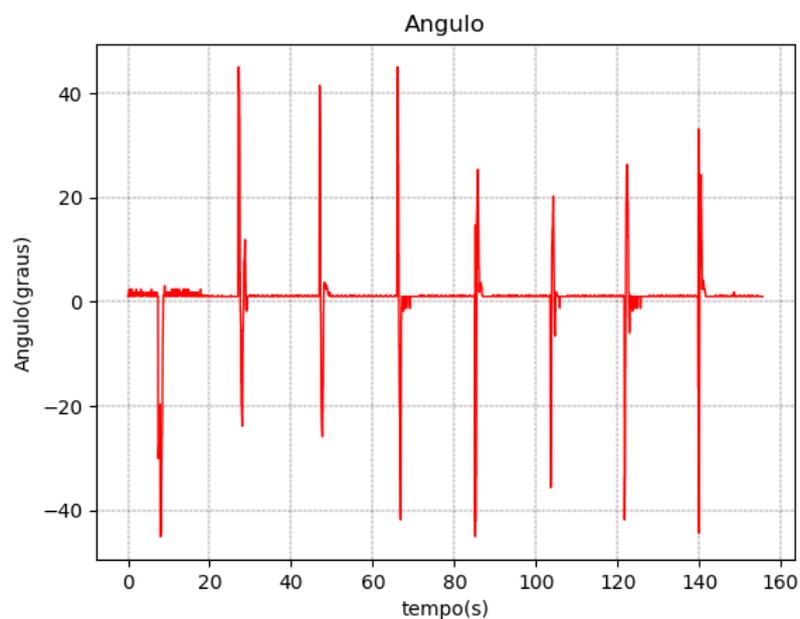


Figura 5.35 Ângulo Fuzzy Oito Digital Cinemático.

O erro da distância do veículo foi de 43 mm para esquerda em relação à linha da trajetória, com uma oscilação de 43mm para esquerda a 40.45mm para direita, teve uma variância 104,9 mm para direita, com erro médio de 8,27 mm para esquerda e desvio padrão de 10,24 mm.

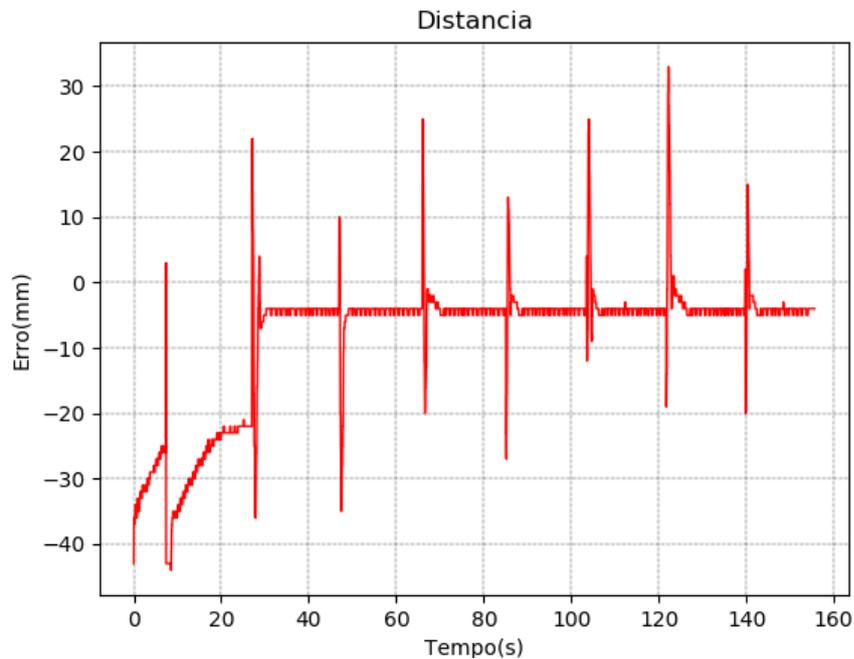


Figura 5.36 Distância *Fuzzy* Oito Digital Cinemático.

A resposta do controle *Fuzzy*, que levou em consideração o ângulo do veículo e a distância do centro do veículo à linha, como visto na A Figura 5.37, se estabiliza entre 7 a -7 a nas regiões de retas. Aparentou um desvio padrão de 15,86, com uma variância de 251,71 com média 0,016.

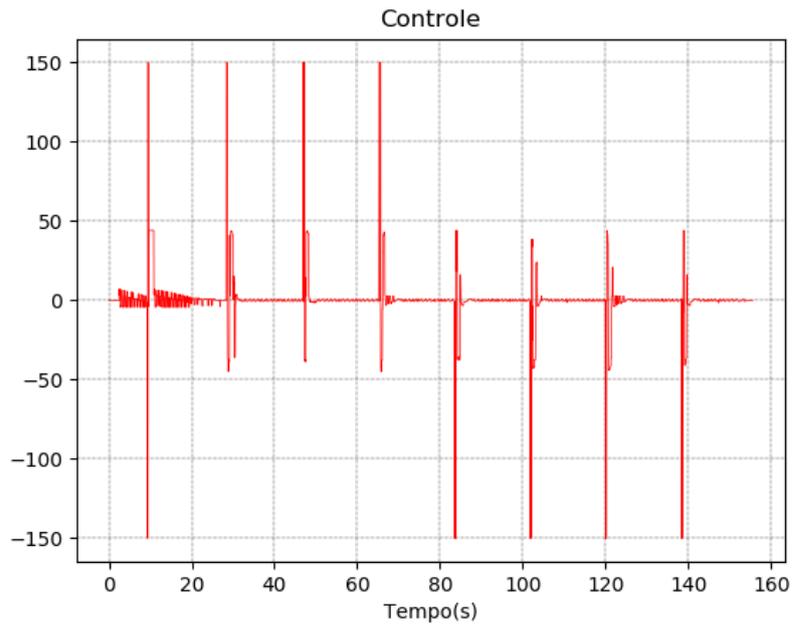


Figura 5.37 Controle Fuzzy Oito Digital Cinemático.

A velocidade angular do AGV, apresentou uma velocidade angular média de 0,016 graus/s, com uma variância de 251,71 graus/s e um desvio padrão 15,86 graus/s.

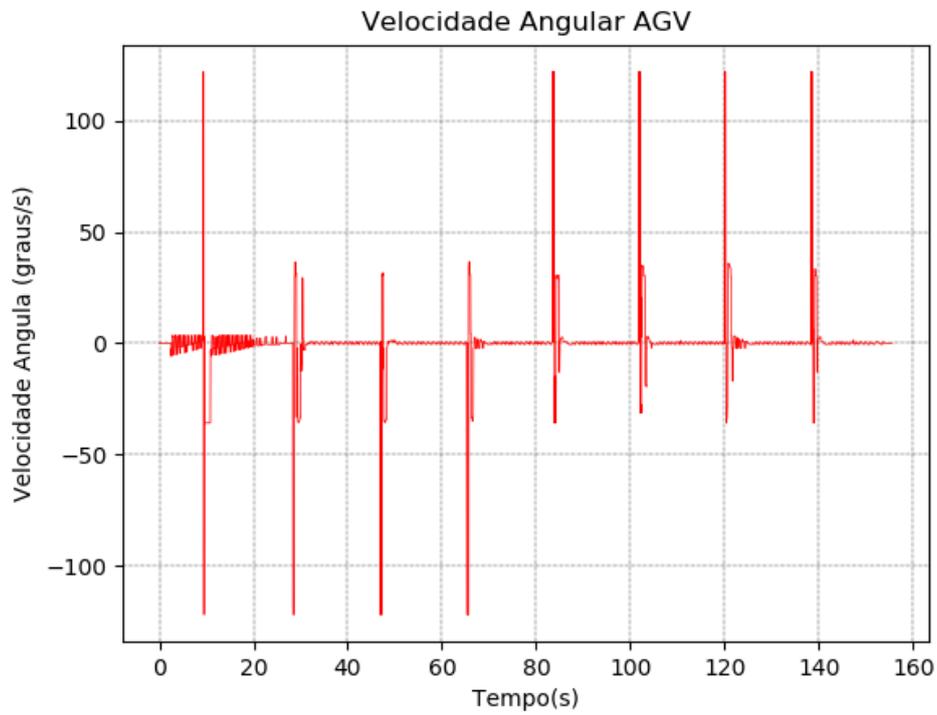


Figura 5.38 Velocidade angular AGV Fuzzy Oito Digital Cinemático.

A Figura 5.39 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

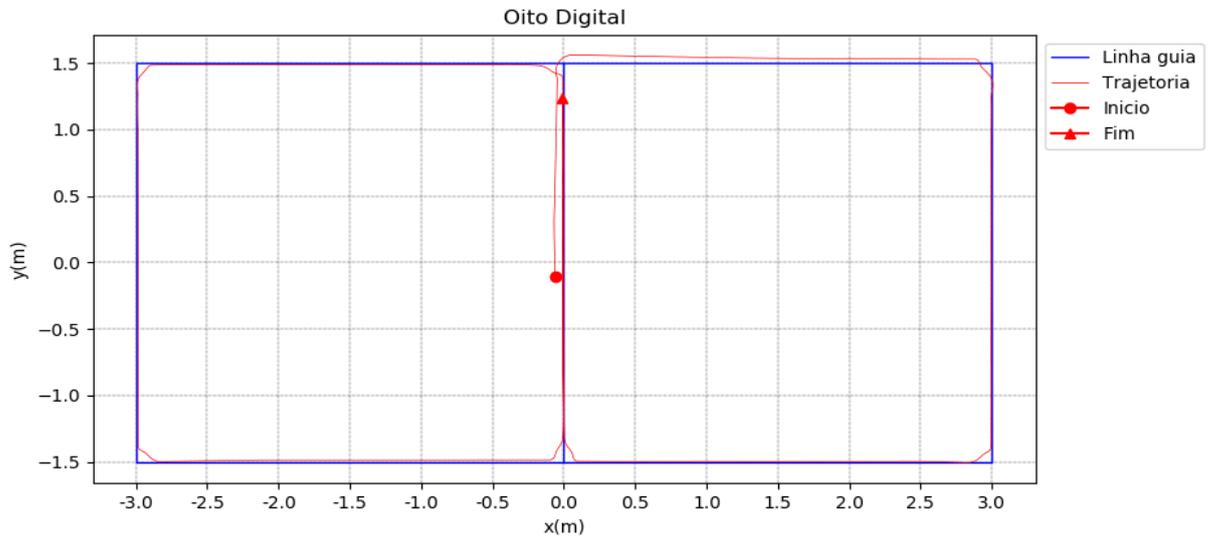


Figura 5.19 Posição *Fuzzy* Oito Digital Cinemático.

- **Pista Infinito**

A Pista Infinito apresentou uma variação angular de -45° a 45° , após a estabilização do veículo em relação à linha, se manteve entre 0° , com média angular de 052° , variância de $14,12^\circ$ e desvio padrão de $3,75^\circ$ conforme visto na Figura 5.35.

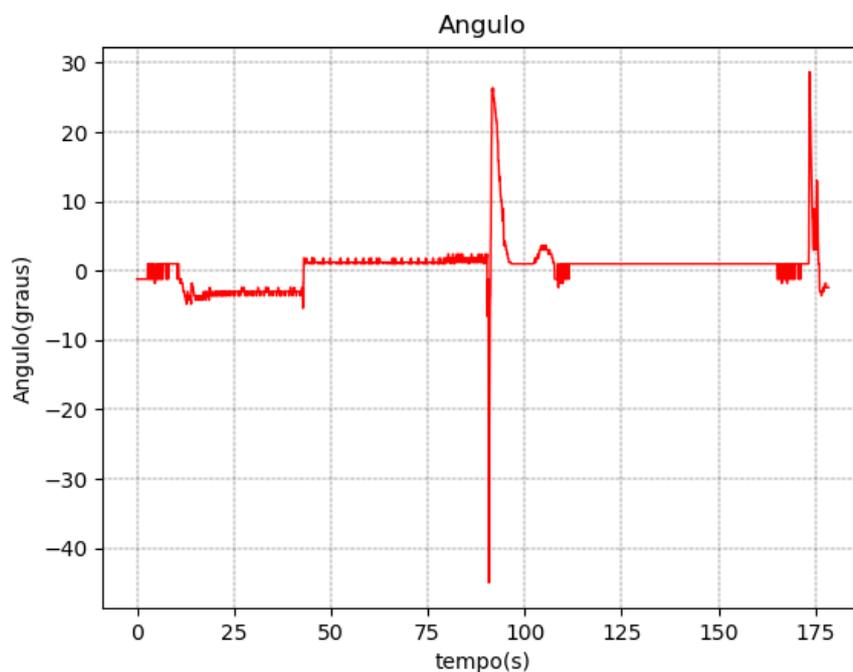
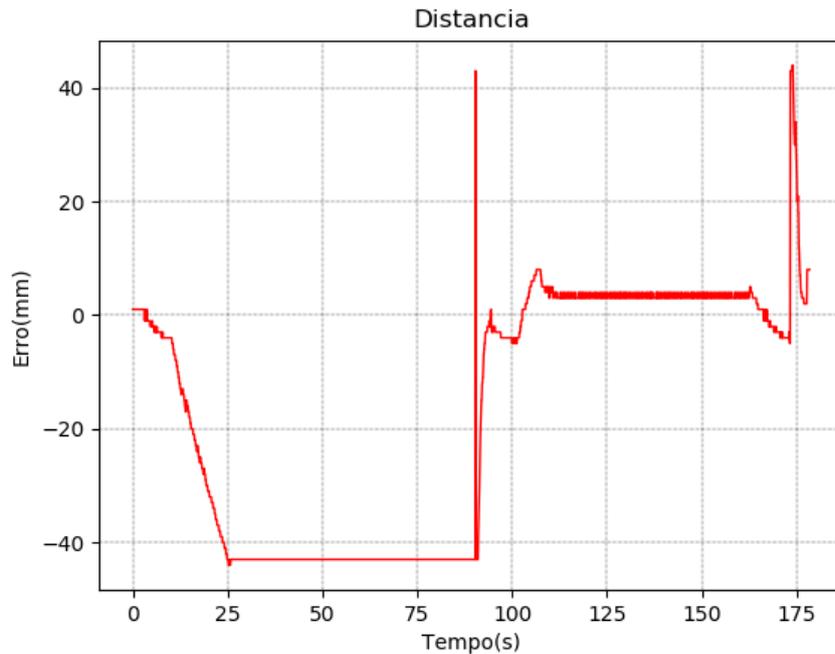


Figura 5.20 Ângulo *Fuzzy* Infinito Cinemático.

O erro da distância do veículo foi de 43 mm para esquerda em relação à linha da trajetória, com uma oscilação de 43mm para esquerda a 43mm para direita, teve uma variância 489,34 mm para direita, com erro médio de 16,72 mm para esquerda e desvio padrão de 22,12 mm.

**Figura 5.21 Distância *Fuzzy* Infinito Cinemático.**

A resposta do controle Fuzzy, que levou em consideração o ângulo do veículo e a distância do centro do veículo à linha, fica em torno de -10 a 10, mas não ocorre a estabilização do controle. Aparentou um desvio padrão de 5,86, com uma variância de 34,17 com média 0,32.

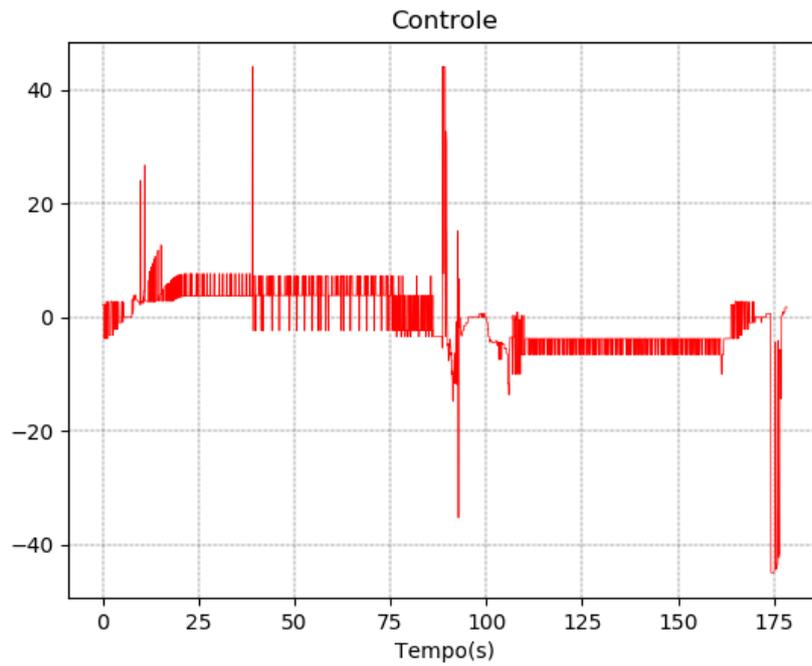


Figura 5.22 Controle *Fuzzy* Infinito Cinemático.

A Figura 5.43 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

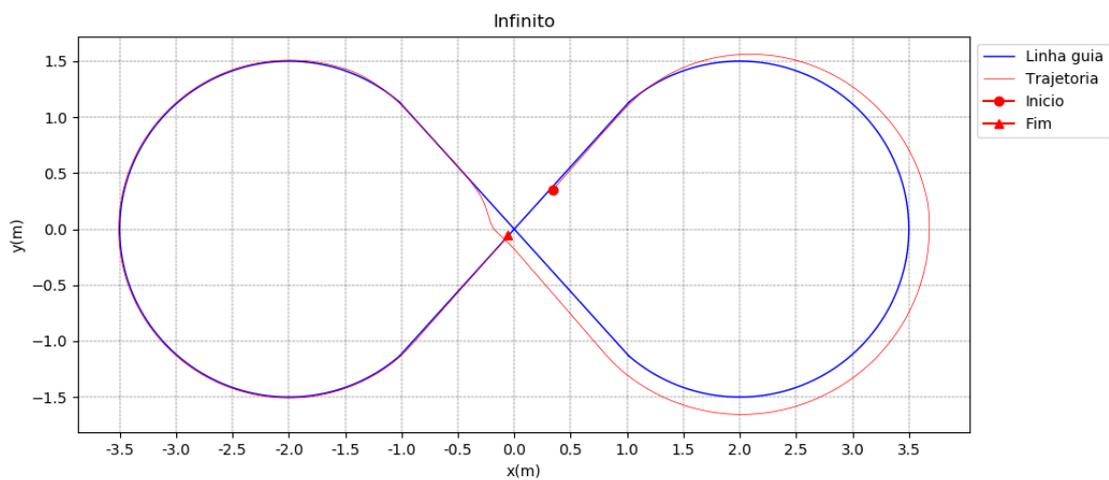


Figura 5.23 Posição *Fuzzy* Infinito Cinemático.

A velocidade angular do AGV, apresentou uma velocidade angular média de 0,32 graus/s, com uma variância de 34,17 graus/s e um desvio padrão 5,84 graus/s.

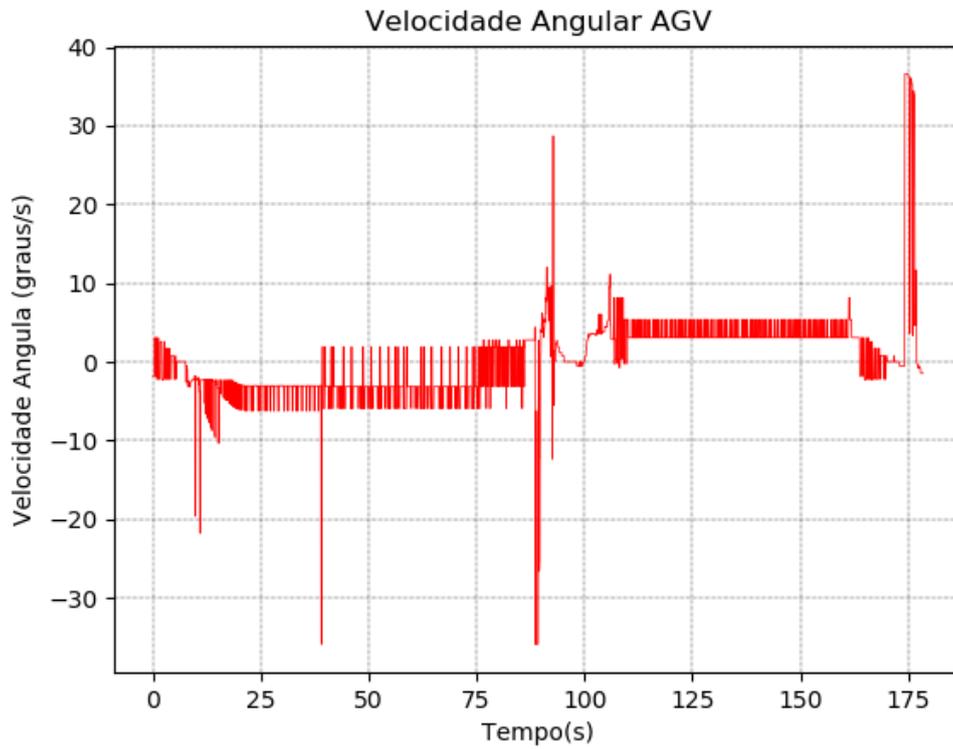


Figura 5.24 Velocidade angular do AGV *Fuzzy Infinito Cinemático*.

5.7.2 Cenário de Teste 02 – Unity Dinâmico

O acionamento dos motores levou em consideração a dinâmica do motor elétrico modelado no subcapítulo anterior apresentando uma resposta ao degrau unitário próximo ao motor real da Maxon calculado pelo Matlab e conforme a Figura 5.4.

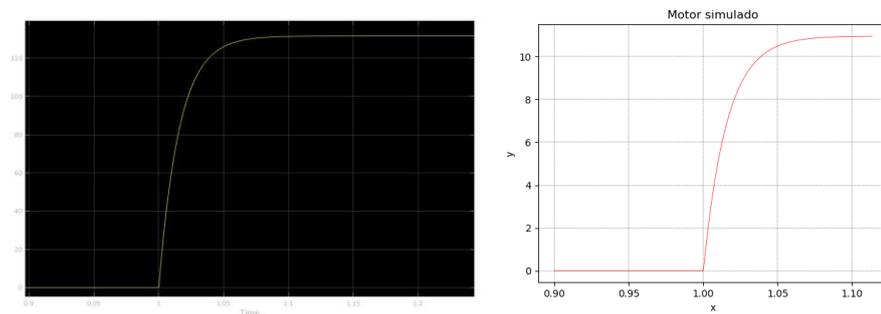


Figura 5.45 – Resposta do motor ao degrau unitário (a) Matlab (b) Simulado

O motor simulado apresentando um intervalo maior entre os valores que calculado pelo Matlab, embora esta simplificação provoque uma pequena divergência de dados, esta amostra

pode se aumentar dependendo apenas do poder de processamento do computador que realizará os experimentos.

Neste experimento viu-se um maior tempo para a estabilização T1, sendo maior que o testes do primeiro cenário, o que é normal pela incorporação da dinâmica do veículo nesse modelo. É notório também as perturbações das velocidades aplicadas no motor simulado devido ao emprego do cálculo da dinâmica, conforme visto na Figura 5.4.

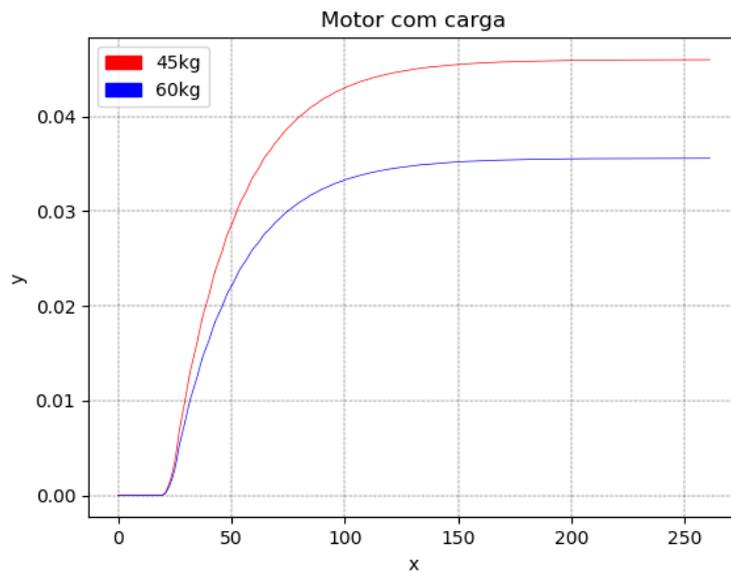


Figura 5.25 Motor com 45 e 60 kg.

Logo, foi realizado um aumento nas tensões de entra para cada peso aplicado, a fim de manter constante a velocidade linear do veículo. Apresentando os seguintes resultados separados pelo controle utilizado o peso empregado e a pista:

- PID Círculo sem carga:

A Pista do círculo apresenta uma variação angular de aproximadamente $-0,5^\circ$ a $-1,8^\circ$ após a estabilização do veículo em relação à linha, se manteve entre $0,0^\circ$ a $-0,5^\circ$, com média angular de $-0,82^\circ$, variância de $0,19^\circ$ e desvio padrão de $0,44^\circ$ conforme visto na Figura 5.47.

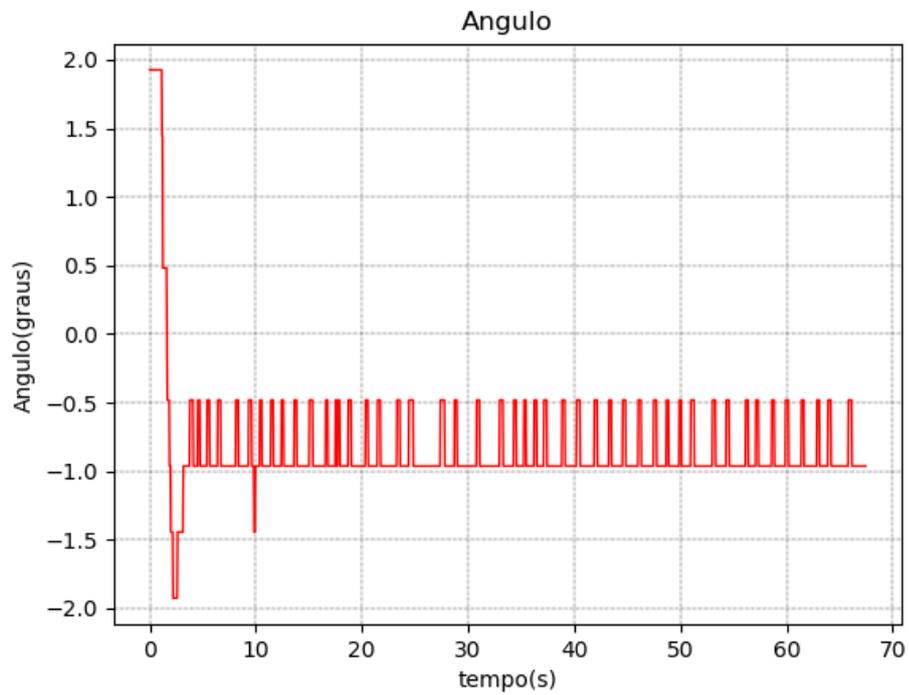


Figura 5.26 Ângulo PID Círculo Sem Carga Dinâmico.

A Figura 5.48 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

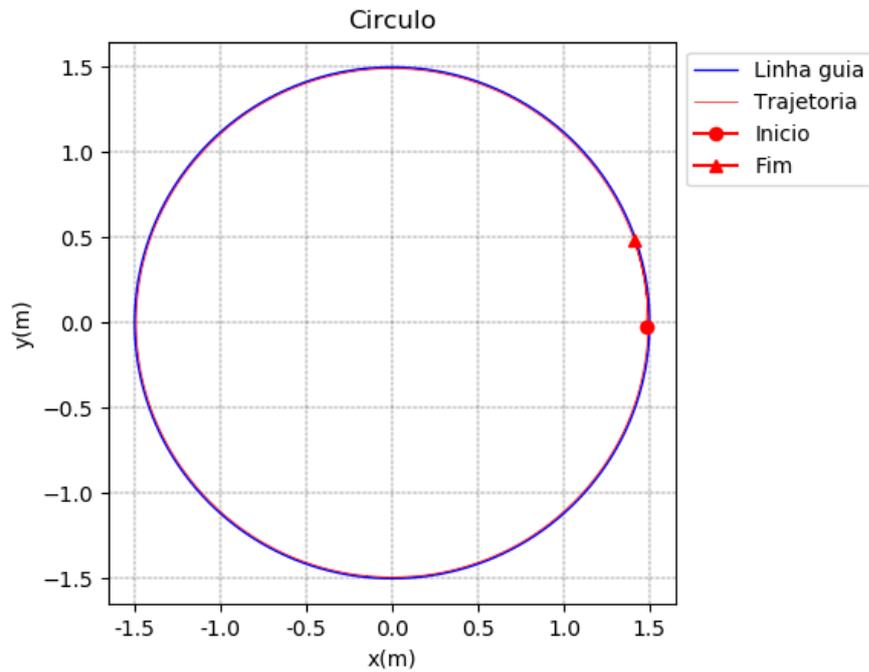


Figura 5.27 Posição PID Círculo Sem Carga Dinâmico.

A resposta do controle PID que levou em consideração a distância do centro do veículo à linha, se estabiliza entre -0,07 a -0,04, após estabilização, aparentou um desvio padrão de 0,21, com uma variância de 0,04 com média -0,69.

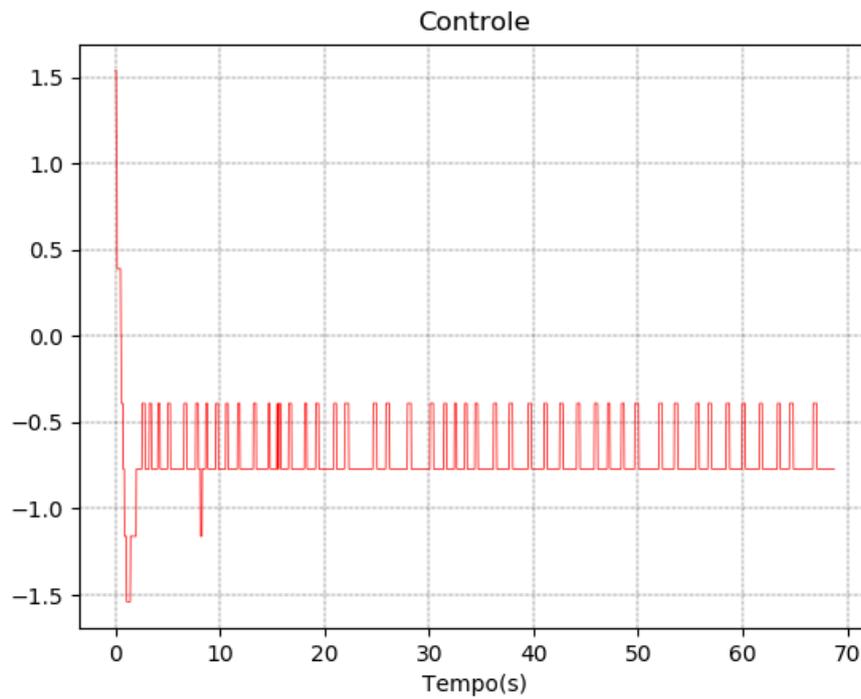


Figura 5.28 Controle PID Círculo Sem Carga Dinâmico.

O erro da distância do veículo foi de 2 mm para esquerda em relação à linha da trajetória, com uma oscilação de 3mm para esquerda a 1mm para direita, teve uma variância 0,06 mm para direita, com erro médio de 2,07 mm para direita e desvio padrão de 0,26 mm.

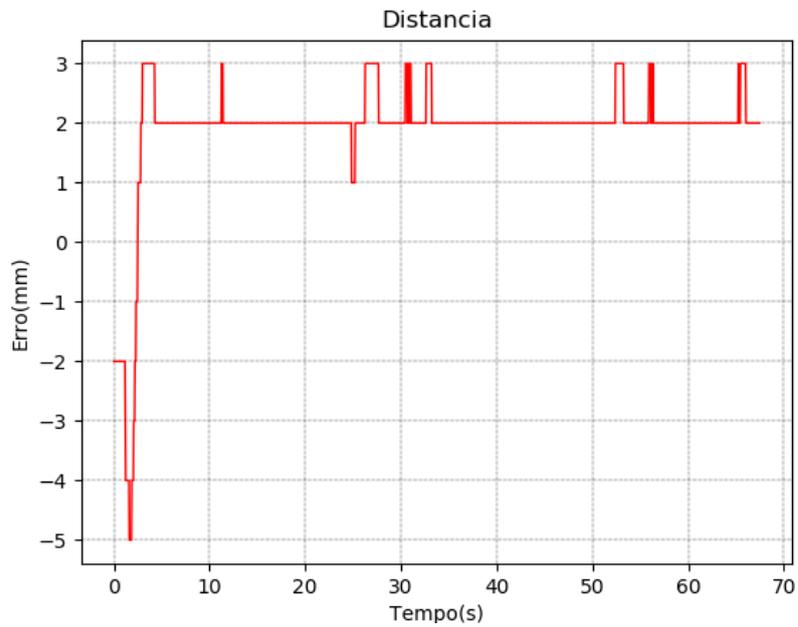


Figura 5.29 Distância PID Círculo Sem Carga Dinâmico.

A velocidade angular do AGV, apresentou uma velocidade angular média de 2,23 graus/s, com uma variância de 5,21 graus/s e um desvio padrão 2,28 graus/s.

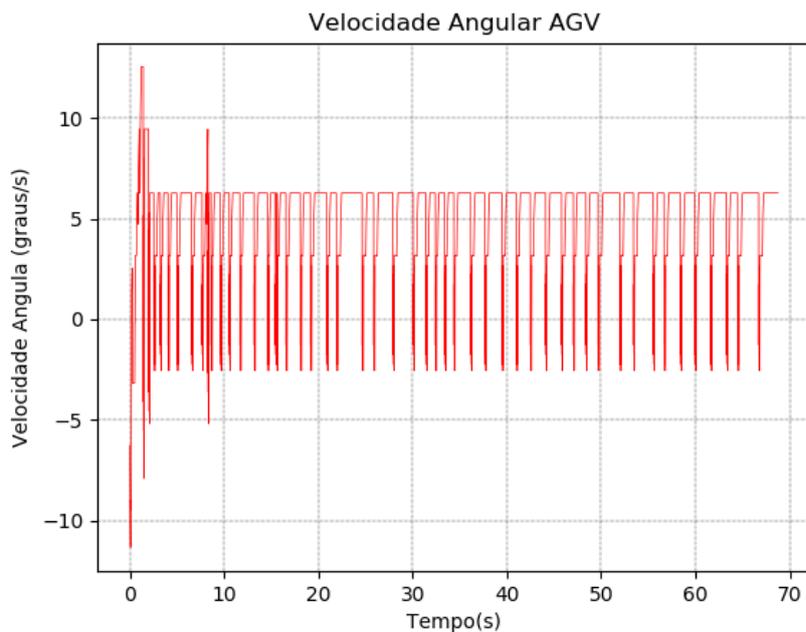


Figura 5.30 Velocidade Angular do AGV PID Círculo Sem Carga Dinâmico.

- PID Círculo 1kg:

A Pista do círculo apresenta uma variação angular de aproximadamente -6° a -30° , após a estabilização do veículo em relação à linha, se manteve entre -12° a -22° , com média angular de $-16,40^\circ$, variância de $33,08^\circ$ e desvio padrão de $5,75^\circ$ conforme visto na Figura 5.52.

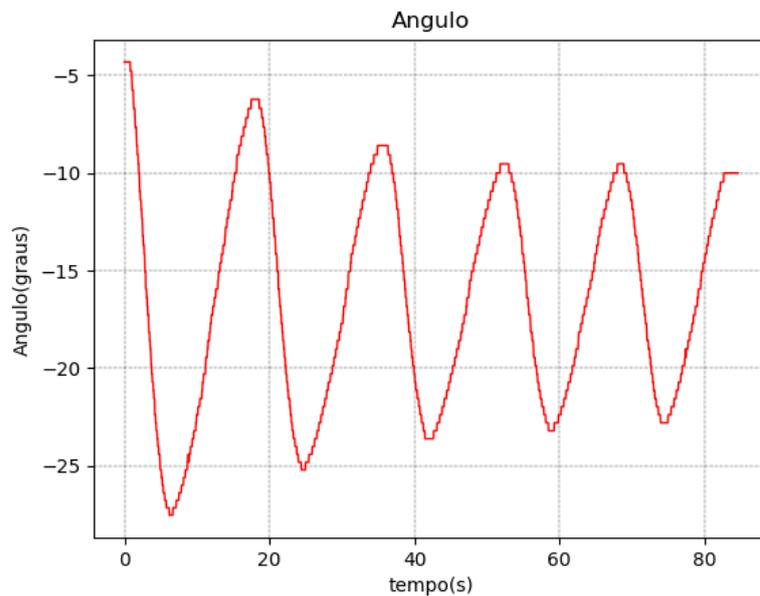


Figura 5.31 Ângulo PID Círculo 1Kg Dinâmico.

A resposta do controle PID que levou em consideração a distância do centro do veículo à linha, como visto na ficou oscilando entre -17 a -7, aparentou um desvio padrão de 4,51, com uma variância de 20,38 com média -13,19.

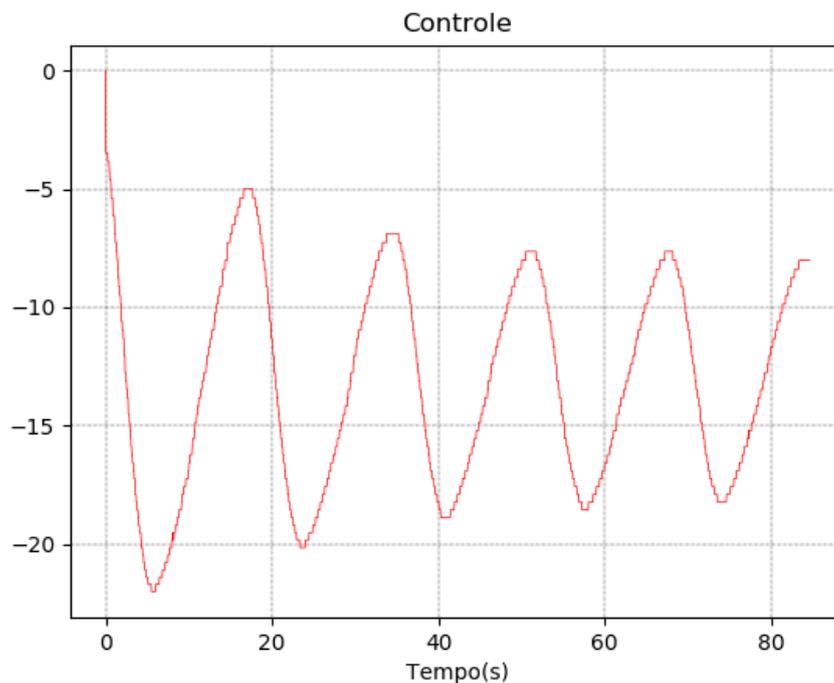


Figura 5.32 Controle PID Círculo 1Kg Dinâmico.

O erro da distância do veículo em relação à linha da trajetória, apresentou uma oscilação de 62 mm a 6 mm para direita, teve uma variância 120,04 mm para direita, com erro médio de 36,46 mm para direita e desvio padrão de 10,95 mm.

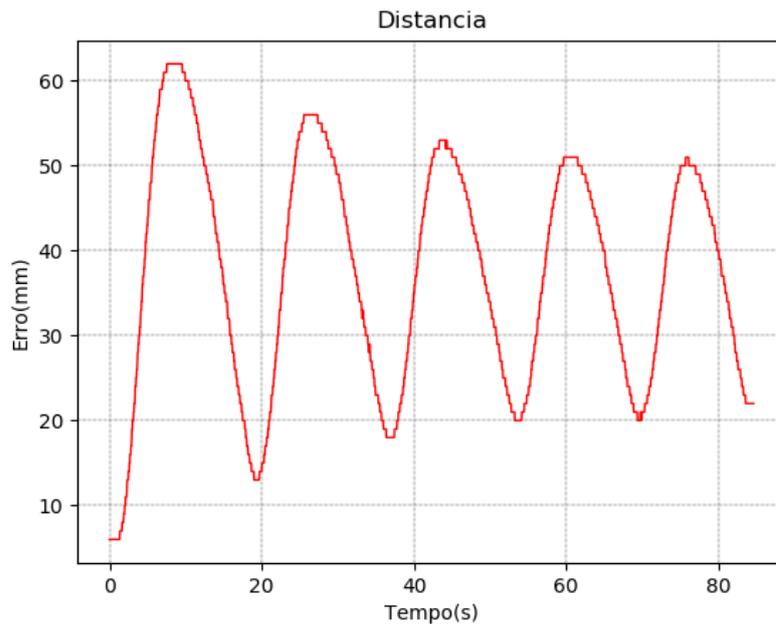


Figura 5.33 Distância PID Círculo 1Kg Dinâmico.

A velocidade angular do AGV, apresentou uma velocidade angular média de 4,51 graus/s, com uma variância de 16,15 graus/s e um desvio padrão 4,01 graus/s.

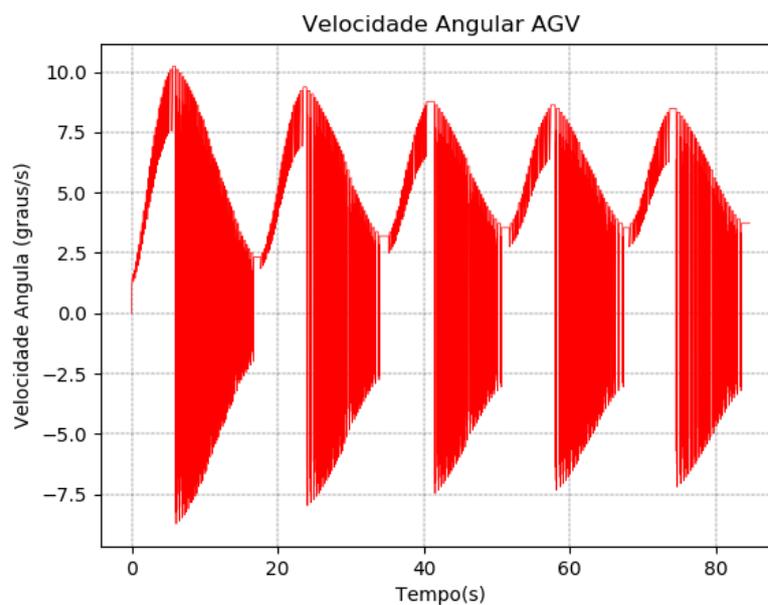


Figura 5.34 Velocidade angular AGV PID Círculo 1Kg Dinâmico.

A Figura 5.48 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

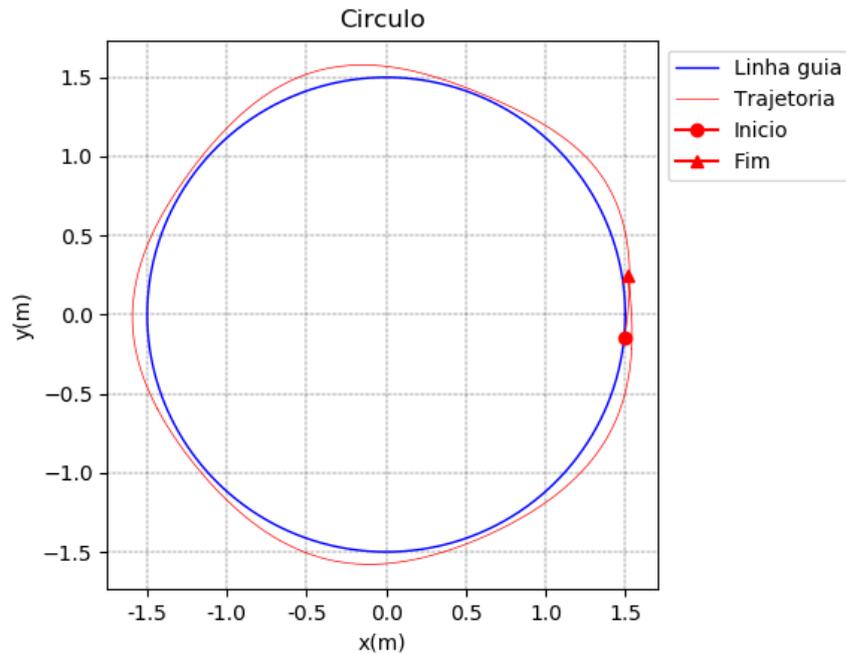


Figura 5.35 Posição PID Círculo 1Kg Dinâmico.

- PID Quadrado sem carga:

A Pista do círculo apresenta uma variação angular -5° a 35° após a estabilização do veículo em relação à linha, se manteve entre 0° , com média angular de $1,42^{\circ}$, variância de $17,37^{\circ}$ e desvio padrão de $4,16^{\circ}$ conforme visto na Figura 5.57.

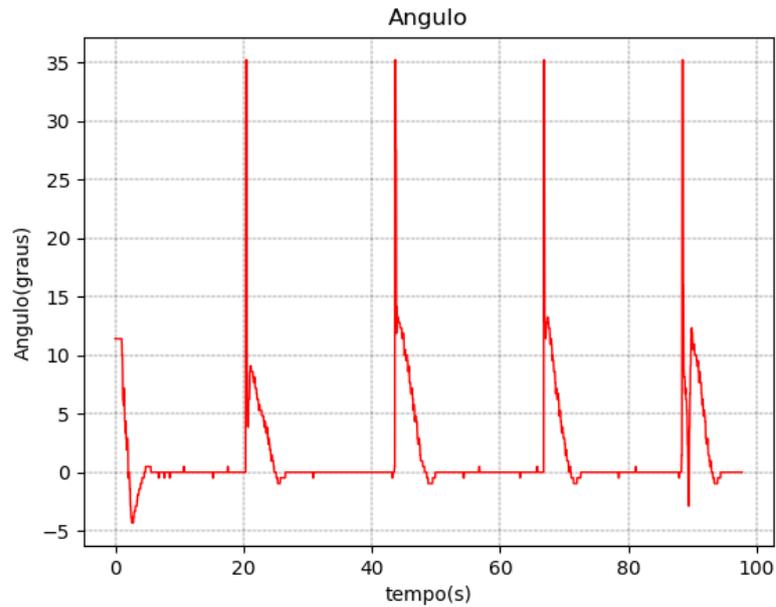


Figura 5.36 Ângulo PID Quadrado Sem Carga Dinâmico.

A velocidade angular do AGV, apresentou uma velocidade angular média de -3,1 graus/s, com uma variância de 610,54 graus/s e um desvio padrão 24,7graus/s.

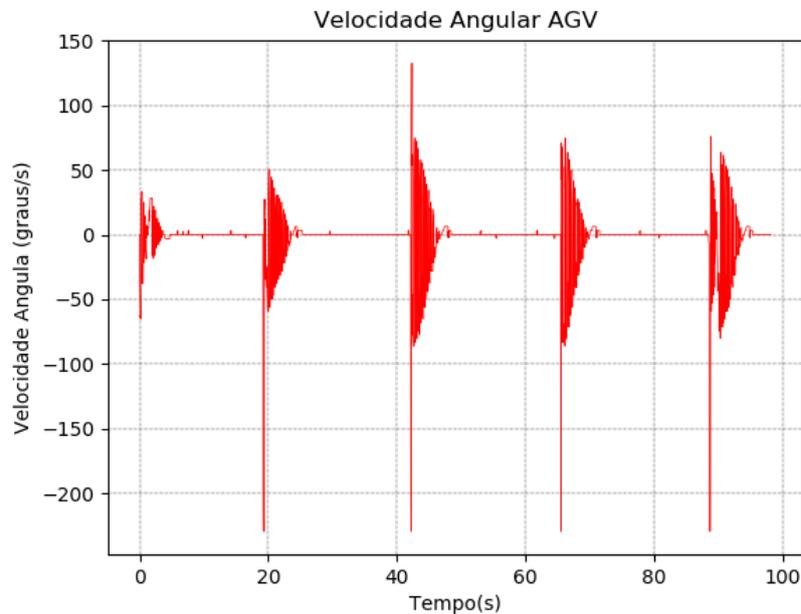


Figura 5.37 Velocidade angular AGV PID Quadrado Sem Carga Dinâmico.

A resposta do controle PID que levou em consideração a distância do centro do veículo à linha, aparentou um desvio padrão de 3,25, com uma variância de 10,59 com média 1,07.

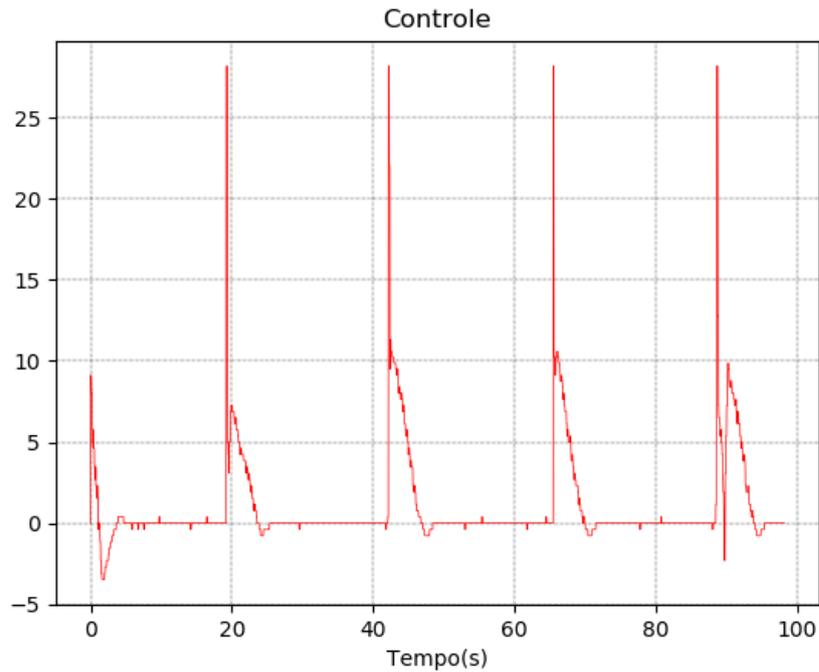


Figura 5.38 Controle PID Quadrado Sem Carga Dinâmica.

O erro da distância do veículo em relação à linha da trajetória, apresentou uma variância 115,81 mm para direita, com erro médio de 3,44 mm para direita e desvio padrão de 10,76 mm.

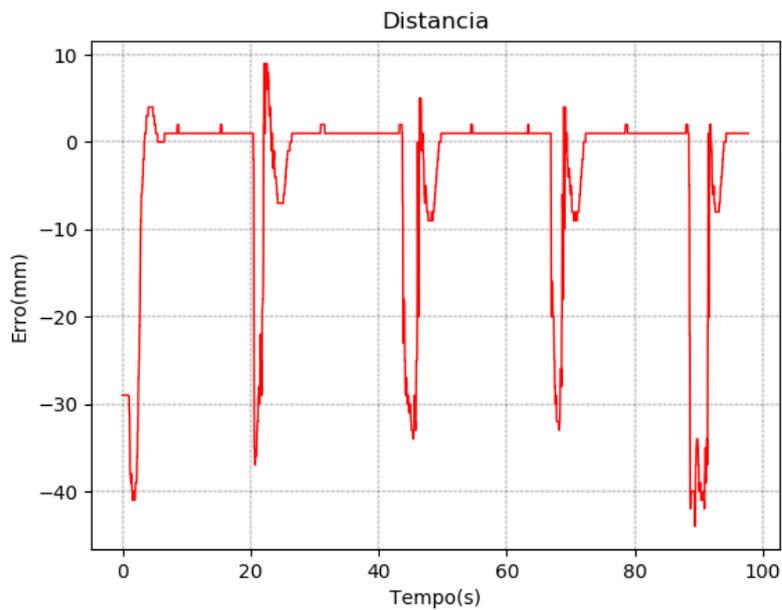


Figura 5.39 Distância PID Quadrado Sem Carga Dinâmica.

A Figura 5.61 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo

veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

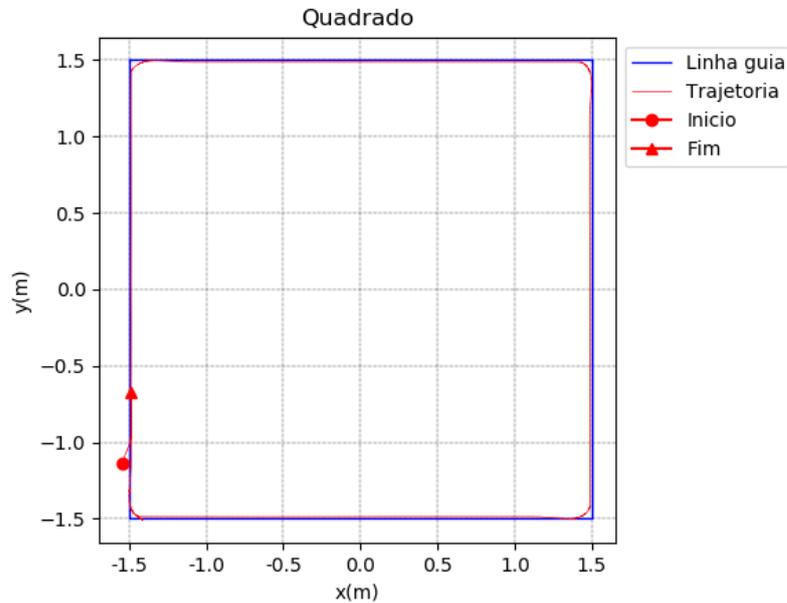


Figura 5.40 Posição PID Quadrado Sem Carga Dinâmico.

- PID Oito Digital Sem Carga:

A Pista do Oito Digital apresenta uma variação angular de aproximadamente -10° a $7,4^\circ$, após a estabilização do veículo em relação à linha, se manteve entre $-2,5^\circ$ a $2,5^\circ$, com média angular de $0,05^\circ$, variância de $0,41^\circ$ e desvio padrão de $0,64^\circ$ conforme visto na Figura 5.62.

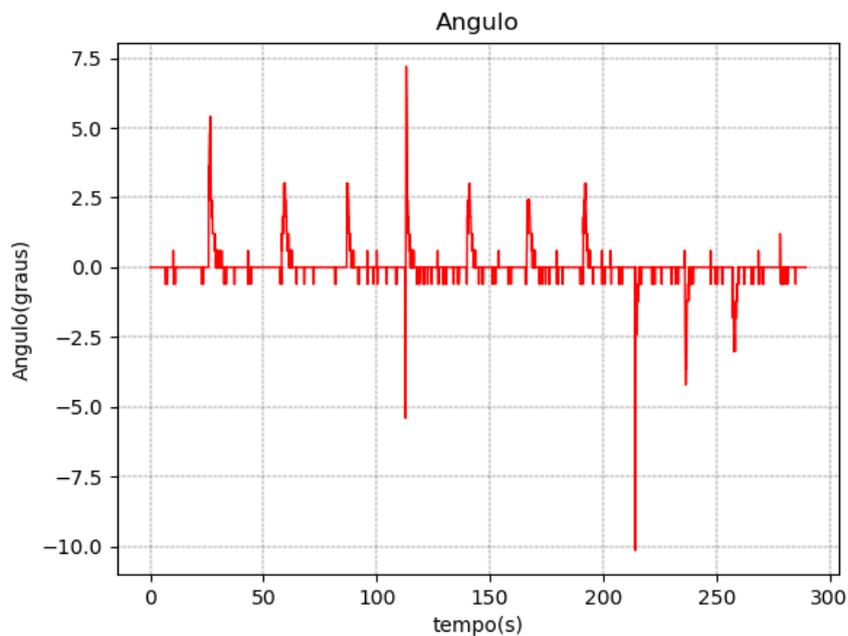


Figura 5.41 Ângulo PID Oito Digital Sem Carga Dinâmico.

A velocidade angular do AGV, apresenta uma velocidade com picos 450 graus/s, -450 graus/s com oscilação entre 50/s a -50 graus/s e estabilização em 0 graus/s. Apresentou uma velocidade angular média de 1,27 graus/s, com uma variância de 927,84 graus/s e um desvio padrão 30,4 graus/s.

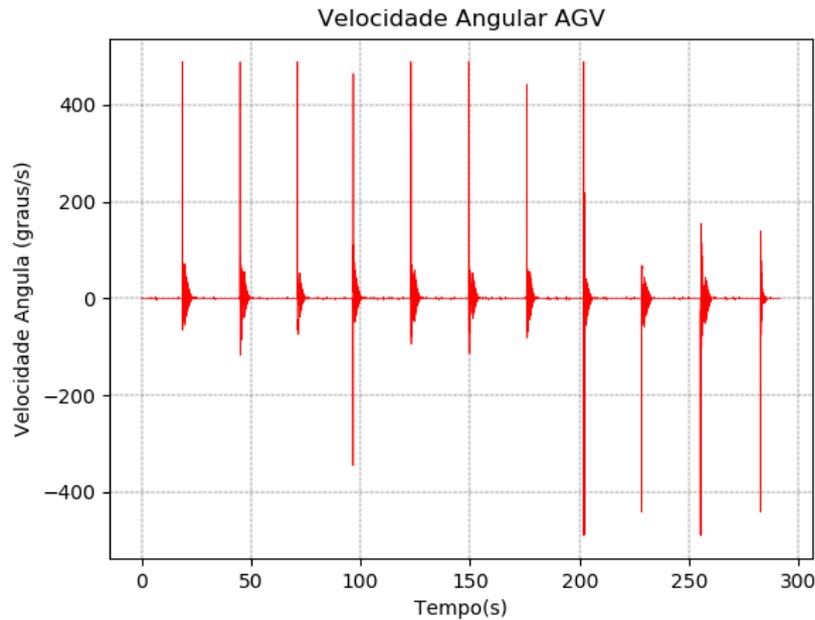


Figura 5.42 Velocidade angular AGV PID Oito Digital Sem Carga Dinâmico.

A resposta do controle PID que levou em consideração a distância do centro do veículo à linha, se estabiliza em torno de 0, mas com oscilação entre 60 e -60 nas regiões de 90°. Aparentou um desvio padrão de 4,32, com uma variância de 18,7 com média -0,15, como visto na A Figura 5.64.

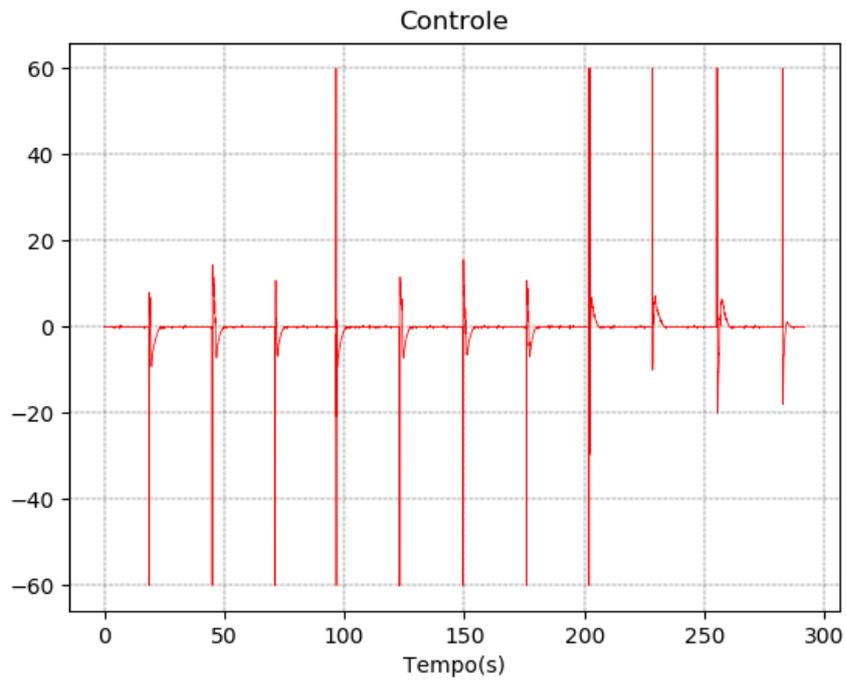


Figura 5.43 Controle PID Oito Digital Sem Carga Dinâmico.

O erro da distância do veículo em relação à linha da trajetória, apresentou uma variância 23,16 mm para direita, com erro médio de 0,24 mm para direita e desvio padrão de 4,81 mm.

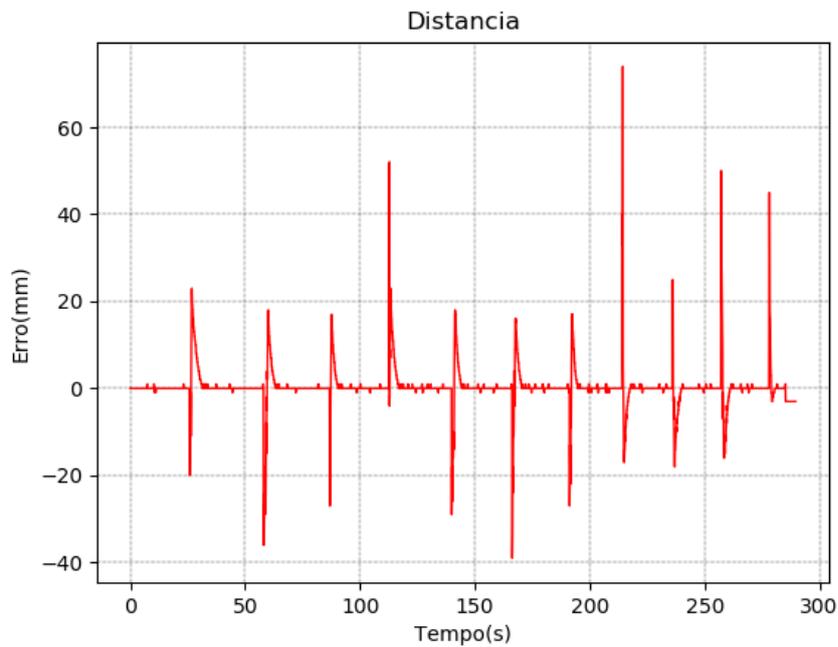


Figura 5.44 Distância PID Oito Digital Sem Carga Dinâmico.

A Figura 5.66 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

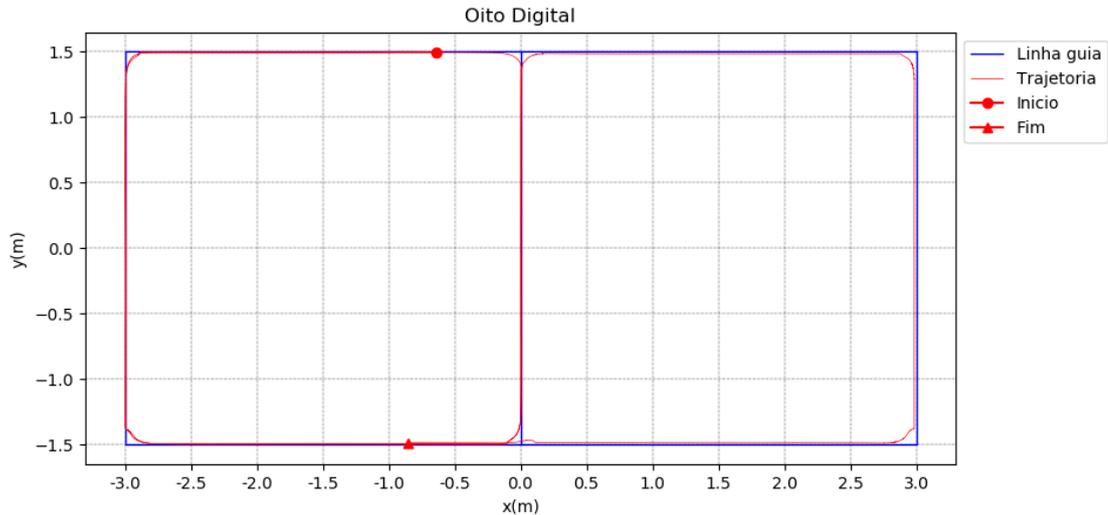


Figura 5.45 Posição PID Oito Digital Sem Carga Dinâmica.

- PID Infinito sem carga:

A Pista do infinito apresenta uma variação angular de aproximadamente $1,4^\circ$ a $-1,5^\circ$, após a estabilização do veículo em relação à linha, se manteve com variação de $0,5^\circ$, com média angular de $0,08^\circ$, variância de $0,57^\circ$ e desvio padrão de $0,76^\circ$ conforme visto na Figura 5.67.

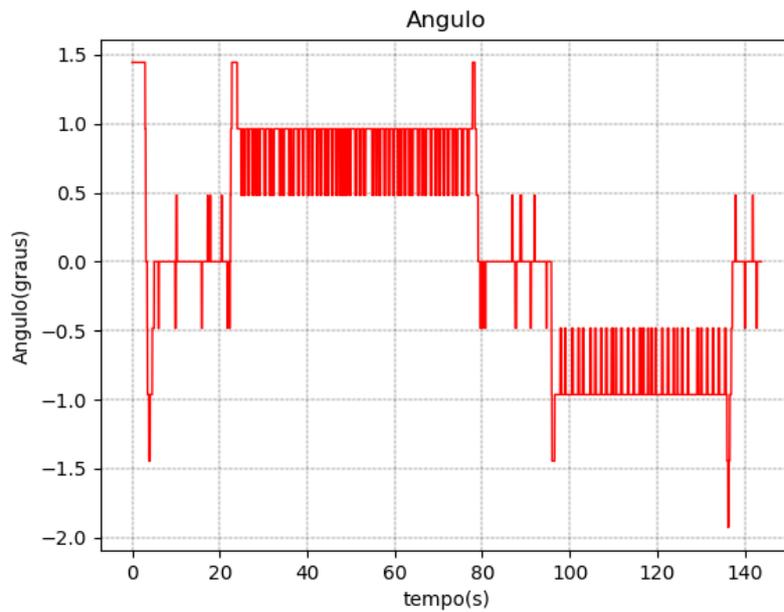


Figura 5.46 Ângulo PID Infinito Sem Carga Dinâmico.

A resposta do controle PID levou em consideração a distância do centro do veículo à linha, ficando oscilando entre 1.2 a -1.6. Apresentou um desvio padrão de 0,6, com uma variância de 0,36 com média 0,006, como visto na A Figura 5.68.

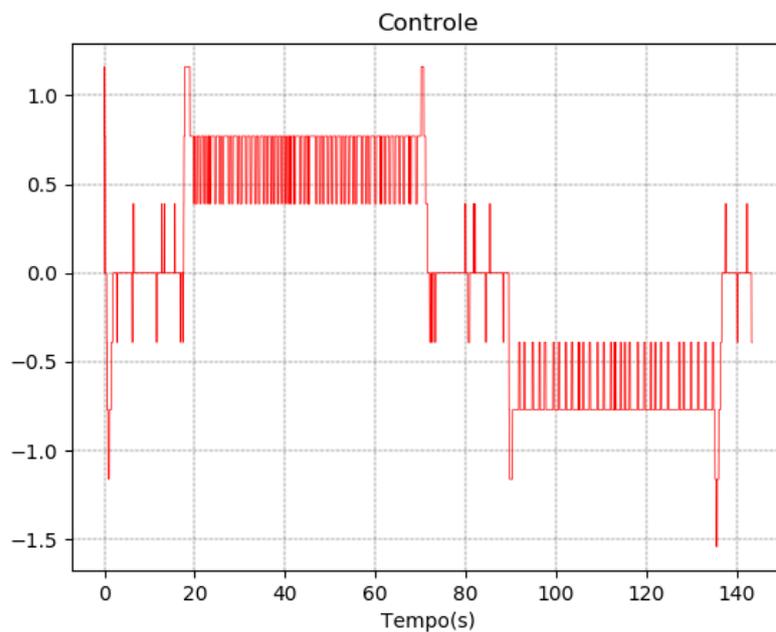


Figura 5.47 Controle PID Infinito Sem Carga Dinâmico.

O erro da distância do veículo em relação à linha da trajetória, apresentou uma variância de 6,8 mm para direita, com erro médio de 0,18 mm para direita e desvio padrão de 2,6 mm.

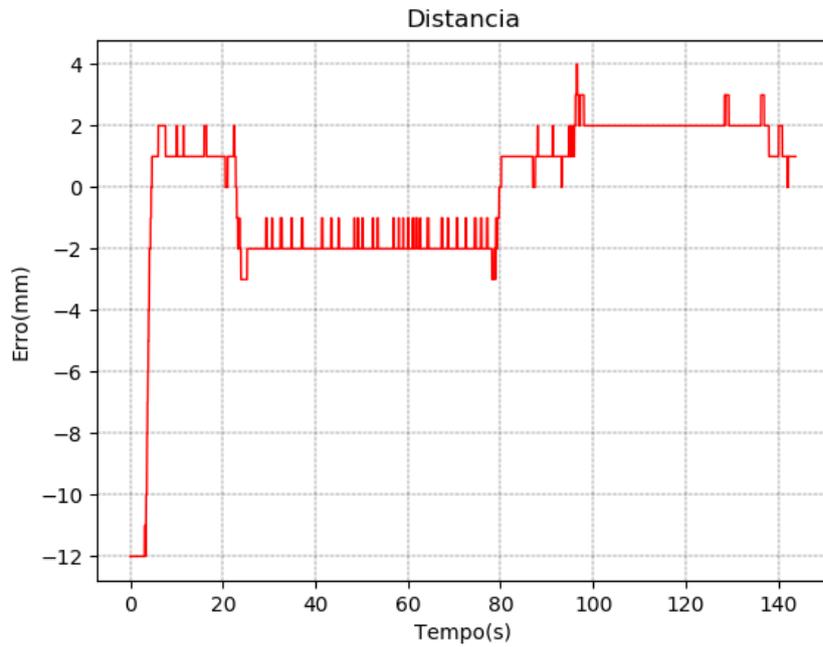


Figura 5.48 Distância PID Infinito Sem Carga Dinâmica.

A velocidade angular do AGV, apresenta uma velocidade angular oscilando entre -6 graus/s a 6 rads/s com picos de 15 graus/s a -10 graus/s. Apresentou uma velocidade angular média de 0,11 graus/s, com uma variância de 22,19 graus/s e um desvio padrão 4,71 graus/s.

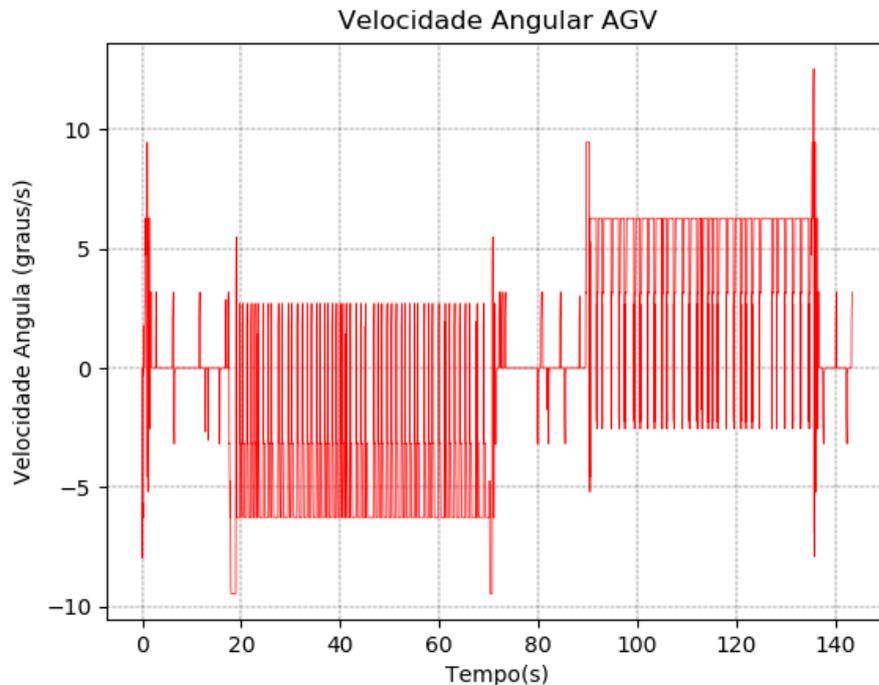


Figura 5.49 Velocidade Angular AGV PID Infinito Sem Carga Dinâmica.

A Figura 5.71 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo

veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

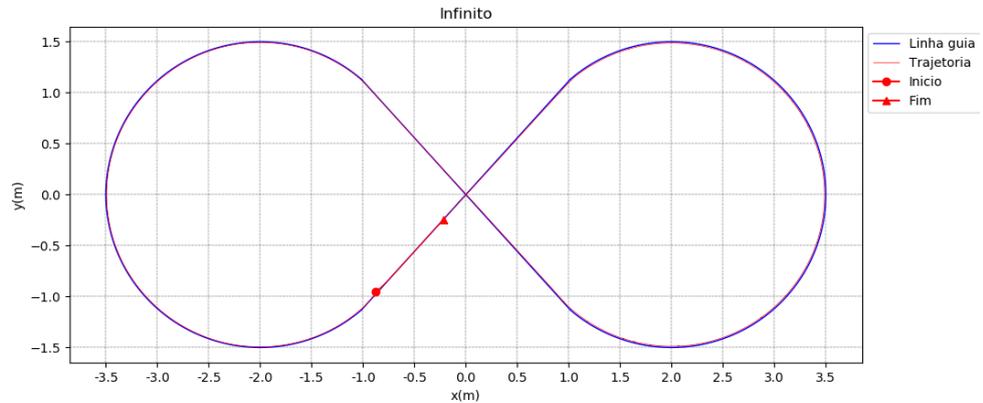


Figura 5.50 Posição PID Infinito Sem Carga Dinâmico.

- PID Infinito com 1kg:

A Pista do infinito apresenta uma variação angular de aproximadamente 28° a -28° e não houve estabilização do veículo em relação à linha, com média angular de $1,07^\circ$, variância de $219,72^\circ$ e desvio padrão de $14,82^\circ$ conforme visto na Figura 5.72.

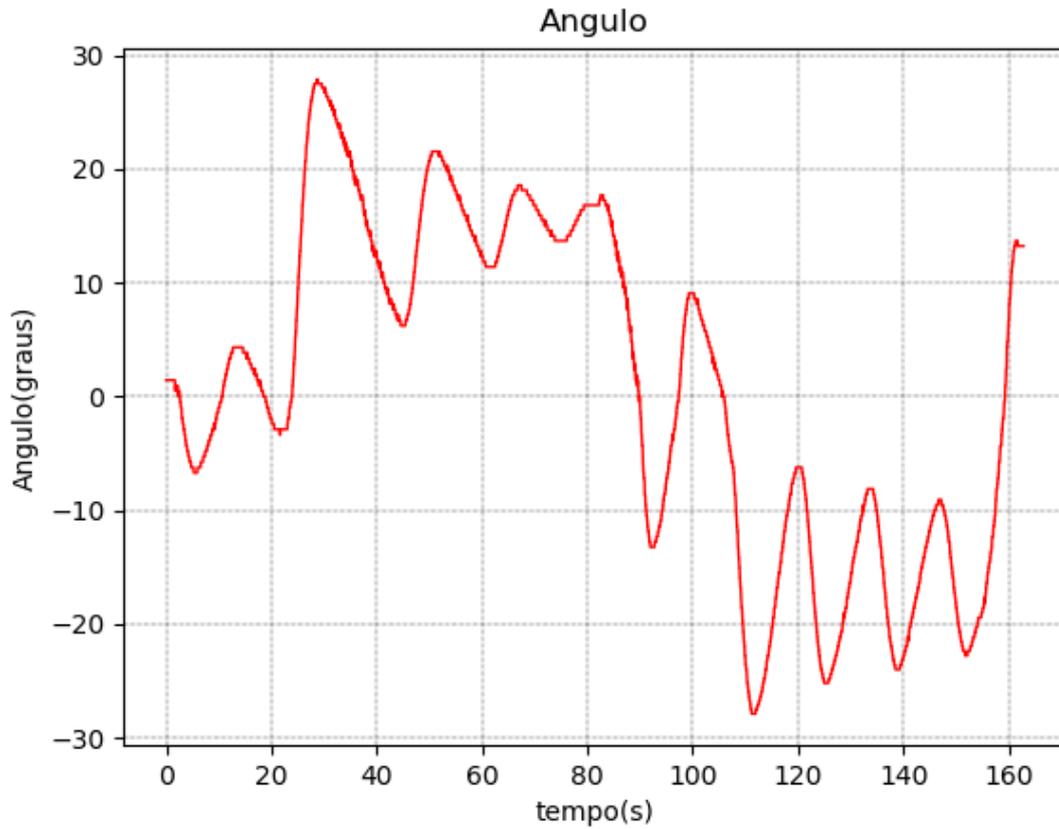


Figura 5.51 Ângulo PID Infinito 1 Kg Dinâmico.

A velocidade angular do AGV, apresenta uma oscilação da velocidade angular de 11 graus/s a -11 graus/s e não houve estabilização. Apresentou uma velocidade angular média de 0,12 graus/s, com uma variância de 27,48 graus/s e um desvio padrão 5,24 graus/s.

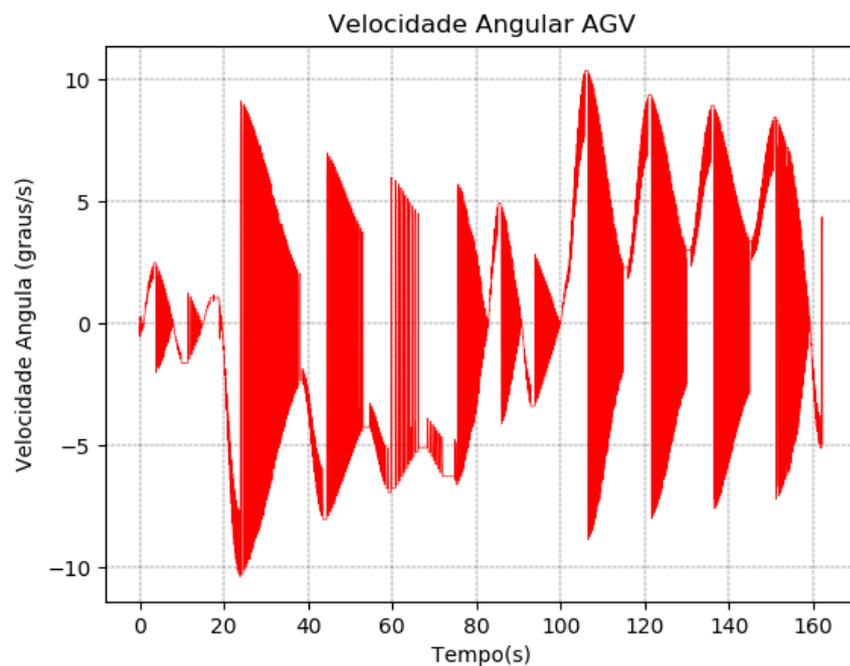


Figura 5.52 Velocidade Angular AGV PID Infinito 1 Kg Dinâmico.

A resposta do controle PID que levou em consideração a distância do centro do veículo à linha, como visto na A Figura 5.10, ficou entre 21 a -21. Aparentou um desvio padrão de 12,01, com uma variância de 144,35 com média 0,1, como visto na A Figura 5.68.

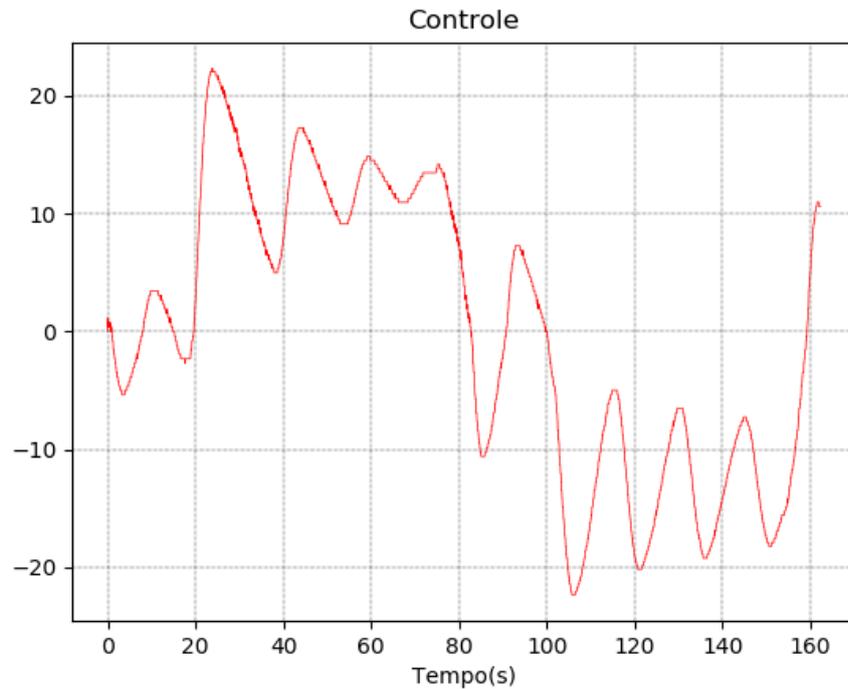


Figura 5.53 Controle PID Infinito 1 Kg Dinâmico.

A distância do veículo foi 62 mm máximo em relação à linha da trajetória e não houve estabilização da distância. com erro médio de 2,51 mm para esquerda e desvio padrão de 34,33 mm.

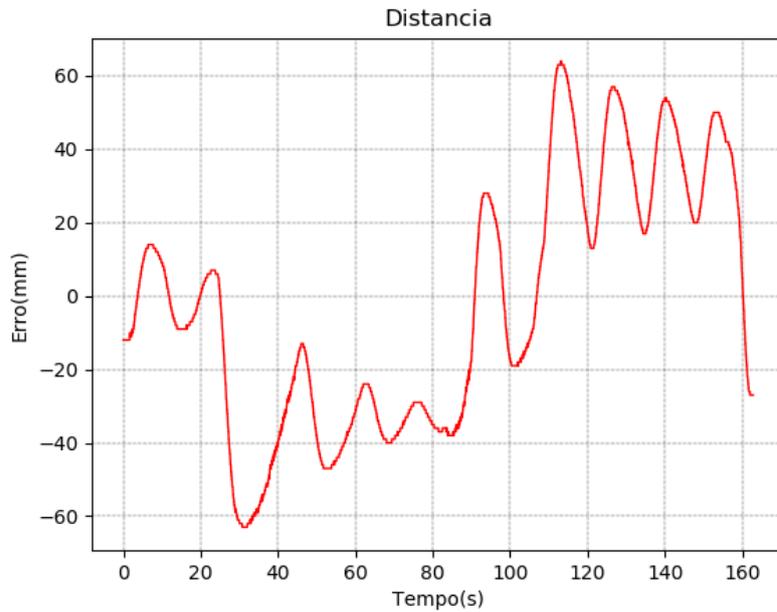


Figura 5.54 Distância PID Infinito 1 Kg Dinâmico.

A Figura 5.76 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

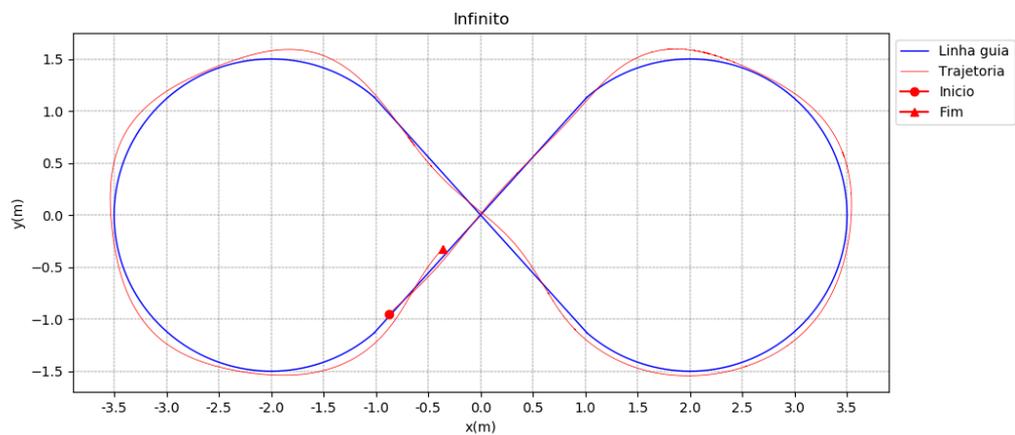


Figura 5.55 Posição PID Infinito 1 Kg Dinâmico.

- Fuzzy Círculo sem carga:

A Pista do círculo apresenta uma média angular de $-0,34^\circ$, variância de $56,67^\circ$ e desvio padrão de $7,52^\circ$ conforme visto na Figura 5.77.

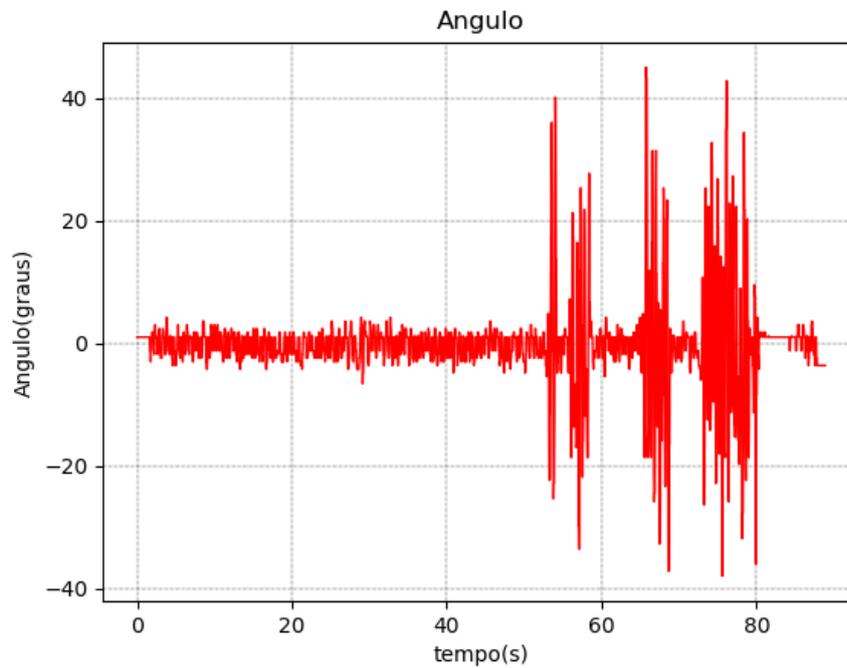


Figura 5.56 Ângulo *Fuzzy* Círculo Sem Carga Dinâmico.

A Figura 5.78 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

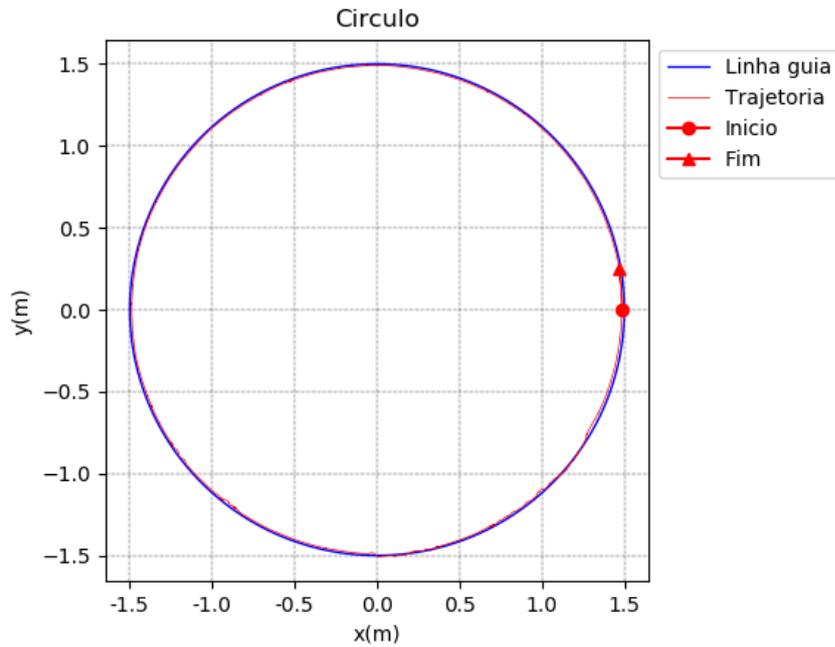


Figura 5.57 Posição *Fuzzy* Círculo Sem Carga Dinâmico.

A resposta do controle *Fuzzy* que levou em consideração o ângulo do veículo e a distância do centro do veículo à linha, apresenta uma oscilação entre -2 a 2 após um período perde a estabilização e fica entre -48 a 48. Aparentou um desvio padrão de 14,97, com uma variância de 224,23 com média -0,77, como visto na A Figura 5.79.

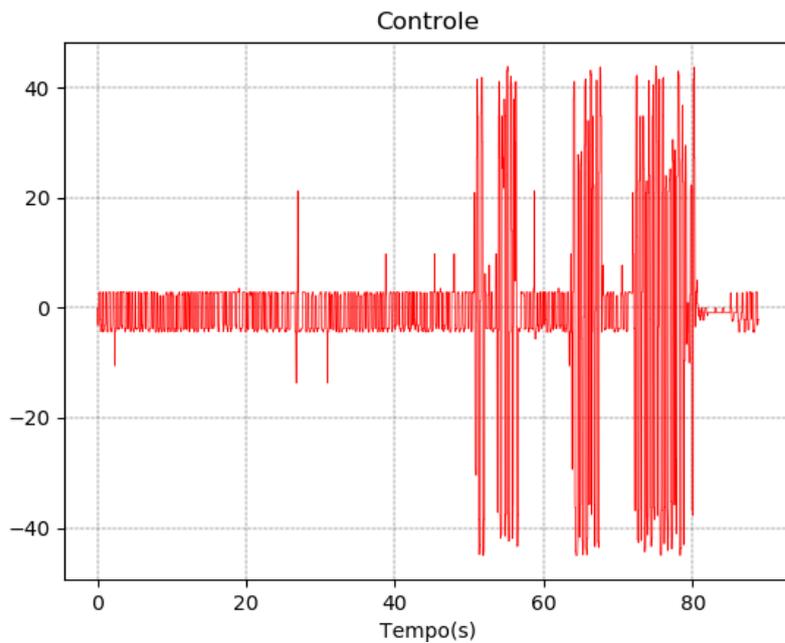


Figura 5.58 Controle *Fuzzy* Círculo Sem Carga Dinâmico.

A distância do veículo inicia com oscilação de 2 mm em relação à linha da trajetória, e não houve estabilização da distância com erro médio de 0,01 mm para esquerda e desvio padrão de 7,34 mm e variância de 53,99mm.

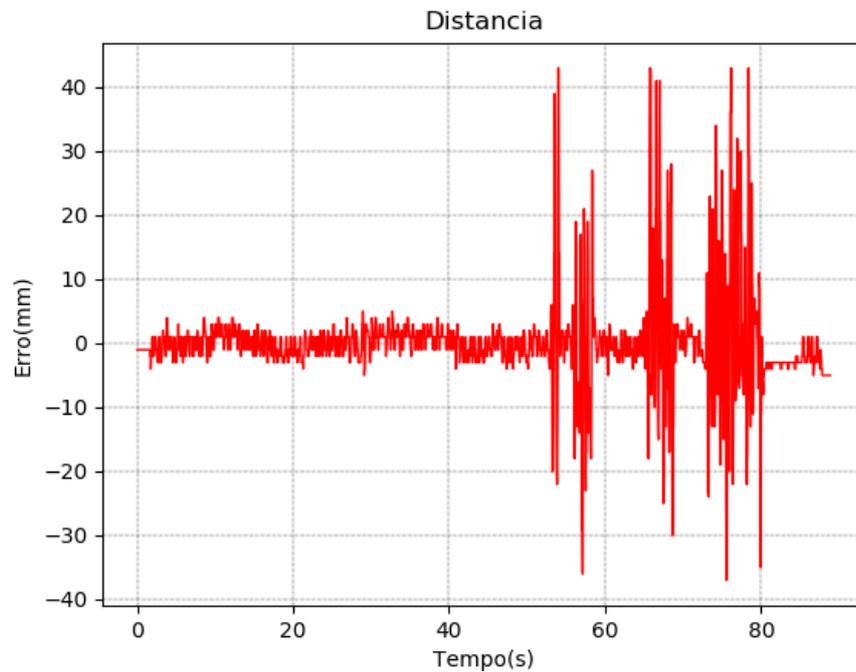


Figura 5.59 Distância *Fuzzy* Círculo Sem Carga Dinâmico.

Apresentou uma velocidade angular média de 8,53 graus/s, com uma variância de 1024,1graus/s e um desvio padrão 101,11graus/s.

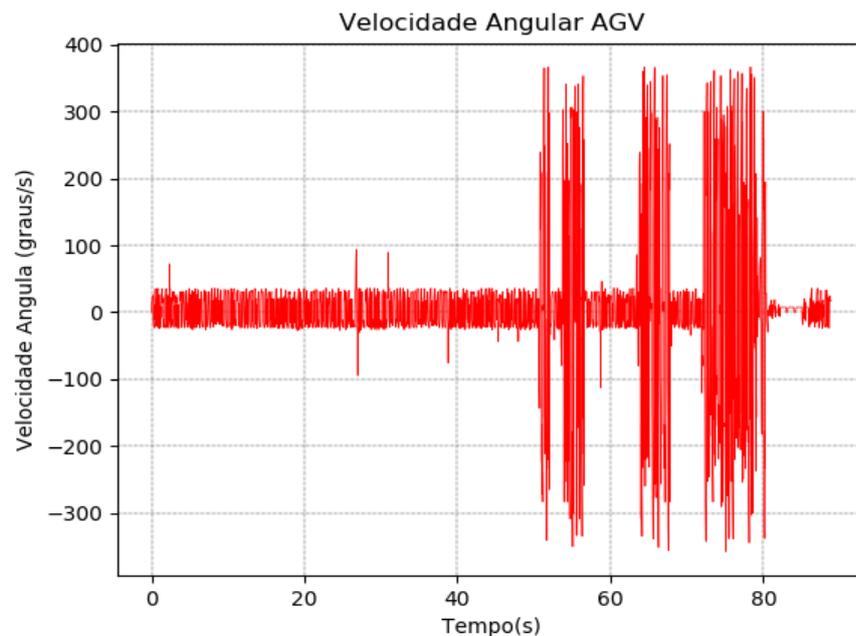


Figura 5.60 Velocidade angular AGV *Fuzzy* Círculo Sem Carga Dinâmico.

- Fuzzy Quadrado sem carga:

A Pista quadrado apresenta uma variação angular de aproximadamente 2° a -2° , após um intervalo, perde estabilização e apresenta valores entre 48° a -48° , uma média angular de $0,89^\circ$, variância de $302,44^\circ$ e desvio padrão de $17,39^\circ$ conforme visto na Figura 5.82.

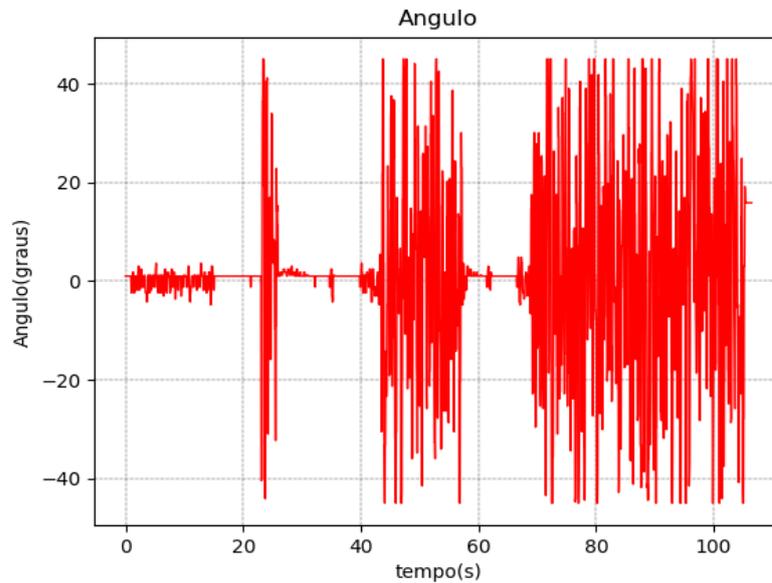


Figura 5.61 Ângulo *Fuzzy Quadrado Sem Carga Dinâmico*.

A resposta do controle Fuzzy que levou em consideração o ângulo do veículo e a distância do centro do veículo à linha, não se estabiliza e tem valores entre -48 a 48. Aparentou um desvio padrão de 27,1, com uma variância de 734,69 com média -1,04, como visto na A Figura 5.83.

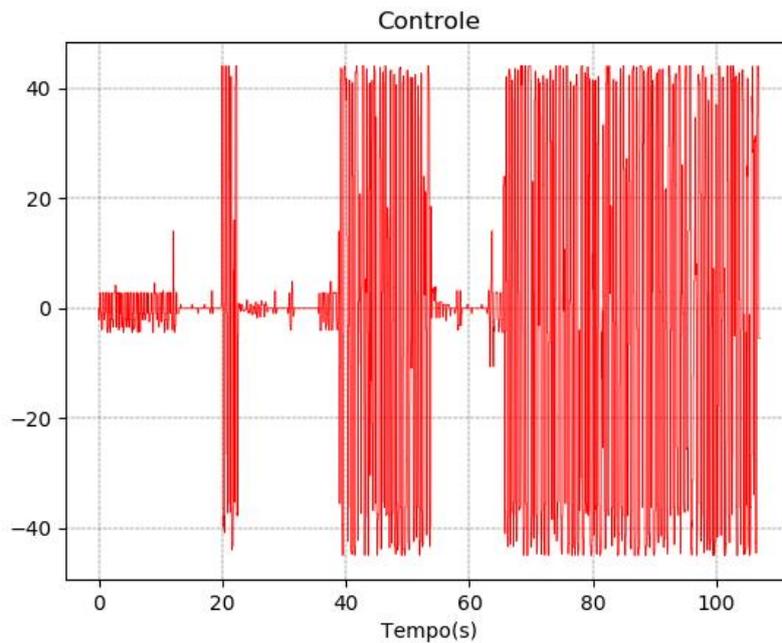


Figura 5.62 Controle Fuzzy Quadrado Sem Carga Dinâmico.

A distância do veículo em relação à linha teve uma oscilação de 48 mm a -48 mm sem uma estabilização do controle, e não houve estabilização da distância com erro médio de 2,96 mm para esquerda e desvio padrão de 16,62mm e variância de 276,45 mm.

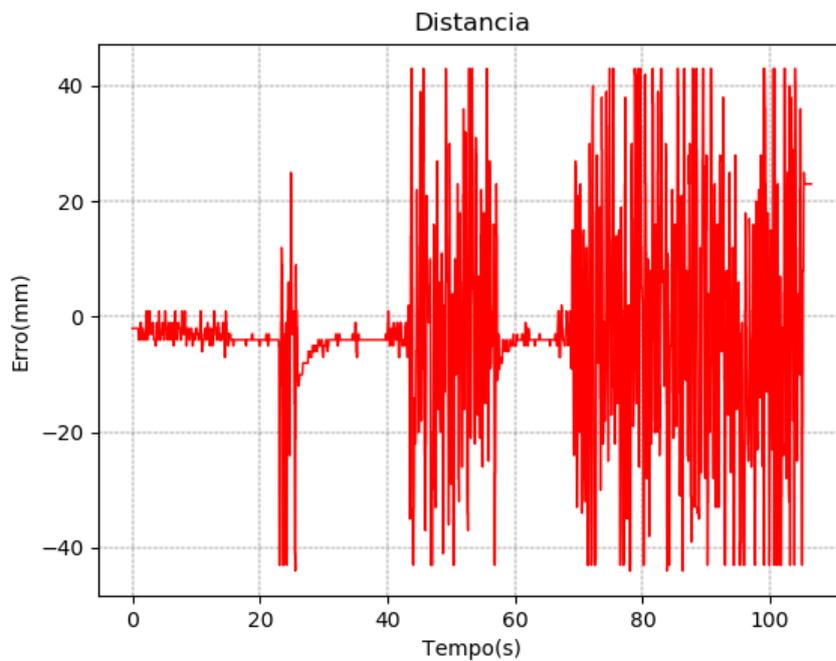


Figura 5.63 Distância Fuzzy Quadrado Sem Carga Dinâmico.

A Figura 5.85 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo

veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

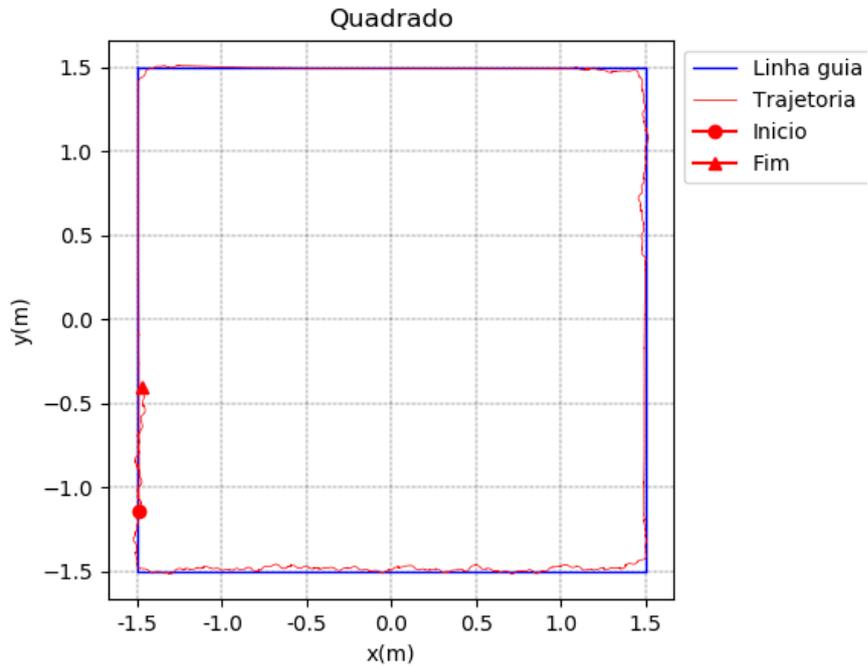


Figura 5.64 Posição *Fuzzy* Quadrado Sem Carga Dinâmico.

Apresentou uma velocidade angular média de 7,09 graus/s, com uma variância de 34433,3graus/s e um desvio padrão 185,56graus/s.

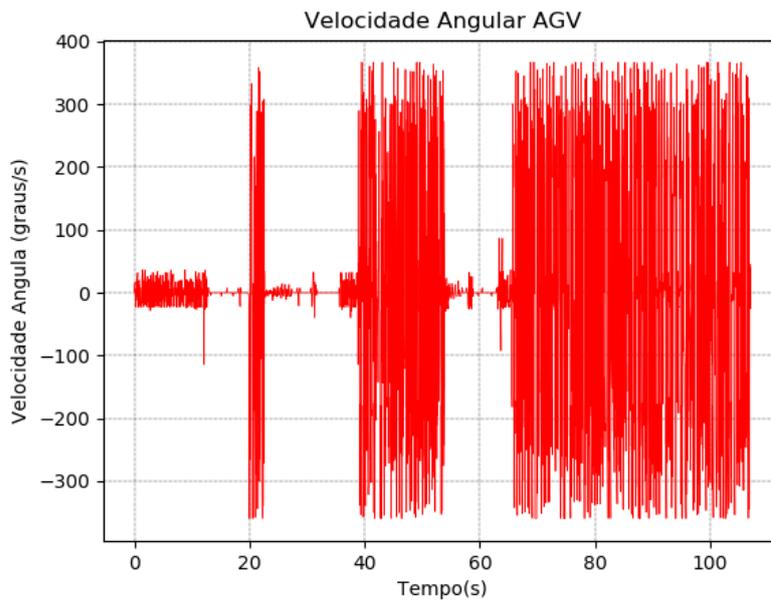


Figura 5.65 Velocidade Angular do AGV *Fuzzy* Quadrado Sem Carga Dinâmico.

- Fuzzy infinito sem carga:

A Pista do infinito apresenta uma média angular de $-0,41^\circ$, variância de $26,38^\circ$ e desvio padrão de $5,13^\circ$ conforme visto na Figura 5.87.

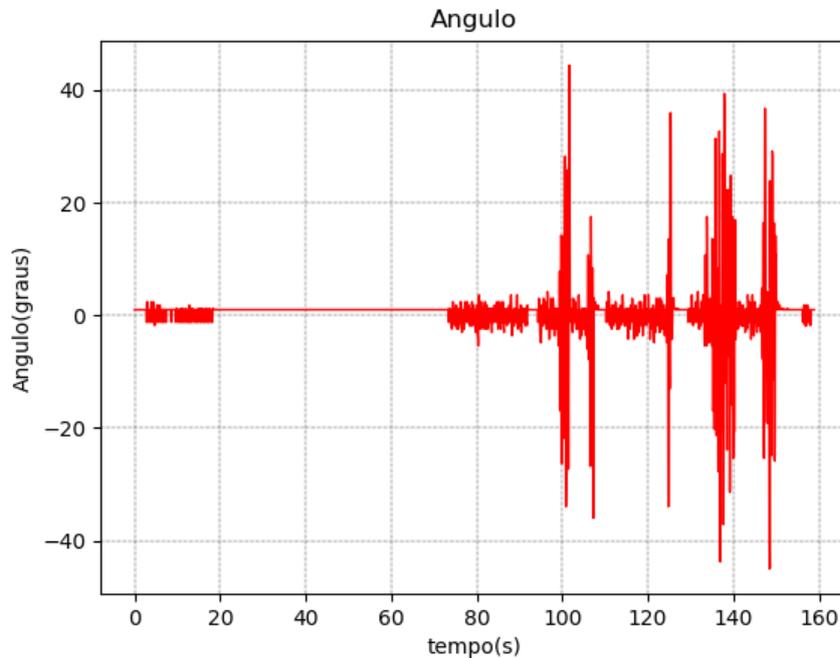


Figura 5.66 Ângulo *Fuzzy* Infinito Sem Carga Dinâmico.

A velocidade angular do AGV, apresenta uma oscilação da velocidade angular de graus/s, com uma oscilação de 360 graus/s a -350graus/s após perde a estabilização. Apresentou uma velocidade angular média de 2,05 graus/s, com uma variância de 4987,23 graus/s e um desvio padrão 70,62 graus/s.

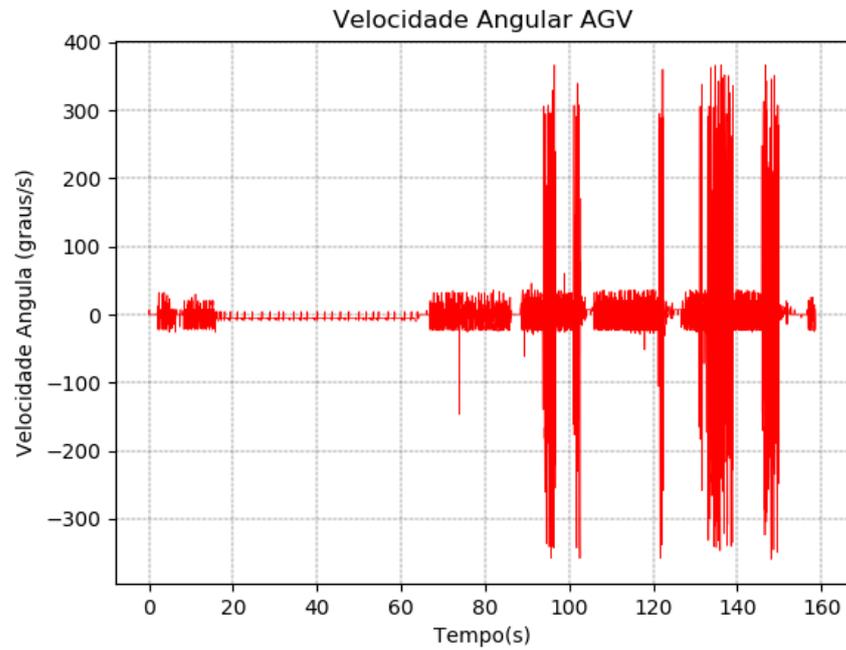


Figura 5.67 Velocidade Angular do AGV Fuzzy Infinito Sem Carga Dinâmico.

A resposta do controle Fuzzy que levou em consideração o ângulo do veículo e a distância do centro do veículo à linha, como visto na A Figura 5.108, também apresenta oscilação com valores entre -48 a 48. Aparentou um desvio padrão de 10,51, com uma variância de 110,48 com média -0,2, como visto na A Figura 5.89.

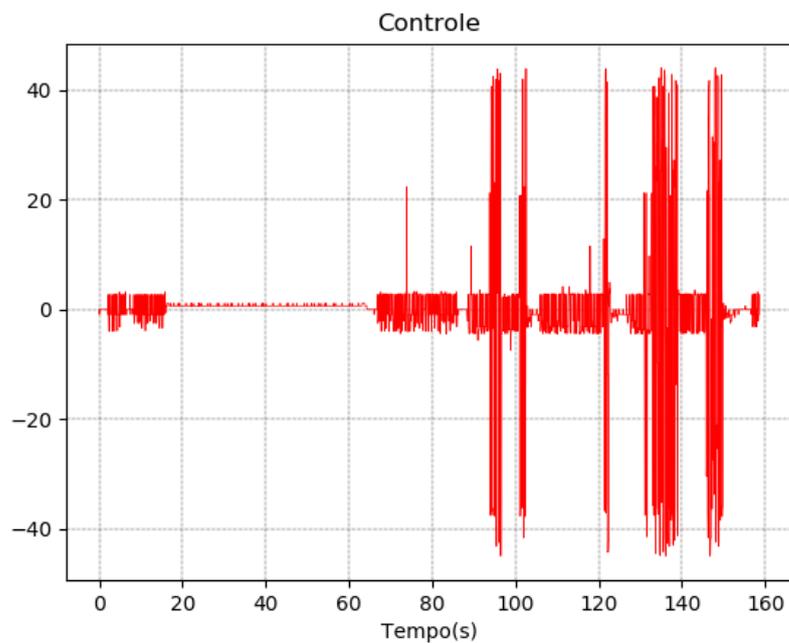


Figura 5.68 Controle Fuzzy Infinito Sem Carga Dinâmico.

A distância do veículo em relação à linha teve uma oscilação de 48 mm a -48 sem uma estabilização do controle, e não houve estabilização da distância com erro médio de 3,03 mm para esquerda e desvio padrão de 5,35 mm e variância de 28,64 mm.

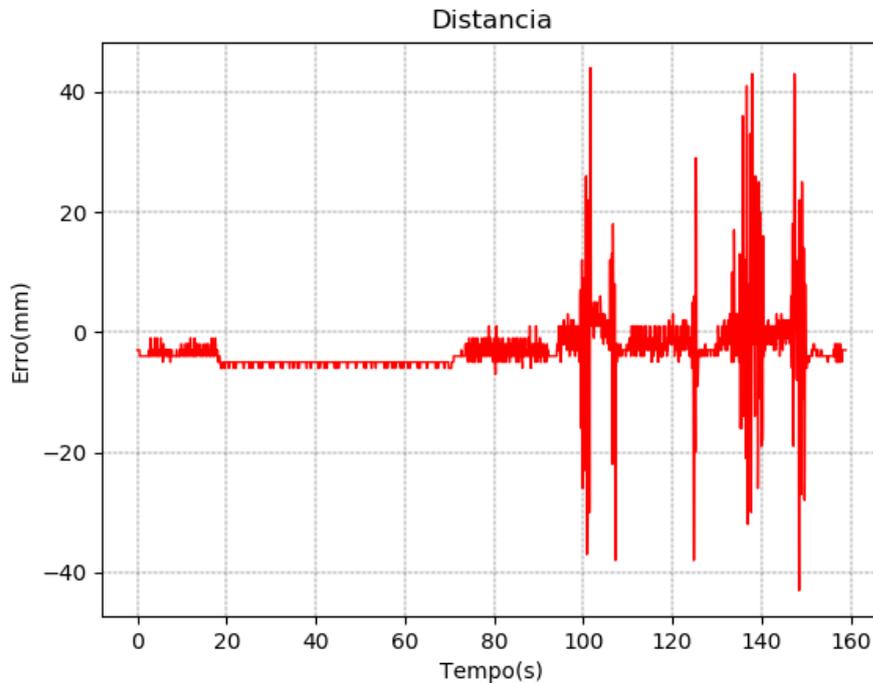


Figura 5.69 Distância *Fuzzy* Infinito Sem Carga Dinâmico.

A Figura 5.91 nos apresenta o comportamento da posição do centro do veículo em relação à linha da trajetória representada pela linha azul e a vermelha pelo trajeto realizado pelo veículo onde o início é representado pelo ponto vermelho e o fim de sua trajetória pelo triângulo vermelho.

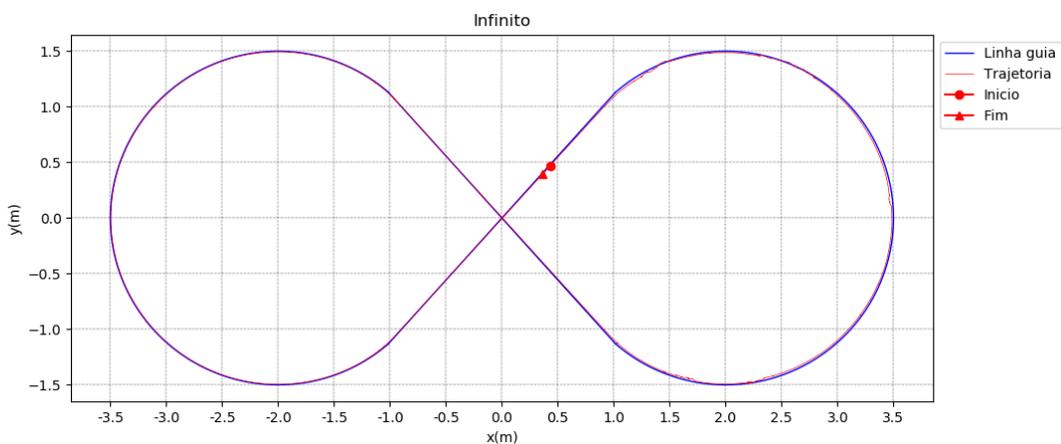


Figura 5.70 Posição *Fuzzy* Infinito Sem Carga Dinâmico.

- Experimento que falharam no seguimento da linha

Os experimentos do *fuzzy* na pista infinito, círculo e quadrado com 1kg e 5kg, PID Infinito com 5kg, Fuzzy não foram capazes de seguir a linha de referência da trajetória, conforme exemplo da Figura 5.104.

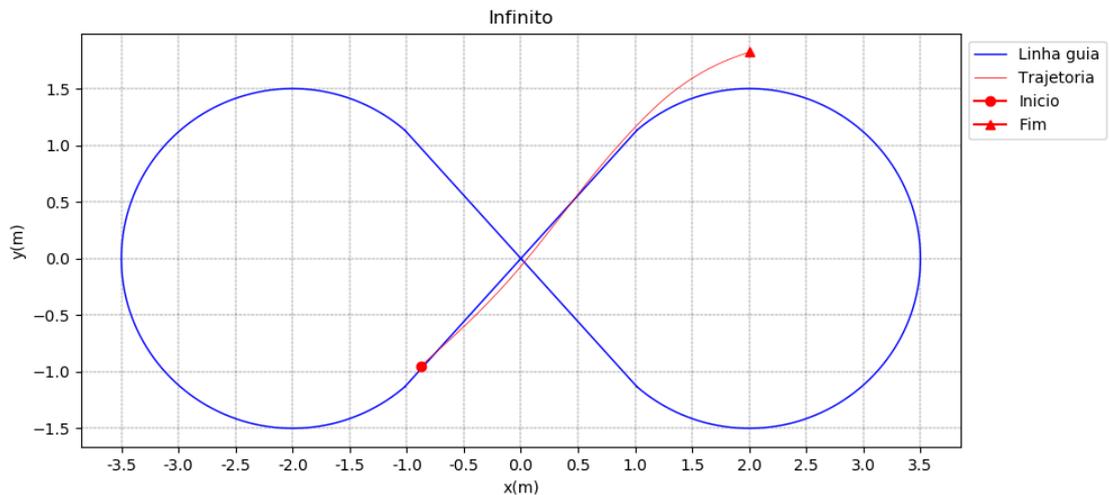


Figura 5.71 Exemplo de perda da trajetória pelo AGV

Em geral, esses experimentos não conseguiram aumentar a taxa de velocidade angular do veículo devido à influência da massa.

5.7.3 Análise dos resultados

O comportamento do modelo cinemático se manteve próximo aos das pistas do modelo dinâmico sem carga, exceto pelo controle *fuzzy*, que apresentou um bom desempenho apenas no modelo cinemático, apesar de ser capaz de seguir a linha do trajeto no modelo com a dinâmica se mostrou instável na maior parte do experimento.

Porém, ao adicionar a carga ao modelo dinâmico, verificou-se que nenhum dos controles sintonizados através do modelo cinemático foi capaz de manter o veículo na linha entrando o foco do trabalho não é apresentar uma sintonia fina dos controle que é evidente que poderia ser melhorado porem para o propósito da verificação da hipóteses a sintonia foi suficiente para a sua validação.

Foi verificado que por não terem sido impostos limites de tensão de entrada solicitada pelos controladores nos experimentos em que o controle estava instável, apresentou pico de valores na velocidade angular do veículo, embora isso não atrapalhe o experimento devido à baixa taxa de captura da câmera.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

Conforme esperado pela hipótese, ao incorporar a dinâmica, mesmo com a representação através da dinâmica dos motores, já se mostrou relevante ao ponto de descartar o controle sintonizados no modelo cinemático.

A estratégia se mostrou menos custosa em termos de processamento, respeitando os tempos de velocidade angular de ordem de microssegundo, entretanto, foi realizada uma discretização dos dados para a execução da simulação. Logo, para uma representação mais próxima do modelo do motor, é necessário um maior poder computacional.

Embora não tenha sido realizada uma comparação com o veículo real, o experimento serviu para descartar a hipótese do trabalho com simuladores cinemáticos no laboratório, uma vez que os robôs utilizados nas pesquisas têm grande variação de carga sobre seu chassi.

O presente trabalho ainda permitiu mensurar a distância de uma simulação puramente cinemática em comparação a simulação com dinâmica presente no modelo com variação de carga.

6.1 Trabalhos futuros

Uma abordagem que não será avaliada, mas apresenta uma necessidade de investigação após levantamento do referencial teórico, é o estudo da distribuição de carga no comportamento dinâmico do AGV na simulação.

Outras abordagens que são lacunas e complementares a esse trabalho são:

- Utilizar o wheelcollider do UNITY para representar as rodas do AGV, por apresentar um sistema de suspensão (mola e amortecedor) e por ser um único componente a ser utilizado na construção do modelo.

- Realizar sintonia do controle *Fuzzy* e PID por simulação usando aprendizado de máquina, uma vez que, a estratégia permite controlar a velocidade do experimento, múltiplos testes e manipulação automatizada dos cenários, permitindo explorar uma gama de valores possíveis para o controle.
- Realizar um estudo da influência da taxa de captura na instabilidade do controle *Fuzzy* e PID.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, I. A. ARSTUDIO 2.0: um sistema de estúdio virtual para geração de conteúdo midiático baseado no motor de jogos Unity3D. **Dissertação de mestrado**, 2017.
- ANGEL, L; HERNANDEZ C, DIAZ-QUINTERO C Modeling, simulation and control of a differential steering type mobile robot. **Chinese Control Conf CCC** 8757–8762, 2013.
- ARCHILA, J. F.; BECKER, M. Mathematical models and design of an AGV (Automated Guided Vehicle). In: **IEEE Conference on industrial Electronics and Applications(ICIEA)**. Melbourne, Australia. 2013.
- ARGOS, ARGoS Architecture.< <http://www.argos-sim.info/concepts.php> >, data de acesso: 22 out. 2017.
- BISHOP, L.; EBERLY, D.; WHITTED, T.; et al. Designing a PC game engine. **IEEE Comput Graph**, 1998.
- BOSTELMAN, R; HONG, T; CHEOK, G. Navigation Performance Evaluation for Automatic Guided Vehicles. In: **7th Annual IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)**. 2015.
- BOYCE, W.E.; DIPRIMA, R. C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Contorno** (7ª edição). LTC Editora. Rio de Janeiro, 2002.
- CORDEIRO, A.; OLIVEIRA, G.; RENTERÍA, J.; GUIMARÃES, C. Revisão Sistemática : Uma Revisão Narrativa **Systematic Review** 428–431 2007.
- D’ANDREA-NOVEL, B.; Bastin, G.; Campion, G. Modelling and control of non-holonomic wheeled mobile robots. **IEEE Int. Conf. Robot. Autom.** 1991, 1130–1135, doi:10.1109/ROBOT.1991.131747.
- DE AZEVEDO, H. R.; BRANODAO, S. F. M.; DA MOTA ALVES, J. B. A fuzzy logic controller for DC motor position control. Proc. **IEEE 2nd Int. Work. Emerg. Technol. Fact. Autom.** (ETFA ’93) 1993, 00, 18–27, doi:10.1109/ETFA.1993.396433.
- DIANYONG, Y.; HUI, X. Application of fuzzy control method to AGV. **Robot Intell Syst Signal Process Proceedings IEEE**, 2003.
- DINIZ, MARCO TÚLIO MENDONÇA. Contribuições ao ensino do método hipotético-dedutivo a estudantes de Geografia. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 19, n. 2, p. 107-111, 2015.

ECHEVERRIA, G.; LASSABE, N.; DEGROOTE, A.; LEMAIGNAN, S. Modular open robots simulation engine: MORSE. Proc. - **IEEE Int. Conf. Robot. Autom.** 2011, 46–51, doi:10.1109/ICRA.2011.5980252.

EL YOUSSEF, E. S., Controle por modo deslizante de robôs móveis sobre rodas. **Tese de Doutorado**. Florianópolis, 2013.

FUKAO, T.; NAKAGAWA, H.; ADACHI, N. Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot. **IEEE Trans. Robot. Autom.** 2000, 16, 609–615, doi:10.1109/70.880812.

GAZEBO, **Gazebo Architecture**. Disponível em: <<http://gazebosim.org/tutorials?tut=architecture>>, data de acesso: 22 out. 2017.

GOMES, M. V.; BÁSSORA, L. A.; MORANDIN, O.; VIVALDINI, K. C. T. PID Control applied on a line-follower AGV using a RGB camera. **IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems**, 2016.

GÓMEZ, A. E.; GLASER, S.; ALAYLI, Y.; NETO, A. D. M.; WOLF, D. F. Cooperative collision warning for driving assistance. **IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC 2016**, 990–997, doi:10.1109/ITSC.2016.7795676.

GOMIDE, FERNANDO ANTONIO CAMPOS; GUDWIN, RICARDO RIBEIRO. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA Controle & Automação**, v. 4, n. 3, p. 97-115, 1994.

GONÇALVES, J.C.; COSTA, D. Modelação e Simulação Realista de sistemas no domínio da robótica móvel, **Tese de Doutorado**, 2009.

GREEF, F. A KUKA youBot simulation in USARSim Informatica — Universiteit van Amsterdam, **Tese de Doutorado**, 2015.

GREGORY, Jason. **Game engine architecture**. 2nd Edition, crc Press, 2009.

HATAB, A. A.; DHAOUADI, R. Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A unified framework. **Advances in Robotics & Automation**, v. 2, n. 2, p. 1-7, 2013.

HOHL L, TELLEZ R, MICHEL O, IJSPEERT AJ Aibo and Webots: Simulation, wireless remote control and controller transfer. **Rob Auton Syst** 54:472–485. doi: 10.1016/j.robot.2006.02.006 , 2006.

- HWANG, C.-L. Comparison of path tracking control of a car-like mobile robot with and without motor dynamics. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 21, n. 4, p. 1801-1811, 2016.
- IVALDI, S; PADOIS, V; NORI, F. Tools for dynamics simulation of robots: a survey based on user feedback. **arXiv preprint** arXiv:1402.7050, 2014.
- KITCHENHAM, B. A. Procedures for Performing Systematic reviews. In: **Joint Technical Report Software Engineering Group**, Keele University, United Kingdom and Empirical Software Engineering, v. 33, n. 2004, p. 1-26, 2004.
- KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications**. Prentice Hall, 574 p, 1995.
- KODAGODA, K.; WIJESOMA, W.; TEOH, E. Fuzzy speed and steering control of an AGV. **IEEE Trans Control Syst Technol**, 2002.
- KOTHANDARAMAN, K. Motion Planning And Control Of Differential Drive Mobile Robot, **Tese de Doutorado**, 2016.
- KUMAR, T.; MIJA, S. Dynamic SMC control scheme with adaptively tuned PID controller for speed control of DC motor. **Proc IEEE Int Conf Ind Technol**, junho, 2015.
- LI, X.; LOU, C.; XU, Y.; LU, P. A Fuzzy PID Controller applied in AGV control System. **International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics**, 2016.
- MAC, T.T.; COPOT, C.; KEYSER, R.; TRAN, T. D.; VU, T. MIMO Fuzzy Control for Autonomous Mobile Robot. **Journal of Automation and Control Engineering**, v . 4 ,n. 1, 2016.
- MARCONI, M. d. A, LAKATOS. **Metodologia do trabalho científico: procedimentos básicos, pesquisa bibliográfica, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos**. (7a ed.) São Paulo: Atlas. 2008
- MICHEL, O. “Webots TM : Professional Mobile Robot Simulation.” **Int J Adv Robot Syst** 1:39–42. doi: 10.1.1.86.1278, 2004.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- OMRANE, H.; MASMOUDI, M. S.; MASMOUDI, M. Fuzzy logic based control for autonomous mobile robot navigation. **Computational intelligence and neuroscience**, 2016.

PAI, M.; MCCULLOCH, M.; GORMAN, J. D.; PAI, N.; ENANORIA, W.; KENNEDY, G.; THARYAN, P.; COLFORD, J. M. Systematic reviews and meta-analyses: An illustrated, step-by-step guide. **The National Medical Journal of India**, v. 17, 2004.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **Introduction to fuzzy sets: analysis and design**. MIT Press, 1988.

PINCIROLI, C.; TRIANNI, V.; O'GRADY, R.; et al. ARGoS: A modular, parallel, multi-engine simulator for multi-robot systems. **Swarm Intell** 2012.

PIRES, F.; SANTOS, W.; ANDRADE, K.; et al. Robotic Platform for Telerehabilitation studies based on unity game engine. SeGAH 2014 - **IEEE 3rd Int Conf Serious Games Appl Heal Books** 2014.

POPPER, K.R. **Conhecimento Objetivo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1975

RENAWI, A.; JARADAT, MA.; ABDEL-HAFEZ, M. ROS Validation for Non-holonomic Differential Robot Modeling and Control, 7th **International Conference on. IEEE**, 2017.

RESENDE, C.; ESPINOSA, F.; BRAVO, I.; BASTOS-FILHO, T. **Mobile Robots**. 2011.

RODRIGUES, F. Análise De Desempenho De Trajetória De Agv Seguidor De Linha Usando Controle Fuzzy Adaptativo, **Dissertação de Mestrado**, Dissertação, 2017

ROHMER E, SINGH SPN, FREESE M. V-REP: a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework. **Proc Int Conf Intell Robot Syst** 0-5, 2013k
SAKIR, R.; RUSDINAR, A.; YUWONO, S. et al. Movement control algorithm of weighted automated guided vehicle using fuzzy inference system. 2017 2nd **Int Conf Control Robot Eng** 2017.

SCIAVICCO, L.; VILLANI, L.; ORIOLO, G.; SICILIANO, B. **Robotics: modelling, planning and control** [S. l.]: Springer London, 2009.

SHARMA, A. Control of Mobile Robot for Trajectory Tracking by Sliding Mode Control Technique , p. 3988-3994. **International Conference on. IEEE**, 2016.

SILVA, R. G. N.; ALMIR, K. Indoor surveillance robotic system using an autonomous mobile robot. CHILECON 2015 - 2015 IEEE Chil. **Conf. Electr. Electron. Eng. Inf. Commun. Technol. Proc. IEEE Chilecon** 2015 2016, 829–833, doi:10.1109/Chilecon.2015.7404668.

TANG F, WEI Y, ZHOU X, ET AL. Research on Vehicle Dynamics Simulation for Driving Simulator. 310:1946–1950. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.308-310.1946, **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications, 2011. p. 1946-1950.

ULLRICH, GÜNTER. **Automated Guided Vehicle Systems**; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015;

VIS. I. F. A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. **European Journal of Operation Research**. v.170, n. 3, p. 677-709, 2006.

V-REP, **Robot simulator V-REP**, <<http://www.coppeliarobotics.com/>>, data de acesso: 23 out. 2017.

WEBOT, **Robot Simulation**, Disponível em: <<https://www.cyberbotics.com/>> data de acesso: 22 out. 2017.

XU, Q.; KAN, J.; CHEN,S.; YAN, S.; Fuzzy PID Based Trajectory Tracking Control of Mobile Robot and Simulation in Simulink. **International Journal of Control and Automation**, v.7, n. 8, p. 233-244, 2014.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**. v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965

Ziegler, J. G.; Nichols, N. B. Optimum settings for automatic controllers. trans. **ASME** 1942, v. 64, , 94–100, doi:10.1115/1.2899060.

ZYDA, Michael. From visual simulation to virtual reality to games. **Computer**, v. 38, n. 9, p. 25-32, 2005.