

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TRAJETÓRIA DE
AGV SEGUIDOR DE LINHA USANDO CONTROLE
FUZZY ADAPTATIVO**

FLAVIO ANTONIO RODRIGUES JUNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. ORIDES MORANDIN JUNIOR

São Carlos - SP

Agosto/2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TRAJETÓRIA DE
AGV SEGUIDOR DE LINHA USANDO CONTROLE
FUZZY ADAPTATIVO**

FLAVIO ANTONIO RODRIGUES JUNIOR

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

Agosto/2017



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 da candidata Flavio Antonio Rodrigues Junior, realizada em 17/08/2017.

Prof. Dr. Orides Morandin Junior
(UFSCar)

Prof. Dr. Kelen Cristiane Teixeira Vivaldini
(UFSCar)

Profa. Dra. Ricardo Augusto Souza Fernandes
(UFSCar)

Prof. Dr. Danilo Sipoli Sanches
(UTFPR)

Certifico que a sessão de defesa foi realizada com a participação à distância do membro Danilo Sipoli Sanches, depois das arguições e deliberações realizadas, o participante à distância está de acordo com o conteúdo do parecer da comissão examinadora redigido no relatório de defesa do aluno Flavio Antonio Rodrigues Junior.

Prof. Dr. Orides Morandin Junior
Presidente da Comissão Examinadora
(UFSCar)

*Dedico esta conquista a Deus, aos meus pais Flávio e Valéria e ao meu querido irmão
Daniel, sem eles nada seria possível.*

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus primeiramente por estar comigo e me acompanhar em todos os instantes dessa jornada.

Aos meus pais por todo incentivo prestado desde o início e toda a dedicação e apoio para essa conquista.

Agradeço ao meu irmão que sempre esteve pronto a ajudar e apoiando-me nessa brilhante escolha profissional.

A todos os meus familiares e principalmente as minhas avós Cleuza e Terezinha por acreditarem na minha capacidade e por sempre apoiar da melhor forma possível.

Ao meu orientador, professor Dr. Orides sempre apoiando e me direcionando neste trabalho para o caminho correto em buscar da ciência e formação profissional.

Aos meus amigos de laboratório: Malcoln que contribuiu muito para a finalização desta conquista, Diogo, grande amigo que consegui e que segue esse caminho e área de pesquisa enriquecedora, Marcela, Igor.

Ao Paulo companheiro de luta acadêmica desde o início, grande amigo/irmão conterrâneo que só conheci em São Carlos, mas que levo para a vida.

A todos os meus amigos do mestrado Lucas, Alex, galera do “apê”, João Paulo, Renato, galera da “rap” e entre outros amigos que sempre estiveram juntos nessa caminhada, acreditando na idealização desse trabalho. A eles: “Meu obrigado e vos digo: meu carrinho funcionou!!”

Aos professores do Departamento de Computação.

Por fim a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente com a conclusão do mestrado.

“Eu sou mais rápido que você. Sou mais forte que você.

E, com certeza, vou durar muito mais que você.

Você pode pensar que eu sou o futuro, mas está errado.

Você é o futuro!

Se eu pudesse desejar alguma coisa, desejaria ser humano.

Para saber o que significa ter sentimentos,
ter esperanças, ter angústias, dúvidas... amar.

Eu posso alcançar a imortalidade, basta não me desgastar.

Você também pode alcançar a imortalidade.

Basta fazer apenas uma coisa notável.”

Androide da propaganda de Johnnie Walker, 2006

RESUMO

A dinâmica de movimentação de veículos autônomos, AGVs (*Automated Guided Vehicle*), está associado ao seu sistema de controle, onde a adoção de técnicas de controle tradicionais, cujos parâmetros e sintonias são realizados baseados nas constantes de ganhos lineares desses sistemas, podem apresentar desempenhos satisfatórios em momentos de linearidades. Entretanto, quando considerados momentos, onde o fenômeno de movimentação dinâmica se faz presente, esses sistemas de controle com características lineares são insuficientes. Diante disso, surge a necessidade de adoção de sistemas de controle capaz de adaptar-se frente a essas variações de condições de operação. O objeto de estudo desta pesquisa é um AGV seguidor de linha com tração diferencial, com seu sistema de controle *fuzzy* adaptativo que tem por objetivo reduzir o erro entre: a posição e orientação que se deseja que o AGV esteja e a sua posição e orientação reais, buscando resultados de acurácia e precisão do veículo no seguimento de trajetória, tendo como variáveis mensuradas a orientação e a distância do centro geométrico do sensor do veículo, que neste estudo é composto por uma câmera, em relação ao referencial de trajetória e uma linha demarcada no chão. A técnica de controle *fuzzy* adaptativo é aplicada ao fenômeno de movimentação do veículo, buscando mapear esse fenômeno intuitivamente através de categorização linguística. Como método de comparação é aplicada a técnica de controle clássica PID (Proporcional, Integral, Derivativo), buscando validar o sistema de controle *fuzzy* adaptativo, em cenários de testes, com variações de pista a ser percorridas pelo veículo e variações de carga transportadas. Foi possível verificar que quando a variável de orientação do veículo em relação a linha é controlada, o veículo alcança estabilidade e mantém seus erros próximos ao valor de referência do sistema, entretanto no sistema de controle PID as variações de orientação são visíveis durante o seguimento de trajetória e através de análises sobre perspectivas gráfica, mostrando que o sistema de controle PID não é adaptável frente as variações de cargas e pista, evidenciando que a aplicação de modelos lineares a esses objeto de estudo não é viável. Outro ponto de viabilidade de aplicação do sistema de controle *fuzzy* adaptativo dentro do objeto de estudo é quanto à sintonia de seus parâmetros, que uma vez ajustados foram sensíveis à variação de carga e pista conseguindo manter faixas de erros até 80% menores em relação ao controle PID, validando assim a pesquisa e demonstrando a aplicabilidade de sistemas de controle *fuzzy* adaptativo dentro do domínio de problema.

Palavras-chave: AGV, dinâmica, desempenho, sistemas de controle, controle *fuzzy* adaptativo, PID, acurácia, precisão.

ABSTRACT

Dynamics of automatic vehicle movement (Automatic Guided Vehicle), its associated with your control system, and the adoption of traditional control techniques, whose parameter and tuning are performed based on linear gains constants of this systems, may presents satisfactory performance and results in linear moments. However, when considered moments, phenomenon of dynamic movement is present, control systems with linear characteristics are insufficient. With these problems, its necessary adoption of control systems able to adapt to these parameter variations. The object of study in this research is a AGV follow line with differential traction, using adaptive fuzzy control systems, whose aim to reduce errors in trajectory tracking, looking for results of accuracy and precision of the vehicle in the follow of trajectory. The adaptive fuzzy control technique applied to the phenomenon of vehicle movement, mapping it intuitively through linguistic variables. As a method of comparison, is applied classic control technique PID, and used to validation adaptive fuzzy control technique with comparison of results on test scenarios, with different roads proposed to vehicle associated with weight variation. It was possible to verify that the control results when applied to control orientation of AGV, vehicle achieves stability and keeps its errors close to the reference systems value, however in the PID control system the orientation errors are visible during the trajectory tracking and through graphical perspective analysis, showing that the PID control system is not adaptable to weight and track variations. Another point of feasibility of applying the adaptive fuzzy control system, within the application is the tuning of its parameters, which once adjusted were sensitive to the variation of load and trajectories managing to maintain rates of errors up to 80% smaller them to the PID control, validating the research and demonstrating the applicability of adaptive fuzzy control systems within the problem domain.

Keywords: AGV, dynamics, control performance, control system, adaptive fuzzy control, PID control, position, orientation, accuracy, precision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistema holonômico e graus de liberdade mensuráveis.	19
Figura 1.2 - Sistema não holonômico e restrições de movimentação.	20
Figura 1.3 - AGV no espaço cartesiano.....	20
Figura 1.4 - Representação de estabilização em um ponto.....	21
Figura 1.5 – Rastreamento de trajetória: associando leis temporais e trajetórias percorridas	22
Figura 1.6 - Categorização do problema de seguimento de trajetória.	22
Figura 1.7 - Diagrama de blocos do sistema de controle <i>fuzzy</i> adaptativo.....	23
Figura 1.8 - Diagrama de blocos do sistema de controle X.....	24
Figura 1.9 - Inserção do Projeto.	28
Figura 2.1 - Função Triangular	36
Figura 2.2 - Função Trapezoidal.	37
Figura 2.3 - Conjunto <i>fuzzy A</i>	37
Figura 2.4 - Conjunto <i>fuzzy B</i>	37
Figura 2.5 - Operação de união graficamente representada.	38
Figura 2.6 - Operação de interseção.	38
Figura 2.7 - Operação de complemento.....	38
Figura 2.8 - Agregação da regra 1 utilizando operador de min.	42
Figura 2.9 - Agregação da regra 2 utilizando operador de <i>min</i>	42
Figura 2.10 - Composição das regras 1 e 2 utilizando operador <i>max</i>	42
Figura 2.11 - Representação do sistema <i>fuzzy</i> Mamdani.....	43
Figura 2.12 - Método de conversão <i>fuzzy</i> -escalar centroide.....	45
Figura 2.13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle PID aplicado em um processo.	46
Figura 2.14 - Configuração do AGV no espaço.	48
Figura 2.15 - Configuração cinemática do AGV.....	51
Figura 2.16 - Representação de um motor DC (Adaptado de :EL YOUSSEF, 2013). 52	
Figura 2.17 - Diagrama de Blocos do Motor DC.	54
Figura 3.1 - Localização do problema dentro da área de sistemas não-holonômicos. 57	
Figura 4.1 - Diagrama de blocos do sistema de controle.....	63

Figura 4.2 – Momento de captura da câmera e obtenção da informação de distância e orientação.....	65
Figura 4.3 – Imagem capturada pela câmera.....	65
Figura 4.4 - Imagem após etapas de pré-processamento e eliminação de ruídos.....	65
Figura 4.5 – Distância dos pontos ao centro.....	66
Figura 4.6 –Ângulos entre os segmentos de retas e uma linha imaginária vertical.....	66
Figura 4.7 – Descrição do sistema de controle fuzzy adaptativo proposto	67
Figura 4.8 – Mapeamento das variáveis linguísticas para a distância.	69
Figura 4.9 – Mapeamento das variáveis linguísticas para a orientação.....	69
Figura 4.10 – Definição intuitiva de regras para correção de erros de posição e orientação do AGV sobre a linha.....	70
Figura 4.11 – Estrutura de Entradas e Saídas do sistema de controle <i>fuzzy</i> adaptativo.	71
Figura 4.12 – Conjunto de variáveis linguísticas referentes a distância e orientação. .	71
Figura 4.13 – Conjunto de variáveis linguísticas referentes a velocidades impostas às rodas.....	72
Figura 5.1 – Objeto de estudo: AGV seguidor de linha com tração diferencial.....	75
Figura 5.2 – AGV com as cargas de transporte.....	76
Figura 5.3 – Pista 01 à ser percorrida em linha reta.	76
Figura 5.4 – Pista 02 à ser percorrida com movimentos curvilíneos a esquerda, a direita e em retas.	76
Figura 5.5 – Posicionamento da linha no centro da câmera e área análise de erros....	79
Figura 5.6 –Erros de orientação do AGV na pista 01 para a variação de carga 01.	80
Figura 5.7 – Erros de orientação do AGV na pista 01 para a variação de carga 02.	80
Figura 5.8 – Erros de orientação do AGV na pista 01 para a variação de carga 03.	80
Figura 5.9 – Erros de distância do AGV na pista 01 para a variação de carga 01.	82
Figura 5.10 – Erros de distância do AGV na pista 01 para a variação de carga 02.	82
Figura 5.11 – Erros de distância do AGV na pista 01 para a variação de carga 03.	82
Figura 5.12 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.	84
Figura 5.13 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.	84
Figura 5.14 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.	84
Figura 5.15 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01. .	85
Figura 5.16 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 02. .	86
Figura 5.17 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 03. .	86

Figura 5.18 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 01. .87	.87
Figura 5.19 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 02. .88	.88
Figura 5.20 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 03. .88	.88
Figura 5.21 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.89	.89
Figura 5.22 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.	89
Figura 5.23 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 03.90	.90
Figura 5.24 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01. .91	.91
Figura 5.25 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01. .91	.91
Figura 5.26 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 03. .91	.91
Figura 5.27 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.92	.92
Figura 5.28 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.92	.92
Figura 5.29 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.92	.92
Figura 5.30 – Sistema SIMO de controle para a orientação do veículo em relação a linha.	95
Figura 5.31 – Orientação - variável de entrada do sistema <i>fuzzy</i>	96
Figura 5.32 – Velocidade de rotação das rodas.	96
Figura 5.33 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.97	.97
Figura 5.34 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.98	.98
Figura 5.35 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 03.98	.98
Figura 5.36 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 01. .99	.99
Figura 5.37 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 02. .99	.99
Figura 5.38 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 03. .99	.99
Figura 5.39 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.	100
Figura 5.40 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.	101
Figura 5.41 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.	101
Figura 5.42 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.102	.102
Figura 5.43 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.102	.102
Figura 5.44 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.102	.102
Figura 5.45 – Sistema SIMO de controle para a Distância do veículo em relação a linha.	103

Figura 5.46 –Distância - variável de entrada do sistema <i>fuzzy</i>	104
Figura 5.47 – Velocidade de rotação das rodas.	104
Figura 5.48 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.	105
Figura 5.49 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.	106
Figura 5.50 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 03.	106
Figura 5.51 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.	107
Figura 5.52 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.	107
Figura 5.53 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 03	107
Figura 5.54 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.	108
Figura 5.55 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.	108
Figura 5.56 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.	109
Figura 5.57 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.	109
Figura 5.58 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.	110
Figura 5.59 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Variáveis linguísticas: granularidade da base, siglas e descrições.....	68
Tabela 4.2 Tabela de Regras de Inferência.....	70
Tabela 5.1 Cenário de Testes 01 – Controle PID.....	77
Tabela 5.2 Cenário de Testes 02 – Controle Fuzzy Adaptativo.....	77
Tabela 5.3 Descrição das constantes do controle PID, pista 01.....	79
Tabela 5.4 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.....	83
Tabela 5.5 Descrição das constantes do controle PID, pista 02.....	83
Tabela 5.6 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 02, cargas 01,02 e 03.....	86
Tabela 5.7 Descrição das constantes do controle PID, pista 01.....	88
Tabela 5.8 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.....	90
Tabela 5.9 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação PISTA 02, CARGAS 01,02 e 03.....	93
Tabela 5.10 Regras de Inferência do sistema fuzzy.....	97
Tabela 5.11 Quantificação dos dados do cenário de teste 02 – Orientação PISTA 01, CARGAS 01,02 e 03.....	100
Tabela 5.12 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.....	103
Tabela 5.13 Regras de Inferência do sistema fuzzy.....	105
Tabela 5.14 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.....	108
Tabela 5.15 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.....	110

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Contextualização.....	18
1.2 Motivação	25
1.3 Justificativa	26
1.4 Objetivos	28
1.5 Delimitações do trabalho	29
1.6 Organização do trabalho	30
CAPÍTULO 2	32
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	32
2.1 Considerações iniciais.....	32
2.2 Conceitos Fundamentais	32
2.3 Conjuntos Fuzzy.....	34
2.3.1 Funções de Pertinência.....	35
2.3.2 Operações com Conjuntos Fuzzy	37
2.4 Variáveis linguísticas	39
2.5 Lógica Fuzzy	39
2.5.1 Proposições Fuzzy.....	39
2.5.2 Inferência.....	40
2.6 Modelagem de Sistemas Fuzzy	43
2.7 Sistemas de Controle PID -Proporcional Integral Derivativo	45
2.8 Sistemas Adaptativos	47
2.9 Modelagem Cinemática do AGV seguidor de linha.....	48
2.10 Dinâmica dos Atuadores	51
2.11 Considerações finais	54
CAPÍTULO 3	55
3 SISTEMA DE CONTROLE PARA AGV.....	55
CAPÍTULO 4	62
4 PROPOSTAS DE TRABALHO	62
4.1 Considerações iniciais.....	62

4.2	<i>Sistema de Controle</i>	62
4.3	<i>Considerações finais</i>	72
CAPÍTULO 5		74
5	IMPLEMENTAÇÃO E TESTES	74
5.1	<i>Considerações Iniciais</i>	74
5.2	<i>Cenários de Teste</i>	74
5.3	<i>Sistema de Controle PID – Proporcional, Integral, Derivativo..</i> Error! Bookmark not defined.	
5.3.1	Cenário de Teste 01 – PID Orientação	78
5.3.2	Cenário de Teste 01 – PID Distância	87
5.4	<i>Análise cenário de teste 01 – Controle PID aplicado aos erros de Orientação e Distância ..</i>	93
5.5	<i>Sistema de Controle Fuzzy Adaptativo</i>	95
5.5.1	Cenário de Teste 02 – Sistema de Controle Fuzzy Adaptativo - Orientação	95
5.5.2	Cenário de Teste 02 – Sistema de Controle Fuzzy Adaptativo – Distância	103
5.6	<i>Análise cenário de Teste 02 - Controle Fuzzy Adaptativo aplicado aos Erros de Orientação e Distância</i>	111
5.7	<i>Comparativo - Controle Fuzzy Adaptativo X Controle PID</i>	112
6	CONCLUSÃO	114
6.1	<i>Trabalhos futuros</i>	116
REFERÊNCIAS		117

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico é notável no aspecto de sistemas robóticos e inteligentes. A resultante desta abordagem é perceptível em aplicações como: robôs humanoides, robôs móveis, veículos autônomos e manipuladores industriais, com destaques na comunidade científica e na sociedade em geral.

Seguindo essas premissas de aplicação, veículos autônomos, tem recebido grande atenção de pesquisadores devido à variedade de problemas a eles associados, concentrando os trabalhos na idealização de técnicas que atuem na sua capacidade de mobilidade e autonomia em determinados ambientes. Como consequência, a resolução desses problemas e uma atuação aceitável desses sistemas, se têm cada vez mais induzido o uso e aplicação por vários tipos de cenários, em especial, o industrial.

A integração da robótica em ambientes industriais tem caracterizado um fator fundamental para o desenvolvimento deste setor. Um caso específico de veículos autônomos e também caracterizados como robôs industriais é o AGV (*Automated Guided Vehicle*). Este tipo de veículo, com conceitos de sua usabilidade inseridos em 1955 (MÜLLER, 1983), caracteriza-se como um sistema de transporte autônomo, usado para movimento horizontal de materiais (VIS, 2006).

Do ponto de vista mecânico, o AGV, normalmente é composto de um corpo rígido, associado ao seu sistema de locomoção com rodas, onde estas rodas são atuadas por motores, gerando a movimentação (SCIAVICCO et al., 2009) de seguir uma trajetória específica aliada

à suas características de mobilidade, onde essas características de mobilidade correspondem a forma para determinar como o AGV segue a trajetória.

Dentro das características de mobilidade do AGV existem algumas limitações de movimentação ao longo do ambiente, essas limitações são denominadas restrições não holonômicas e são descritas em termos de variáveis de velocidade do veículo. O termo holonômico significa “universal”, “integral”, “integrável” (MORIN e SANSON, 2008). Um sistema dito como holonômico é caracterizado por meio da não restrição de seus graus de liberdade e a possibilidade de controle desses graus. Como exemplo, o sistema de movimentação de um navio, apresentado na Figura 1.1, que possui todos os seus graus de liberdade possíveis de serem mensurados e controlados.

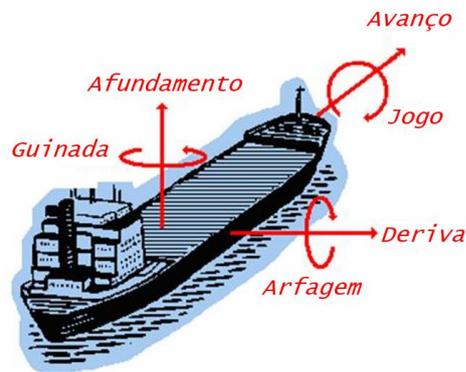


Figura 1.1 - Sistema holonômico e graus de liberdade mensuráveis.

A contradição à característica de holonomia é dita como não holonômica, ou seja, sistemas em que seus graus de liberdade não são possíveis de controle ou possuem restrições, como é o caso de um veículo ao realizar o processo de manobra conhecido como baliza, Figura 1.2. Nesse caso o sistema impõe restrições quanto a forma de estacionar, não sendo possível o veículo mover-se lateralmente, necessitando de manobras para acomodação à vaga. Sendo assim, essas restrições de movimento são ditas não holonômicas e um sistema sujeito a esse tipo de restrição é um sistema não holonômico.

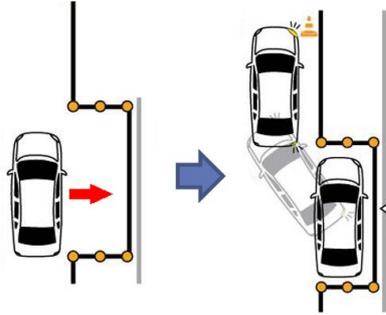


Figura 1.2 - Sistema não holonômico e restrições de movimentação.

Além de suas restrições de não holonomia, o AGV possui características de sistemas não lineares e multivariável, onde na revisão bibliográfica é apresentado que o problema tem sido extensivamente trabalhado, apontando a necessidade de controlar essas características para melhorar o desempenho de movimentação do veículo.

Ademais, essas características de restrições de movimentos acabam implicando na limitação do espaço de atuação e, portanto, podem resultar em subatuação do sistema¹, a depender do número de graus de liberdade.

Neste trabalho o objeto de estudo é um AGV seguidor de linha com tração diferencial², que possui três graus de liberdade descritos pela sua localização e orientação no plano cartesiano³ x , y e θ , e com dois graus de atuação, sendo eles a velocidade linear v e a velocidade rotacional ω , conforme mostrado na Figura 1.3.

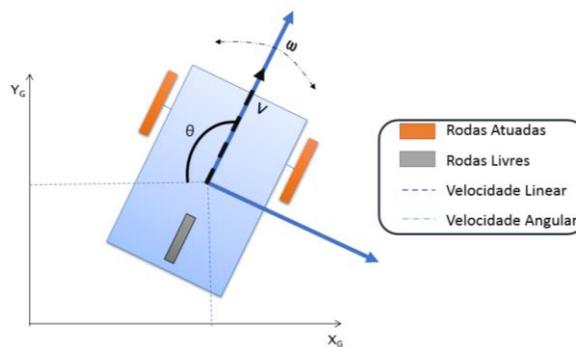


Figura 1.3 - AGV no espaço cartesiano.

¹ Um sistema é dito subatuado se tem menor grau de atuação que grau de liberdade (KOLMANOVSKY e MCCLAMROCH, 1995), (FANTONI e LOZANO, 2002).

² Deste ponto adiante no texto onde se lê “AGV seguidor de linha com tração diferencial” considera-se como sinônimo AGV, e onde se lê faixa considera-se como sinônimo linha quando referindo-se a linha demarcada no piso.

³ Coordenadas de posição do robô.

A característica de mobilidade desses veículos está associada a um sistema de controle, que trabalha frente à objetivos de manter o veículo em uma trajetória, sendo necessário mensurar parâmetros e agir e/ou reagir quando apresentarem erros ou aspectos indesejáveis, como por exemplo desvio de trajetória.

Para a aplicação, o sistema de controle tem por objetivo eliminar o erro entre: a posição e orientação que se deseja que o AGV esteja e a sua posição e orientação reais. Outra característica do sistema de controle é a execução da tarefa de movimentação com um desempenho aceitável, além disso, existem ainda as restrições de cinemática e dinâmica do veículo que tem participação efetiva no sistema de controle para a garantia de respostas satisfatórias. Sendo assim, a autonomia de execução do controlador, somada às restrições de mobilidade do AGV desencadeiam objetivos de estudos, buscando um melhor desempenho do veículo ao seguir sua trajetória.

Segundo Ortigoza et al. (2012), Morion e Samson (2008), Aguiar e Hespanhas (2007) seguindo essa abordagem dentro de AGVs seguidores de linha e a síntese de controladores, os principais problemas abordados por esses sistemas de controle são:

- **Estabilização em um ponto:** traduz-se no fato de atingir uma posição final desejada para o AGV, sendo definida por uma localização e orientação no espaço cartesiano, levando em consideração a configuração inicial do veículo. Independente da trajetória percorrida o objetivo é que o veículo chegue em um determinado ponto o mais preciso e centrado desse ponto, Figura 1.4;

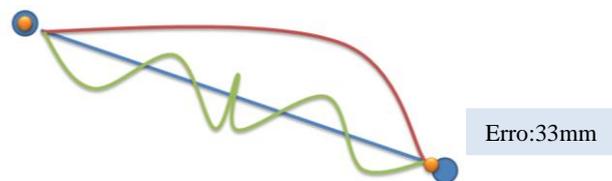


Figura 1.4 - Representação de estabilização em um ponto.

- **Rastreamento de trajetória:** o AGV deve atingir e seguir uma determinada trajetória no espaço cartesiano associado a uma lei temporal. Em síntese, o AGV deve seguir uma trajetória contemplando variáveis como por exemplo: tempo de viagem e distância de um ponto a outro ponto, como exemplificado na Figura 1.5;

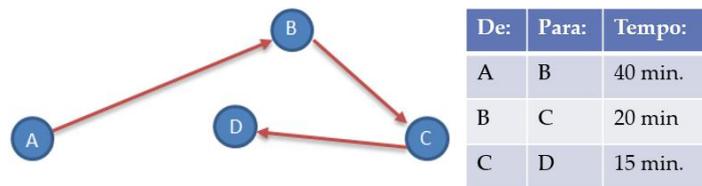


Figura 1.5 – Rastreamento de trajetória: associando leis temporais e trajetórias percorridas

- Seguimento de Trajetória:** o AGV deve seguir a trajetória deslocando-se com uma dada velocidade, respeitando suas restrições de mobilidade. Para este problema é analisado a forma com que o veículo percorre uma trajetória pré-estabelecida (linha demarcada no piso), contemplando a sua acurácia e precisão em manter-se sobre esta demarcação, levando em consideração variáveis como posição e orientação do AGV. A investigação desta pesquisa está pautada sob a análise da forma com que o AGV segue essa trajetória pré-estabelecida e a forma de conservação/permanência sobre esta linha demarcada, Figura 1.6.

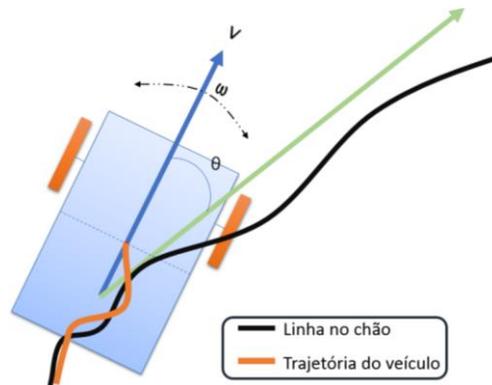


Figura 1.6 - Categorização do problema de seguimento de trajetória.

Alguns trabalhos levam em consideração a adoção de estratégias de controle que consideram apenas os modelos cinemáticos, ou seja, sistemas sem atuação de forças físicas (BORGES, LIMA e DEEP, 2000), (BORGES e LIMA, 2003), (JIANG, MOTAI e ZHU, 2005), (KUNHE e GOMES, 2005), (MAC, *et al.*, 2016), , onde, em suma, consideram o perfeito desempenho de velocidade, ou seja, assume-se que o sistema do veículo responde instantaneamente ao sinal de controle aplicado, sem um transitório. Porém, essas estratégias tornam-se inviáveis quando o sistema de controle não aborda itens que são intrínsecos à dinâmica do veículo, como por exemplo, a massa do próprio AGV e/ou a massa transportada, fazendo com que a confiabilidade do controlador cinemático não seja garantida, diferente de quando levado em consideração a dinâmica (por exemplo: momento de inércia, massas, coeficientes de atrito,

forças contra eletromotriz). Em outros trabalhos é utilizado o modelo dinâmico (PARK *et al.*, 2009), (ZHENGCAI, YINGTAO e QIDI, 2011), (TAHERI-KALANI e KHOSROWJERDI, 2013), buscando contemplar variáveis intrínsecas à dinâmica de movimentação do veículo.

Dentro desse domínio de problema, as soluções para atender as necessidades do sistema de controle são: o estudo das representações matemáticas do comportamento do AGV, bem como o acesso às variáveis de localização e orientação do veículo, associadas às trajetórias que possam ser realizadas, levando em considerações estruturas e/ou elementos dinâmicos, como por exemplo os motores e a massa do veículo, como elementos que compõe a dinâmica e a cinemática geral do AGV.

Somado a esses critérios, o sistema de controle necessita ser sensível ao ponto de adaptar-se frente a incertezas e variações que o afetam, como: a massa do AGV, desgastes do conjunto de atuação(motores, pneus, rodas) e estrutural do veículo, , variações de carga, pois, o fenômeno dinâmico de movimentação levada em consideração quando o veículo está vazio, possui dinâmica de movimentação diferente quando aplicada uma carga no limite de sua capacidade e em valores intermediários. Porém, este trabalho não tem como uma de suas variáveis, a medição de quanto essa carga varia, ou seu valor absoluto, não tendo no sistema como um dos seus parâmetros uma estimativa de peso como uma das variáveis do controle, mas o sistema deve adaptar-se frente a essas incertezas e variações desses parâmetros supracitados, visto que eles possuem correspondência quanto à dinâmica do veículo e sua acurácia quanto ao seguimento de trajetória. Corroborada por essa forma de aplicação, o sistema de controle proposto *fuzzy* em si, caracteriza-se por ser livre do modelo matemático da dinâmica, tornando a aplicação do sistema de controle na forma assertiva do veículo ao seguir sua trajetória pré-estabelecida.

Na Figura 1.7 é apresentado um diagrama de blocos em alto nível apresentando como o sistema de controle desta pesquisa pretende ser aplicado para contribuir com solução do problema de seguimento de trajetória.

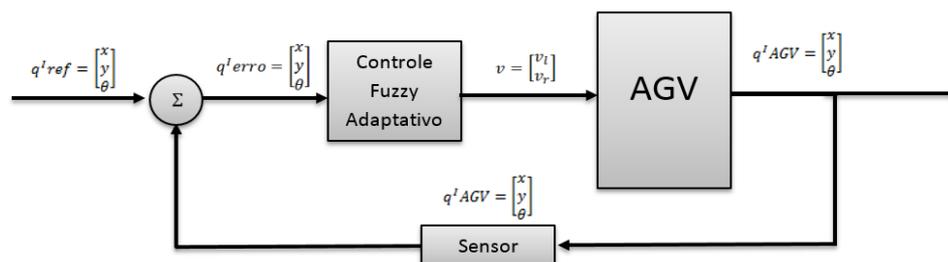


Figura 1.7 - Diagrama de blocos do sistema de controle *fuzzy* adaptativo.

Já a Figura 1.8 apresenta os diagramas de bloco, também em alto nível, com possíveis características e variações mensuradas, como por exemplo, o valor absoluto da carga transportada.

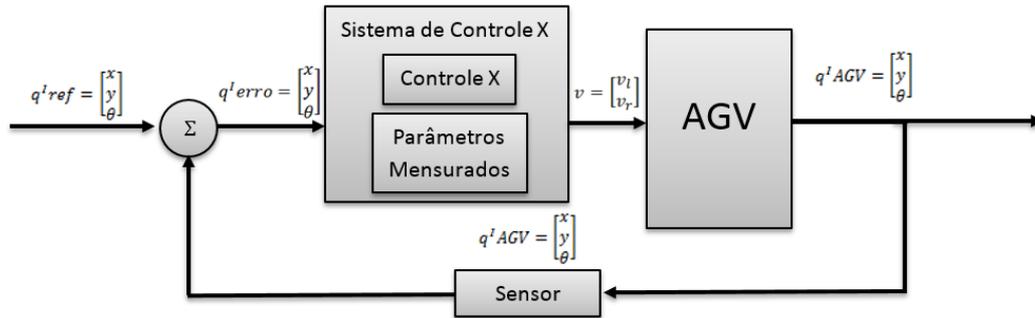


Figura 1.8 - Diagrama de blocos do sistema de controle X.

Esses parâmetros mensurados são incorporados ao sistema de controle X, como uma outra estratégia de controle, porém contemplando com mais detalhe a dinâmica do sistema. Os diagramas da Figura 1.7 e 1.8 prenunciam teorias e técnicas aplicadas nessa proposta, serve para demonstrar que mesmo o sistema de controle proposto não obtendo valores absolutos para a carga e a inserção desses valores no sistema de controle, espera-se que ele seja sensível o suficiente para acomodar possíveis fenômenos dinâmicos sempre buscando manter a acurácia e precisão do veículo no segmento de trajetória.

As Figuras 1.7 e 1.8 são apresentadas não para evidenciar que uma técnica de controle é melhor ou pior que outra, apenas mostrar que o sistema de controle proposto nessa pesquisa é aplicado de forma que os parâmetros intrínsecos à dinâmica, como por exemplo o valor absoluto da carga transportada e ou ruídos externos, não são mensurados.

Dessa forma o sistema de controle desta pesquisa está voltado para a correção do veículo ao seguir uma trajetória e não estimar a melhor forma possível para o veículo iniciar o segmento de trajetória, ou seja, o sistema aqui proposto espera que o veículo erre ao seguir a trajetória, consequência do fenômeno de dinâmica, para então efetuar a correção mantendo o veículo o mais centrado possível em relação a trajetória.

1.2 Motivação

Uma consequência perceptível de como a robótica industrial e metodologias de controle estão evoluindo e sendo aplicadas, é resultado do trabalho e dedicação dos pesquisadores da área nas últimas décadas, mensurando apontamentos significativos no desenvolvimento de aplicações usuais, como é o caso dos AGVs. Entretanto, mesmo que a pesquisa e o desenvolvimento tenham apresentado resultados satisfatórios, vale ressaltar que não estão totalmente resolvidos os problemas relacionados a incertezas, não linearidades e distúrbios de movimentos por parte dos sistemas não holonômicos em AGVs. Em Kolmanovsky e McClamroch, (1995), são apontadas algumas restrições e incertezas para sistemas com características semelhantes ao objeto de estudo, associando a necessidade de estudar e desenvolver controladores que apresentem desempenho satisfatório.

Foram alcançados resultados significativos em termos de modelagem, planejamento e controle de AGVs nas últimas décadas, porém, apesar de bem estabelecido, Oriolo (2014) traça alguns apontamentos de discussão que ainda devem ser explorados pela comunidade científica, dos quais incluem a criação de controladores, que garantem desempenho e estabilidade do sistema em meio a perturbações e as restrições de movimentação do veículo, e o uso da dinâmica em meio ao sistema. Outro ponto de motivação importante é a dificuldade no controle de sistemas não holonômico e subatuados, visto que essas restrições acabam impossibilitando de regular os graus de liberdade do sistema para que o AGV alcance uma posição e orientação desejadas instantaneamente.

A aplicação de técnicas de controle convencionais, que possuem natureza de aplicação em sistemas onde os parâmetros são lineares e constantes, podem trazer desempenhos satisfatórios para aplicação nesses instantes de linearidades. Porém para sistemas de característica dinâmica, como é o caso do objeto de estudo desta pesquisa, a não linearidade do sistema se faz presente, sendo inviável as técnicas de controle tradicionais que lidam com ganhos lineares e com coeficientes constantes, não atendendo às necessidades dinâmicas de desempenho do veículo. Sendo assim, surge a necessidade de pensar em um sistema de controle que possa adaptar-se frente a essas variações dinâmicas.

Além disso, contemplando trabalhos de pesquisadores do Laboratório de Estratégias de Automação e Robótica (TEAR) em consultorias com empresas e ambientes de aplicação desses

veículos, demandaram atendimento em maior acurácia no posicionamento e orientação do veículo ao seguir a trajetória, frente às variações, fato negligenciado por fabricantes de AGVs que mantêm a estratégia de controle com natureza linear, sendo este um ponto de motivação enriquecedor da pesquisa por proporcionar aplicação em cenários reais, aproximando a indústria/mercado da academia.

1.3 Justificativa

Apesar de o início da pesquisa, desenvolvimento e aplicação dos AGVs somarem pouco mais de cinco décadas, existem pontos ainda exploratórios na grande área de estudo (HAMMOND, 1986). Diante da aplicação de AGVs em ambientes industriais, em alguns casos fatores de precisão e eficiência no transporte de materiais nesses ambientes são pontos determinísticos e com desafios cada vez mais característicos. No que diz respeito a veículos em ambientes industriais, a forma com que esses veículos transportam materiais são intrínsecos à linha de estudo de sistemas dinâmicos, pois estes sistemas de forma geral apresentam não linearidade, não holonomia e particularidades ligadas às suas restrições de movimentos. Sendo assim, trabalhar essas características, levando em consideração a dinâmica do sistema, estabilidade e acurácia ao seguir a trajetória prevista, são dependentes das estratégias adotadas para modelar e desenvolver um sistema de controle.

Para técnicas de controle que lidam com sistemas considerados como lineares como é o caso de Gomes *et al.* (2016), Xu, Kan e Yan (2014), LI *et al.*(2016), onde os parâmetros dinâmicos não são considerados, como por exemplo a variação de carga, não se aproximam da aplicação real, visto que, o controle de AGVs apresenta restrições intrínsecas tanto para o modelo cinemático quanto para o modelo dinâmico associado a variáveis externas que influenciam diretamente na dinâmica.

Nos trabalhos de Callai, Coelho e Coelho (2007), Zhang, Wen e Zhu (2010), Shen, Jiang e Cocquempot (2014), são utilizadas estratégias de Controle *Fuzzy* Adaptativo, onde nesses sistemas, mesmo que não sendo os mesmos objetos de estudos em relação à esta pesquisa, possuem características de sistemas não lineares, onde é inserido o modelo dinâmico

ao sistema, buscando uma adaptação do sistema de controle baseado em parâmetros de referência de forma on-line e retroalimentação do sistema de controle.

Outra abordagem são os trabalhos de Kwak e Park (2012), Martins (2009), Martins *et al.* (2008) que usam estratégias adaptativas para o sistema de controle, onde o objeto de estudo são robôs móveis seguidores de linha (*mobile robots follow line*), que são sistemas com características de movimentação semelhante a AGVs de aplicação industrial, gerando apontamentos e indícios que o uso de técnicas de controle que considerem a dinâmica do sistema pode ser aplicada em AGVs seguidores de linha, além disso contribuem para uma análise de quais parâmetros (intrínsecos a dinâmica), devem ser considerados na concepção da estratégia de controle.

Sendo assim desenvolver um sistema de Controle *Fuzzy* Adaptativo para AGVs seguidores de linha que possibilite a integração da cinemática e dinâmica, associado às características não holonômicas e restrições de movimentos do AGV, pode oferecer vantagens no desempenho de movimentação do veículo, levando em consideração a forma como o veículo segue uma trajetória pré-estabelecida, contemplando variáveis mais plausíveis de serem mensuradas ligadas ao fenômeno de movimentação, como por exemplo a sua posição e orientação em relação a trajetória, para aplicação em um ambiente real como por exemplo o ambiente industrial.

Seguindo essa temática, e sendo direcionado pelas linhas de pesquisas do Laboratório de Estratégias de Automação e Robótica (TEAR), este trabalho busca dar continuidade às linhas de pesquisa na área de controle inteligente, contribuindo para a melhoria no desempenho de AVGs.

Na Figura 1.9 é apresentada uma visão de como o trabalho está inserido nas áreas de pesquisa e nos temas do Laboratório TEAR. A junção entre os problemas que são abordados com as técnicas e métodos, geram a linha de pesquisa, que é aplicada nas áreas descritas, onde seguem a terminologia e amarrações lógicas definidas pela agência de fomento CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

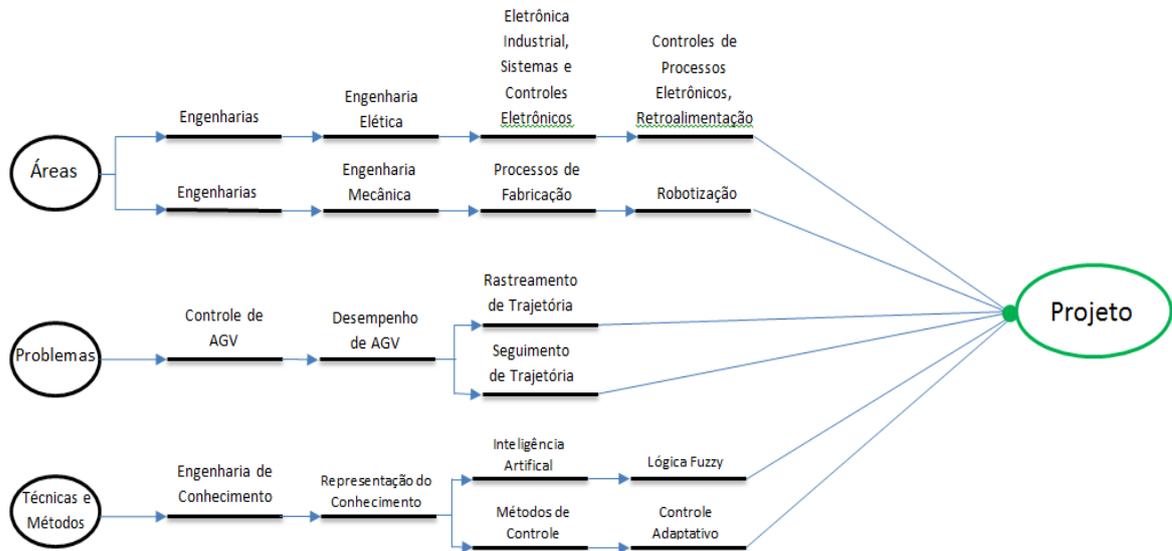


Figura 1.9 - Inserção do Projeto.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma estratégia de Controle *Fuzzy* Adaptativo, para aplicação em um AGV seguidor de linha com tração diferencial buscando coincidência entre centro geométrico do sensor de seguimento de linha e centro da trajetória (centro da linha), contribuindo para a estabilidade, acurácia e precisão do AGV ao seguir essa trajetória pré-estabelecida, considerando erros de posição e orientação do AGV em relação a linha.

Para atingir o objetivo geral deste trabalho alguns objetivos específicos precisam ser cumpridos:

- **ESTUDOS E MODELAGENS DE FENÔMENOS DE ERROS:** neste item será tratado o estudo e modelagem do fenômeno característico da movimentação do veículo ao seguir a trajetória, principalmente características que possuem relevância quanto à dinâmica do veículo (movimentação e orientação do AGV e não holonomia);
- **SÍNTESE DA BASE DE REGRAS:** através dos estudos dos fenômenos de erros de movimentação do veículo, elaborar a base de regras para o controle *fuzzy*, contemplando a correção do fenômeno de erro frente a sua ocorrência;

- **SÍNTESE DO CONTROLE FUZZY ADAPTATIVO:** criar um sistema de controle *Fuzzy* Adaptativo baseado na cinemática e na dinâmica para a geração das velocidades, buscando estabilidade no erro de posição e orientação do AGV em um valor de referência, ponderando variáveis intrínsecas a movimentação do veículo, para contribuição na estabilidade e acurácia do veículo;
- **ESTUDO COMPARATIVO:** o estudo comparativo realizado por meio da verificação e validação comparando a aplicação do sistema de controle *fuzzy* adaptativo e da técnica de controle PID (Proporcional, Integral, Derivativo);
- **VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO:** para validar a pesquisa, será realizado um estudo comparativo entre técnicas e formas de controle. Os métodos para validar os resultados serão com base na técnica clássica de controle PID e a estratégia de controle proposta nesta pesquisa, contemplando: a avaliação de erros de posição e orientação do veículo ao seguir a trajetória em cada uma das técnicas, as compensações geradas pelo controle *fuzzy* adaptativo e o PID. Contudo este estudo será conduzido com:
 - Verificação e validação experimental: a estratégia de controle *fuzzy* Adaptativa e a técnica de controle PID será aplicada em um AGV real, o qual é o objeto de estudo desta pesquisa, onde serão analisados os resultados obtidos através de cenários de teste reais, contemplando pontos de estresse do sistema de controle e suas restrições de mobilidade, além de cenários compondo trajetórias variadas.

1.5 Delimitações do trabalho

O foco desta pesquisa está no sistema de controle do veículo, responsável por garantir a execução das trajetórias, gerando sinais de controle para os atuadores. O controle deve garantir que as velocidades angular e linear impostas ao veículo sejam executadas, assegurando a acurácia e precisão do veículo ao seguir a trajetória, sendo o controle responsável por atuar nas ações de movimentação do AGV.

Existem alguns efeitos que possuem impactos diretos e indiretos quanto ao sistema de controle e na dinâmica do veículo que não serão abordados neste estudo. Tendo como efeitos

externos causados pelo ambiente de trabalho do AGV como, por exemplo, a presença de obstáculos e o desvio deles ao longo da trajetória não são abordados neste estudo. Outro ponto não abordado é a dinâmica das rodas, ou seja, assume-se que não ocorrerá deslizamento ou patinação das rodas, e que as rodas sempre mantenham um ponto de contato com o piso do ambiente. Ainda sobre as restrições das rodas, assume-se também que a dinâmica relacionada ao modelo de roda aplicado não será contemplado nesse estudo.

Em relação a variáveis, existem itens que possuem impactos na dinâmica do veículo como, por exemplo, a variação de carga, entretanto este trabalho não busca mensurar o valor absoluto da carga transportada pelo AGV, bem como a variação dela. Outro ponto é que não é previsto um deslocamento da carga sobre o veículo, eliminando a necessidade de mensurar o centro de massa do veículo e identificar qual o eixo de tração com maior peso de transporte.

1.6 Organização do trabalho

O primeiro capítulo apresenta a estrutura à qual a pesquisa está inserida, contextualizando a área e identificando pontos motivadores da pesquisa, assim como a justificativa para a escolha do tema, objetivos a serem alcançados e o escopo abordado por esta pesquisa.

O capítulo 2 traz o referencial teórico, apresentando uma visão geral sobre as principais técnicas que serão utilizadas para compreensão da pesquisa e síntese do sistema de controle.

A revisão de trabalhos correlatos é apresentada no capítulo 3, buscando apresentar como estão as áreas de aplicação das técnicas aqui propostas em outros problemas. Em uma segunda parte da revisão bibliográfica, são apresentadas quais as principais técnicas e estudos publicados com relação intrínseca ao problema abordado. Por fim alguns trabalhos que tratam o mesmo problema utilizando as técnicas de controle adaptativo e/ou controle *fuzzy* são apresentados.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação da proposta desta pesquisa onde é descrita a principal contribuição da pesquisa e o prosseguimento no estudo do problema para o desenvolvimento do sistema de controle *fuzzy* adaptativo.

O Capítulo 5 é dedicado à apresentação dos testes realizados no sistema desenvolvido. Os cenários de testes e os resultados obtidos são apresentados e analisados. Além

disso, são apresentados os testes de validação para verificar a estabilidade e acurácia do AGV alcançados pelo sistema de controle *fuzzy* adaptativo.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões destacando a abrangência dos resultados alcançados, as limitações do trabalho e as contribuições que o mesmo traz para a área de sistema de controle inteligente para AGVs seguidor de linha e para os projetos do laboratório TEAR do Departamento de Computação da UFSCar.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações iniciais

O capítulo referencial teórico apresenta os conceitos e fundamentações referentes às técnicas aplicadas nesse projeto de pesquisa, bem como a modelagem matemática referente ao veículo. São modeladas as equações cinemáticas do AGV com tração diferencial, abordando parâmetros de velocidades e de posição e orientação do veículo, sendo essas as variáveis alvo desta pesquisa. Também são apresentados os modelos e equações matemáticas ligadas à dinâmica dos atuadores, sendo esses componentes fundamentais e intrinsecamente ligados à cinemática e dinâmica, e as velocidades lineares e angulares do sistema AGV.

Sistemas *fuzzy* e teorias relacionadas, são apresentados como fundamentação técnica, expondo as principais regras e estruturas bases do sistema *fuzzy*, seguidos da abordagem conceitual de sistemas adaptativos e a associação da característica de adaptação voltada para o escopo desta pesquisa.

2.2 Conceitos Fundamentais

A Inteligência Artificial (IA), é pautada sobre a investigação e aplicação de técnicas computacionais inspiradas em características humanas, tais como: raciocínios, aprendizado, formas de representação do conhecimento, ou até mesmo características encontradas na natureza, como por exemplo seleção, evolução e adaptação.

Segundo Rich (1983), IA é a forma de fazer máquinas/computadores desempenhar funções nas quais os seres humanos apresentam melhores aptidões, ou então, não é segura a existência de uma solução algorítmica viável através dos meios de computação tradicionais.

Essas formas de manipulação do conhecimento genericamente objetivam realizar tarefas, através de computadores, as quais são geralmente feitas por seres humanos especialistas. A título de exemplo é possível citar algumas formas de representar o conhecimento, como:

- Sistema especialista: formas de raciocínio por meio de inferências,
- Rede Neural Artificial: modelos computacionais inspirados em uma rede de neurônios,
- Algoritmo Genético: algoritmos baseados em técnicas da biologia evolutiva e
- Lógica Fuzzy: raciocínio multivalorado, incerto e impreciso.

Conforme apresentado na Figura 1.9 do capítulo 1-Introdução, é possível expor o uso da Lógica *Fuzzy* nesta pesquisa como uma das técnicas e parte dos métodos principais para tratamento do problema, bem como seu uso dentro das características de representação do conhecimento e engenharia de conhecimento.

É usual a forma de expressar informações através das palavras, conhecida também, como representação de linguagens naturais, entretanto essas expressões podem relacionar fatos imprecisos. Como exemplo, quando usualmente é dito a altura de uma pessoa: “Ele é muito alto!”, ou a temperatura de um determinado ambiente: “Hoje está muito frio!”.

Relacionando estes problemas entre determinar níveis, como mencionados acima, problemas estes que possui uma interpretação diferente para cada pessoa, são característicos de multivaloração e ambiguidade, pois os níveis de pertencer a determinadas características possuem intervalos de interpretação diferentes. Dessa forma é ultrapassado os limites no contexto da lógica clássica que lida com verdadeiro e falso, 1 (um) ou 0 (zero), certo ou errado, entre outras formas onde a interpretação é única (MUKAIDOMO, 2001). Para problemas de difícil solução, em que se faz necessário o auxílio matemático/computacional, modelar tais problemas é extremamente difícil com o uso apenas da lógica clássica.

Mesmo com o auxílio matemático/computacional a precisão é limitada, deixando sempre uma margem não contemplada, por mínima que seja a incerteza (KLIR e YUAN, 1995). Para tratar essas restrições da lógica clássica, através de um formalismo matemático, foi

desenvolvida por Zadeh a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*, permitindo tratar níveis de incerteza e ambiguidade.

Na década de 60 foi desenvolvida uma variação da teoria clássica dos conjuntos e extensão da lógica de valores múltiplos desenvolvidos por Lukasiewicz, tal variação desenvolvida por Lofti A. Zadeh foi publicada em 1965 e introduziu os primeiros conceitos sobre conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965). Diante da teoria exposta por Zadeh, Ebrahim Mamdani em 1974, foi o primeiro a utilizar a formulação dos conjuntos *fuzzy* aplicado em um sistema de controle prático. Mamdani desenvolveu um controle automático de uma máquina a vapor baseado no conhecimento de um operador humano especialista (MCNEILL e THRO, 1994), desde então surgiram aplicações industriais, sistemas de controle *fuzzy* aplicados em refinarias, processos biológicos e químicos, tratamento de água e esgoto operação automática de trens entre outros (ORTEGA, 2001)

Abordada com uma extensão da lógica clássica, a lógica *fuzzy* é baseada em proposições valoradas não sendo como totalmente verdadeiras e não sendo valoradas como totalmente falsas, mas com graus de pertinência e validade mesmo não sendo exatos ou quantitativos, mas sim determinados através de referências experimentais. A definição e a modelagem destes termos e valores constituem a base da teoria e do estudo de sistemas fuzzy.

2.3 Conjuntos *Fuzzy*

A teoria de conjuntos *fuzzy* é uma extensão da teoria de conjuntos clássica, diferenciando a forma das fronteiras dos conjuntos, sendo que nos conjuntos *fuzzy* as fronteiras dos conjuntos não são muito bem definidas, ou seja, é difícil determinar o ponto inicial e final de um conjunto.

Na teoria clássica de conjuntos um elemento é caracterizado por uma função característica de associação. Essa função característica permite definir a pertinência de um elemento x a um determinado conjunto universo A , associando o valor de 1 (um) ao elemento se esse determinado elemento pertencer ao conjunto universo e associando o valor 0 (zero) caso esse elemento não pertença ao conjunto universo (NICOLETTI e CAMARGO, 2009). A equação (2.3.1) define essa função característica como:

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.3.1)$$

Entretanto, essas funções dos conjuntos clássicos são inflexíveis em alguns casos para descrever a pertinência de um elemento em um conjunto, pois a teoria clássica de conjuntos impõe a pertinência ou a não pertinência a um determinado elemento. Para esses casos a teoria de conjuntos *fuzzy* é aplicada quantificando o pertencimento de um elemento ao conjunto.

Para os conjuntos *fuzzy*, a função característica é chamada de função de pertinência f_A , que busca associar a cada elemento x no universo de discurso A , em um intervalo, sendo esse intervalo geralmente definido entre 0 (zero) e 1 (um), $[0, 1]$, conforme a equação (2.3.2) onde x é o conjunto base (NICOLETTI e CAMARGO, 2009).

$$f_A : x \rightarrow [0, 1] \quad (2.3.2)$$

Através deste intervalo é possível interpretar o grau de compatibilidade do elemento no conjunto, onde o grau de pertinência 0 (zero) significa a exclusão total do elemento dentro do conjunto e o grau de pertinência 1 (um) total pertinência do elemento no conjunto (KLIR e YUAN, 1995).

2.3.1 Funções de Pertinência

O conceito de funções de pertinência *fuzzy* é a base para a teoria de conjuntos *fuzzy*, onde não se determina se um elemento pertence ou não a um conjunto, mas sim o grau de pertencer a esse conjunto, sendo este grau de pertinência compreendido entre o intervalo de 0 (zero) a 1 (um) (REZNIK, 1997). Um ponto importante a ser ressaltado é que não existe um conjunto melhor do que o outro, apenas conjuntos melhores para determinada situação e piores para outras. Para determinar qual é a melhor forma do conjunto, é necessário testá-los, ou seja, essa escolha se dá por meio do empirismo e conhecimento do especialista.

Os conjuntos mais comumente utilizados são as formas triangulares, trapezoidais e gaussianas, com especificidade das funções de pertinência para cada uma dessas variações de representação do conjunto (KLIR e YUAN, 1995), entretanto aqui é discutida apenas as formas triangulares e trapezoidais, devido a contemplação apenas dessas variações no escopo dessa pesquisa.

A função triangular pode ser representada como na expressão (2.3.1.1):

$$\mu_{\text{Triangular}}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (2.3.1.1)$$

Na equação (2.3.1.1) o termo b é o modal de μ e os termos a e c são os limites inferiores e superiores dos elementos no conjunto *fuzzy*. Tal função e conjuntos $\{a, b, c\}$ são representados graficamente como as coordenadas dos três vértices do triângulo formado pela função de pertinência, como ilustrado na figura 2.1.

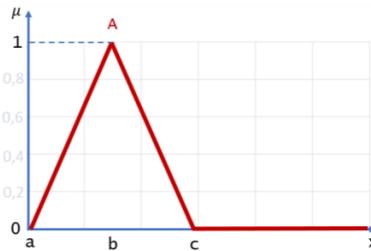


Figura 2.1 - Função Triangular

Outra classe de funções de pertinência é a trapezoidal, expressa pela equação (2.3.1.2) e ilustrado pela figura 2.2.

$$\mu_{\text{Trapezoidal}}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (2.3.1.2)$$

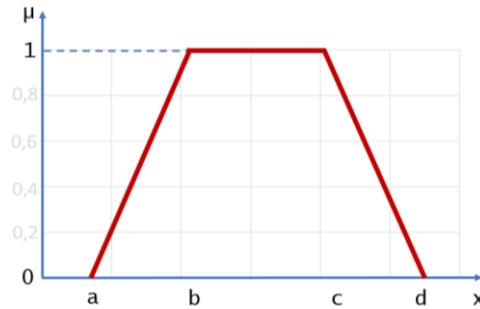


Figura 2.2 - Função Trapezoidal.

Na função trapezoidal o conjunto $\{a, b, c, d\}$ são interpretadas como os vértices de um trapézio formado pela função de pertinência.

2.3.2 Operações com Conjuntos Fuzzy

Assim como na teoria de conjuntos clássica as operações de conjuntos também podem ser realizadas na teoria de conjuntos *fuzzy*, como por exemplo, complemento, união, interseção entre outros, porém com algumas diferenças (KLIR e YUAN, 1965).

Nguyen e Walker (2006) representam as operações de união, interseção e complemento conforme as funções de pertinência representadas respectivamente nas equações (2.3.2.1), (2.3.2.2) e (2.3.2.3).

$$(A \cup B)(x) = \max\{A(x), B(x)\} = A(x) \cup B(x) \quad (2.3.2.1)$$

$$(A \cap B)(x) = \min\{A(x), B(x)\} = A(x) \cap B(x) \quad (2.3.2.2)$$

$$A'(x) = 1 - A(x) \quad (2.3.2.3)$$

A título de exemplo, é usado dois conjuntos A e B conforme suas funções de pertinência apresentadas respectivamente nas figuras 2.3 e figura 2.4.

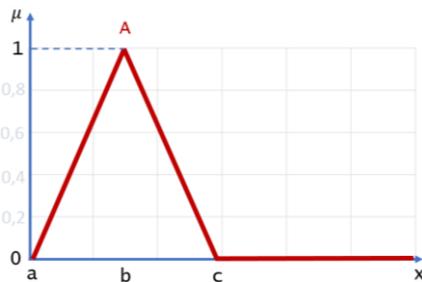


Figura 2.3 - Conjunto fuzzy A.

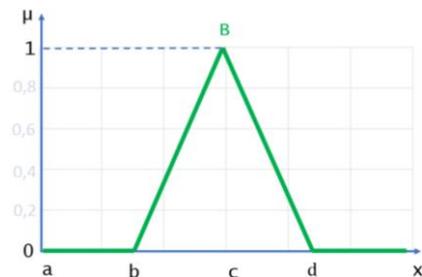


Figura 2.4 - Conjunto fuzzy B.

A figura 2.5 representa a operação de união aplicada nos conjuntos *fuzzy* A e B, denotada por $A \cup B$, onde é definido todo x pertencente aos dois conjuntos.

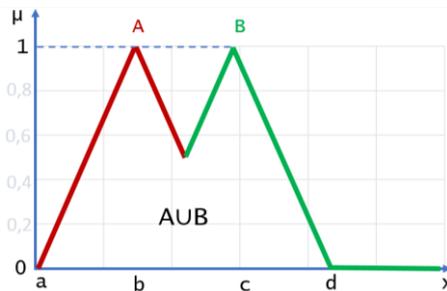


Figura 2.5 - Operação de união graficamente representada.

Para a operação de interseção são considerados os mesmos conjuntos *fuzzy* A e B, denotada por $A \cap B$, onde todo x pertence aos mesmos conjuntos ao mesmo tempo. A operação de interseção é representada graficamente na figura 2.6.

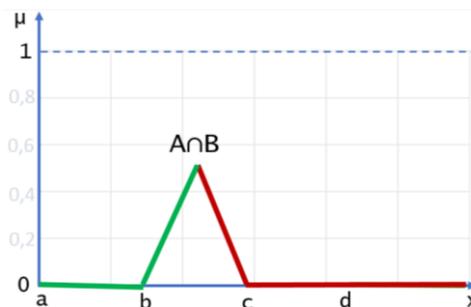


Figura 2.6 - Operação de interseção.

A função de complemento do conjunto A pode ser denotada por A' , que caracteriza o grau em que um elemento não pertence a um conjunto, conforme figura 2.7.

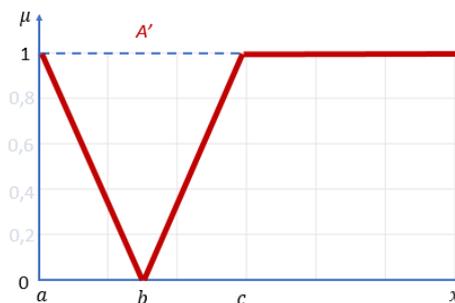


Figura 2.7 - Operação de complemento.

2.4 Variáveis linguísticas

A forma como um fenômeno característico de um sistema acontece, pode ser mapeado através de rótulos para representá-lo. Nesse mapeamento é utilizado a linguagem natural para atribuir esses rótulos aos fenômenos, onde tais rótulos são conceituados como variáveis linguísticas. Zimmermann (1991), conceitua variáveis linguísticas cujo valores são caracterizados como palavras ou sentenças da linguagem natural ao contrário de valores para descrever determinada característica de um fenômeno. Sendo assim uma variável linguística *fuzzy* é um fenômeno cujo valor é representado qualitativamente por termos da linguagem natural (termos utilizados no dia-a-dia) e julgado quantitativamente através de uma função de pertinência.

As variáveis linguísticas possuem relação direta com o processo de representação do conhecimento uma vez que é possível caracterizar um fenômeno com termos linguísticos cotidianos para expressar o conhecimento, como para expressar a temperatura de algo: frio, morno e quente. Para sistemas cada vez mais complexos, a habilidade humana diminui para descrição e interpretação de processos sobre a perspectiva de precisão (ZADEH, 1973), sendo essa, uma das principais razões para o uso de variáveis linguísticas, buscando modelar o conhecimento humano através das teorias de conjuntos *fuzzy* e permitindo modelar sistemas complexos tratados por ferramental matemático convencional.

2.5 Lógica Fuzzy

Nesse contexto de representação do conhecimento através de variáveis linguísticas e associado aos conjuntos *fuzzy*, dar-se-á o conceito de lógica *fuzzy*, buscando através de formalismo lógico mapear informações imprecisas até obter-se uma conclusão, onde para essa conclusão são utilizadas proposições e regras para inferir um resultado.

2.5.1 Proposições Fuzzy

As proposições (regras) *fuzzy*, são sentenças que fazem uso das variáveis linguísticas para representar a ocorrência de um fenômeno. Com uma estratégia de inferência relativamente

simples, sem a necessidade de conhecimentos matemáticos complexos, as proposições *fuzzy*, adota uma relação do tipo **SE** <antecedente> **ENTÃO** <consequente>, onde são modeladas as relações entre o fenômeno, as variáveis e a tomada de decisão (SHAW e SIMÕES, 1999).

Estas regras são compostas por um ou mais antecedentes relacionando diretamente com um ou mais consequente através do conectivo **e**, conectivo **ou** e o conectivo unário **não**. Considerando um sistema de velocidade, a seguinte regra pode ser expressada: **SE a velocidade é alta ENTÃO o risco_de_acidente é grande**, onde é possível estabelecer a relação entre a variável **velocidade** e **risco_de_acidente** usando os termos **alta** e **grande** que são inerentes e imprecisos. Para expressões compostas é possível utilizar os conectivos: **SE a velocidade é alta e pista_molhada ENTÃO o risco_de_acidente_grande e morte_eminente**.

O conjunto dessas regras é dito como sistemas de inferência e resultam no processo de tomada decisão para um determinado fenômeno.

2.5.2 Inferência

Através das regras *fuzzy* é possível mapear um fenômeno e realizar o processo de tomada de decisão. Os métodos de inferência podem ser divididos em dois grandes grupos: do tipo Mamdani e do tipo Sugeno (SUGENO, 1974).

Os sistemas do tipo Mamdani são de fácil modelagem, pois o modelo é baseado no especialista e em sua intuição (MAMDANI, 1973) e não são necessários modelos matemáticos complexos. Para um sistema de controle mais fino e preciso, o sistema SUGENO apresenta desempenho superior, entretanto a modelagem de sistemas desse tipo não são intuitivas ao fenômeno e sim a matemática envolvida.

Sheleeg e Ellabib (2013), diferenciam os sistemas Mamdani e Sugeno de acordo com suas saídas de decisão. O método Mamdani possui funções de pertinência de saída enquanto Sugeno não tem funções de pertinência de saída. Para os controladores Sugeno, o resultado das regras de inferência é obtido através de funções matemáticas, sendo assim cada regra conduz a consequências que são funções das variáveis nebulosas de entrada, em forma representativa tem-se:

$$\begin{array}{ll} \text{Se } x \text{ é } B, \text{ então } y \text{ é } C & \text{tipo Mamdani} \\ \text{Se } x \text{ é } B, \text{ então } y \text{ e } f(x) & \text{tipo Sugeno} \end{array}$$

Neste trabalho utiliza-se unicamente sistemas de inferência *fuzzy* do tipo Mamdani. Esse método converte os valores quantitativos em qualitativos, e através de inferência, transforma em outros valores ainda qualitativo, não sendo necessário uma função matemática para a resposta final quantitativa.

2.5.2.1 Método de inferência Mamdani

Para uma forma de representação mais intuitiva do conhecimento especializado e a descrição de um fenômeno com características imprecisas, o método Mamdani oferece vantagem por aproximar o pensamento humano da ocorrência de um fenômeno à ser descrito (SHLEEG; ELLABIB, 2013).

O método de inferência Mamdani é dito um método de inferência composicional simplificada com entradas e saídas numéricas, e faz uso de operadores para inferência sobre os conectivos conjunção e disjunção. Esses operadores são conhecidos como *max-min*, onde a conjunção opera sobre o mínimo e a disjunção opera sobre o máximo do conjunto (GOMIDE, GUDWIN e TANSCHHEIT, 1995).

A conjunção é utilizada nos antecedentes da regra encontrando o mínimo deles e a agregação é utilizada no conseqüente das regras encontrando o máximo delas. Como exemplo, um caso hipotético de aplicação pode descrever o uso destes operadores. Neste caso hipotético é feita análise para saber se vai chover no dia seguinte, e este evento é dependente da temperatura de hoje juntamente com a umidade do ar. Para este caso as seguintes regras podem ser mapeadas:

SE V1 é alta e V2 é alta ENTÃO V3 é alta,

SE V1 é média e V2 é alta ENTÃO V3 é alta.

Sendo que para esses conjuntos, V1 é referente ao conjunto relacionado à temperatura, V2 referente ao conjunto relacionado à umidade e V3 o conjunto relacionado a probabilidade de chuva.

A Figura 2.8 mostra esta análise e atuação dos operadores, onde para a temperatura, cujo valor atribuído é 28°C, seu grau de pertinência nesse conjunto é de 0,6 e para umidade do ar em 88%, tendo como seu grau de pertinência 0,8 dentro do conjunto. Com o operador de *min*

atuando sobre esta regra de inferência é possível obter informações quanto a resultante, que neste caso é a probabilidade de chuva.

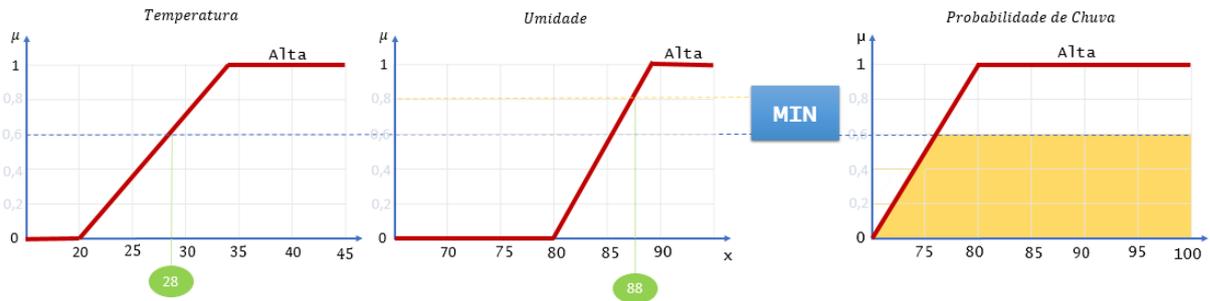


Figura 2.8 - Agregação da regra 1 utilizando operador de min.

Para a segunda regra é avaliado as entradas de temperatura e umidade tendo como 28°C de temperatura, e grau de pertinência igual a 1. Para a umidade do ar em 88%, tendo como seu grau de pertinência 0,8 dentro do conjunto e após a aplicação do operador de *min* é possível obter o resultado para a probabilidade de chuva, conforme a figura 2.9.

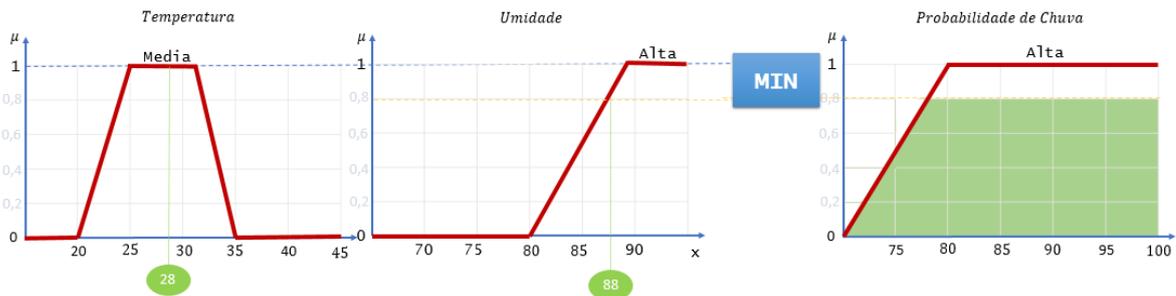


Figura 2.9 - Agregação da regra 2 utilizando operador de *min*.

O operador de *max* para a composição, atua sobre todas as agregações obtidas. A figura 2.10 demonstra a aplicação deste operador.



Figura 2.10 - Composição das regras 1 e 2 utilizando operador *max*.

2.6 Modelagem de Sistemas Fuzzy

Castro e Camargo (2004), caracterizam sistemas *fuzzy* como um sistema responsável por processar e representar informações linguísticas, apoiado nas operações de conjuntos para tratar incertezas e imprecisão. Fazendo o uso da lógica *fuzzy* no processo de raciocínio e incorporando variáveis do problema, podendo essas variáveis assumir valores linguísticos definidos por um conjunto *fuzzy*, caracteriza um sistema *fuzzy* (KLIR e YUAN, 1995).

Os sistemas *fuzzy* destinam-se a controlar o valor de uma variável de saída, em função dos valores das variáveis de entrada, utilizando um conjunto de regras para isso. Nesta pesquisa é utilizado um tipo específico de Sistema *Fuzzy* (SF) conhecido como Sistema *Fuzzy* Baseado em Regras (SFBR), caracterizado por duas estruturas principais: a Base de Conhecimento (BC) e o Mecanismo de Inferência (MI).

O SFBR utilizado nesse trabalho, que é do tipo Mamdani, é composto por alguns mecanismos, conforme apresentados na figura 2.11.

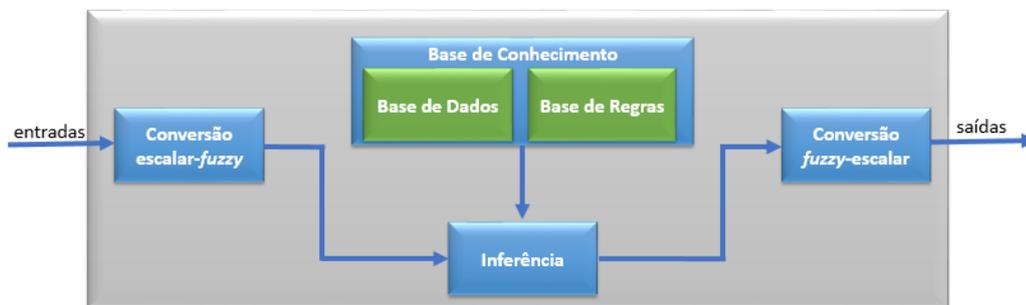


Figura 2.11 - Representação do sistema *fuzzy* Mamdani.

O sistema *fuzzy* possui etapas desde as entradas até a saídas para apoiar e gerar a informação necessária a tomada de decisão.

O fluxo de execução do sistema é caracterizado da seguinte forma: o módulo de Conversão Escalar-*Fuzzy* atua em converter as entradas numéricas (*crisp*) em variáveis *fuzzy*. Tal conversão se dá através de uma função de pertinência, onde o número *crisp* é mapeado em função dos conjuntos *fuzzy* pré-definidos, retornando um valor *fuzzy*. Após esse processo as regras *fuzzy* são ativadas.

O processo seguinte é a Inferência onde ocorrem as operações com os conjuntos *fuzzy*. Para esse processo de inferência é utilizada a Base de Conhecimento que é constituída pela Base de Dados e a Base de Regras. A Base de Dados contém as definições dos conjuntos *fuzzy* relacionados com os termos linguísticos mapeados usados nas regras *fuzzy*. A Base de Regras é a estrutura onde são armazenados o conjunto de regras mapeadas. Sendo assim o modulo de Inferência associa as saídas provenientes do modulo escalar-*fuzzy* com as informações existentes na Base de Dados, mapeando com o auxílio das regras contidas na base de regras, para então chegar em um consequente/conclusão.

Por fim é realizada a conversão *fuzzy*-escalar para a conclusão do sistema de inferência, que ainda está na forma *fuzzy*, então a conversão é feita para obter o valor *crisp* referente a conclusão do sistema de inferência, onde são utilizados métodos para esta conversão *fuzzy*-escalar.

A conclusão ainda está na forma *fuzzy* e para obter os números *crisp* para a resposta, o módulo de conversão *fuzzy*/escalar oferece métodos para mapear essa resposta *fuzzy* em uma resposta *crisp*. como: Centroide, Bissetor de Área, Métodos dos Máximos e Menor Máximo (SHAW e SIMÕES, 1999), entretanto para esta pesquisa é utilizado apenas o método centroide.

O método de centroide consiste em calcular o ponto central da saída do método *fuzzy*-escalar para um determinado intervalo dessa saída, obtendo assim o valor *crisp*. Para este método de conversão usando cálculo de centroide são realizados três passos: (i) determinar a abscissa do ponto centroide para cada saída ativada na inferência, (ii) calcular a área entre o grau de pertinência e o eixo *x* para cada saída ativada e (iii) calcular a média ponderada dos pontos centroides pelas respectivas áreas. A equação (2.6.1) define o cálculo de centroide.

$$\text{COA}(B) = \frac{\sum_{i=0}^D B(y_i)y_i}{\sum_{i=0}^D B(y_i)} \quad (2.6.1)$$

Onde *B* é o conjunto base: $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$ e $B(y_i)$ é o grau de pertinência do elemento y_i no conjunto base. Como exemplo, na figura 2.12 é adotado o conjunto base $Y = \{0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35\}$, e a relação entre os elementos e seus respectivos graus de pertinência obtidos.

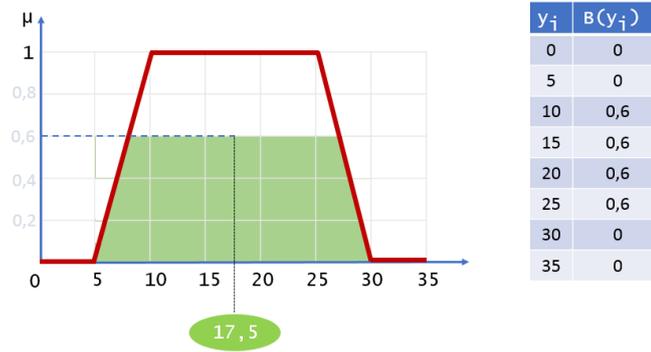


Figura 2.12 - Método de conversão *fuzzy*-escalar centroide.

Ao aplicar a equação (2.6.1) é possível obter o resultado do centroide, conforme apresentado na equação (2.6.2) e sua respectiva solução.

$$\text{CoA}(B) = \frac{[(0*0)+(0*5)+(0,6*10)+(0,6*15)+(0,6*20)+(0,6*25)+(0*30)+(0*35)]}{0+0+0,6+0,6+0,6+0,6+0+0}$$

$$\text{CoA}(B) = \frac{[0+0+6+9+12+15+0+0]}{0+0+0,6+0,6+0,6+0,6+0+0} \quad (2.6.2)$$

$$\text{CoA}(B) = \frac{[6+9+12+15]}{2,4} = 17,5$$

Com a aplicação do método de cálculo de centroide no módulo *fuzzy*-escalar é possível obter um valor *crisp* a partir das entradas do sistema *fuzzy* utilizando conjuntos previamente mapeados com apoio da base de conhecimento e o módulo de inferência.

2.7 Sistemas de Controle PID -Proporcional Integral Derivativo

Os sistemas de controle do tipo PID – Proporcional, Integral, Derivativo são entendidos como sistemas de controle baseados nas respostas de equações matemáticas de seus três fatores. São ditos algoritmos de controle *feedback* e aplicados na configuração completa, PID, ou em suas configurações variadas, PID modificado, sempre buscando controle e estabilização de variáveis em níveis de atuação aceitável, também dito como *setpoints* (OGATA, 2010).

Uma das características dos controles PID é sua aplicação em sistemas ditos como lineares, sistemas onde sua estabilidade é mantida e de fácil alcance. A Figura 2.13 apresenta a estrutura em diagrama de blocos da aplicação do PID.

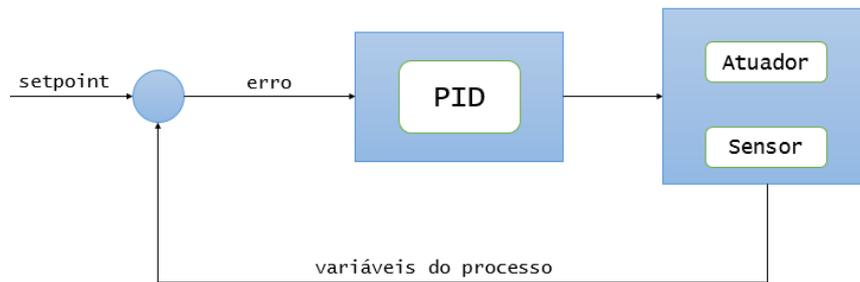


Figura 2.13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle PID aplicado em um processo.

Os três parâmetros envolvidos atuam da seguinte forma: o fator Proporcional atua na minimização de erros, o fator Integral tem por objetivo zerar o erro e o fator Derivativo tem por objetivo antecipar o erro, onde a união desses fatores gera o controle do processo.

A equação matemática 2.7.1, descreve o algoritmo de controle PID, onde: K_p é uma constante de ganho proporcional ao erro, K_i é a constante de ganho de integração de erros, K_d constante de ganho derivativo, e como sendo o erro, T tempo e t tempo de integração.

$$u(T) = k_p e(T) + k_i \int_0^T e(t) dt + k_d \frac{de(T)}{dT} \quad (2.7.1)$$

Os ajustes dos valores ideais dessas constantes são chamados de ajustes de sintonia e podem ser caracterizados de duas formas: experimental e analítico. Os métodos analíticos partem da modelagem matemática de todo o sistema dinâmico do veículo. Os métodos experimentais, também conhecidos como métodos de prática, como por exemplo o método de Ziegler-Nichols, atua na forma intuitiva do especialista, analisando o comportamento do processo assumindo valores ditatoriamente atribuídos as constantes da equação 2.7.1 (OGATA, 2010). Os procedimentos de ajustes de Ziegler-Nichols, limitam-se quanto a proporcionar ao sistema uma rejeição aceitável a perturbação, entretanto com ganhos relativamente altos, e sem grandes faixas de estabilidade para processos dinâmicos. O método de sintonia do controle PID desta pesquisa utiliza o método de Ziegler-Nichols.

2.8 Sistemas Adaptativos

As linhas de pesquisa de controle adaptativo são abordadas com dois aspectos: (i) uma suposição de que as variáveis do processo são mensuráveis (LANDAU, 1984); (ii) a abordagem de que somente a medição de entrada e saída do processo é mensurável (NARENDRA e VALAVANI, 1978), (GOODWIN e SIN, 1984), (GOODWIN e MAYNE, 1987). Nesta pesquisa é adotada a segunda abordagem, visto que as variáveis mensuradas dos sistemas são apenas a entrada e saída.

O conceito de controle adaptativo consiste na geração de sinais de controle, estimando os parâmetros variáveis do sistema, em tempo real, sendo possível gerar sinais provenientes das informações do processo e que busque um equilíbrio do sistema (ASTROM e WITTENMARK, 1994). O controle adaptativo é uma técnica de controle aplicada em sistemas que variam seus parâmetros, ou são inicialmente incertos, dando a possibilidade de o sistema de controle ajustar mediante a essas variações.

Nas técnicas de controle convencionais, que lidam com aproximações de seus sistemas de forma linear e seus parâmetros constantes, o controle pode apresentar desempenho satisfatório para esses sistemas lineares, mas em casos de sistemas não lineares, por exemplo, AGV seguidores de linha, essa aproximação não é fiel ao objetivo almejado, visto que as variações são amplas, e um ganho linear e com coeficientes constantes não consegue atender às necessidades de desempenho do veículo. Sendo assim, surge à necessidade de pensar em um sistema de controle que possa adaptar-se frente a essas variações.

Em termos gerais de sistemas e adaptação, pode-se dizer que um sistema adaptativo é qualquer sistema que foi projetado para adaptar-se, ou seja, um sistema capaz de modificar sua resposta de saída de acordo com a variação e dinâmica dos parâmetros do processo (ASTROM e WITTENMARK, 1994). As variações podem acontecer devido à não linearidade dos atuadores, ou variação na forma de operação do sistema, junto ao processo.

De forma abrangente a ação do sistema de controle adaptativo possui três etapas básicas: (i) identificar a resposta do sistema; (ii) comparar a resposta do sistema com a resposta desejada e (iii) regular os parâmetros do controle para obter a resposta desejada. Sua estrutura possui a malha de controle convencional, que gera respostas rápidas, e a malha adaptativa, um pouco mais lenta, responsável por adaptar os parâmetros do controlador, dando a característica

de não linearidade ao sistema (ASTROM e WITTENMARK, 1994). Sendo assim o sistema de controle para o AGV seguidor de linha busca a regulação dos valores do sistema com base nas variáveis de entrada e saída, buscado aproximar os valores de entrada aos valores de referência.

2.9 Modelagem Cinemática do AGV seguidor de linha

A cinemática é a descrição do movimento de corpos rígidos sem considerar as causas desse movimento, ou seja, sem atuação de forças sobre esses corpos (VILLATE, 2012). Nesta seção, são apresentadas as estruturas e equações referentes ao modelo cinemático do AGV seguidor de linha com tração diferencial, com o objetivo de servir de base para a síntese de controladores. A modelagem cinemática aqui apresentada, são proposta com base no trabalho de Archila e Becker (2013). Sendo assim, para descrever a posição e orientação do AGV no ambiente, dois sistemas de coordenadas são definidos, conforme apresentados na figura 2.14:

1. Sistema de Coordenadas Global: plano cartesiano onde o AGV se movimenta representado por $\{X_G, Y_G\}$;
2. Sistema de Coordenadas do AGV: ponto estratégico fixo do AGV, denotado por $\{X_V, Y_V\}$.

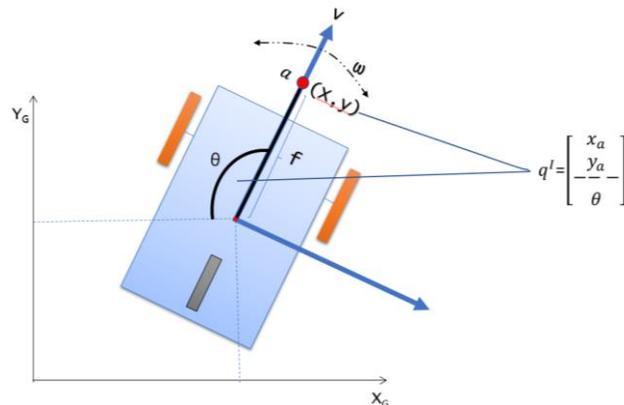


Figura 2.14 - Configuração do AGV no espaço.

O ponto a é o ponto o estratégico fixo do AGV, e definido entre o ponto central geométrico do veículo deslocado a frente a uma distância f . Para este trabalho considera-se que o centro de massa do AGV c está no eixo de simetria do veículo e coincidente com o centro geométrico.

A figura x, mostra a posição e orientação do AGV em relação ao sistema de coordenadas global, definido por $q^I = [x_a, y_a, \theta]^T$. O AGV é especificado em ambiente de atuação através de um vetor de configuração q^I , onde possui dois graus de liberdade (posição e orientação) conforme a equação (2.8.1):

$$q^I = \begin{bmatrix} \text{Posição} \\ \text{-----} \\ \text{Orientação} \end{bmatrix} \Rightarrow q^I = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.8.1)$$

Para o modelo cinemático do AGV, são levadas em consideração algumas restrições de mobilidade e não holonomia:

1. Assume-se que o AGV percorre sua trajetória sobre uma superfície plana;
2. O AGV não realiza movimentos laterais, ou seja, não existem forças que resultam em um escorregamento lateral;
3. As forças atuantes no AGV são forças que o impulsionam para frente e para trás, entretanto sem patinação;
4. O único ponto de contato entre a superfície de trajetória e o veículo é a roda.

Considera-se ainda que:

$$V_D = r\omega_D \text{ e } V_E = r\omega_E, \quad (2.8.2)$$

onde, V_D e V_E são respectivamente a velocidade linear da roda direita e esquerda, e ω_D e ω_E são as velocidades angulares dos respectivos eixos, e r é o raio das rodas. Por meio da equação (2.8.2) é possível definir a velocidade linear do AGV denotado por V_{total} , equação (2.8.3), a velocidade angular denotada por ω_{total} , equação (2.8.4), e L como sendo a distância entre as rodas:

$$V_{total} = \frac{V_D + V_E}{2}, \quad (2.8.3)$$

$$\omega_{total} = \frac{V_D - V_E}{L}, \quad (2.8.4)$$

A velocidade linear do veículo pode ser decomposta ao longo do eixo das abscissas e das ordenadas respectivamente conforme a equação (2.8.5):

$$V_x = V \cos(\theta) \text{ e } V_y = V \sin(\theta), \quad (2.8.5)$$

onde, θ é o ângulo de orientação do AGV. Sendo assim, um modelo cinemático para o AGV seguidor de linha pode ser descrito como:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V_x, \\ \dot{y} &= V_y, \\ \dot{\theta} &= \omega.\end{aligned}\tag{2.8.6}$$

Substituindo as equações para V_x , V_y e $\dot{\theta} = \omega_{\text{total}}$, tem-se que:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \frac{V_D + V_E}{2} \cos(\theta), \\ \dot{y} &= \frac{V_D + V_E}{2} \sin(\theta), \\ \dot{\theta} &= \frac{V_D - V_E}{L}.\end{aligned}\tag{2.8.7}$$

Adicionalmente às condições de velocidades, a equação cinemática do AGV pode ser expressa através da matriz de rotação R , conforme na equação (2.8.11):

$$\dot{e}_r = R(\theta)\dot{e},\tag{2.8.8}$$

$$\dot{e} = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta})^T,\tag{2.8.9}$$

$$\dot{e}_a = (\dot{x}_a \ \dot{y}_a \ \dot{\theta}_a)^T,\tag{2.8.10}$$

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix}.\tag{2.8.11}$$

A restrição não holonômica do sistema pode ser representada pela equação (2.8.12).

$$\dot{x} \cos(\theta) - \dot{y} \sin(\theta) = 0.\tag{2.8.12}$$

O modelo cinemático completo do AGV é apresentado na figura 2.15, onde é possível compreender a forte dependência entre os graus de liberdade do AGV causadas pela restrição não holonômica.

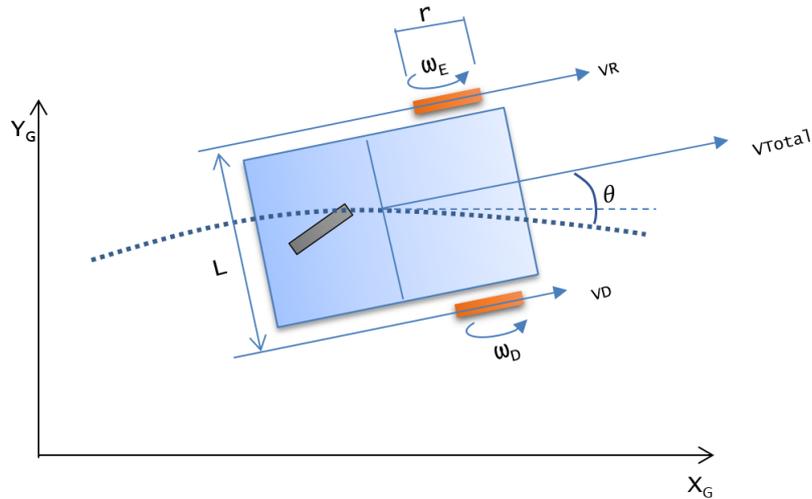


Figura 2.15 - Configuração cinemática do AGV.

2.10 Dinâmica dos Atuadores

A composição do eixo de atuadores do veículo segue a premissa de uso de motores DC, onde esses motores geram os torques necessários para acionamento das rodas do AGV.

O comportamento desses sistemas atuadores vai um pouco além dessas variáveis supracitadas, ou seja, seu comportamento pode ser influenciado pela corrente i_a , resistência (elétrica) de armadura R_a e indutância de armadura L_a . As resultantes dessas variáveis compõem um circuito elétrico de armadura.

Neste projeto de pesquisa considera-se que o AGV em questão é comandado por dois atuadores do tipo DC, um motor para atuação na roda esquerda do veículo e um motor para atuação na roda direita do veículo. Sendo assim, as variáveis de corrente e tensão dos motores direito e esquerdo são representadas, respectivamente, pelos vetores:

$$i_a = \begin{bmatrix} i_{ad} \\ i_{ae} \end{bmatrix}, u_a = \begin{bmatrix} u_{ad} \\ u_{ae} \end{bmatrix}, \quad (2.9.1)$$

em que nas equações vetoriais (2.9.1) o subíndice *d* refere-se a direito e o subíndice *e* refere-se a esquerdo.

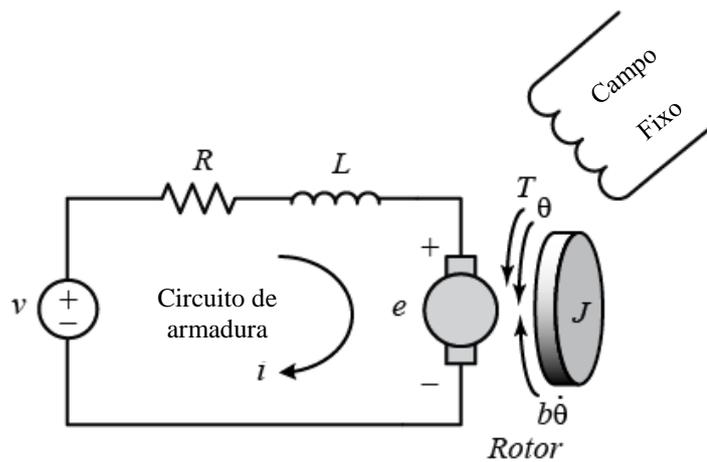


Figura 2.16 - Representação de um motor DC (Adaptado de :EL YOUSSEF, 2013).

Ao analisar motor DC partindo do seu estado de repouso, sofre a ação de um regime transitório, que dependendo do objetivo de estudo não necessita ser considerado, como por exemplo, no estudo de máquinas elétricas, fato distinto quando o interesse é a concepção de sistemas de controle, pois as características dinâmicas do sistema têm ligação direta com o regime transitório, e a estratégia de controle adotada para garantir desempenhos aceitáveis do sistema (OGATA, 2010). Avaliando o modelo dinâmico dos atuadores em um regime transitório é necessário levantar o modelo matemático, baseando nas equações elétricas, mecânicas e eletromecânicas, conforme a Figura 2.16.

Mapear as equações matemáticas dos atuadores, e seu modelo dinâmico são de grande importância no objeto de estudo, pois contemplam partes da dinâmica geral do veículo. Para os atuadores utilizados nesta proposta, é considerada a descrição dinâmica sob a forma de equações diferenciais de segunda ordem obtidas através de associações das leis de Newton para a rotação do motor com as leis de Kirchhoff para os circuitos elétricos.

A ação de giro do motor dar-se-á devido ao fenômeno de indução, caracterizado por uma diferença de potencial entre os terminais da armadura, v . Essa tensão disposta por uma força contra eletromotriz e é proporcional à velocidade de rotação, (velocidade angular) do motor. Se k_e é a constante de proporcionalidade, caracterizado como constante de tensão ou constante de força contra eletromotriz então:

$$e(t) = k_e \cdot \omega(t), \quad (2.9.2)$$

onde $e(t)$ é a tensão induzida, medida em *volt* e $\omega(t)$ a velocidade angular do motor dada em rad/s. Sendo assim, a tensão induzida nas espiras do motor pode ser deduzido como sendo diretamente proporcional a sua velocidade de rotação $\omega(t)$.

Para a componente mecânica, o que gira no motor é seu rotor que possui determinada massa e geometria. Sendo assim é dado J como um momento de inércia. Adicional a essas componentes, existe atrito entre as partes, definido através da constante de atrito k_b . Observando a Figura 2.16 é possível analisar a parte correspondente à parte elétrica do motor assim como a parte mecânica, onde por meio das leis de malhas de Kirchhoff, tem-se:

$$v(t) - e(t) - L \frac{di(t)}{dt} = R i(t) \Rightarrow v(t) = e(t) + L \frac{di(t)}{dt} + R i(t). \quad (2.9.3)$$

Relativamente para a componente mecânica tem-se:

$$\tau_b(t) = k_b \omega(t), \quad (2.9.4)$$

para o momento de torque associado a força de atrito e:

$$\tau_m(t) = k_m i(t), \quad (2.9.5)$$

para o momento de torque desenvolvido pelo motor, onde k_m é denominado constante de torque e expressa em Nm/A. Associando as equações para atender a segunda lei de Newton para o movimento rotacional, obtêm-se:

$$\tau_m(t) - \tau_b(t) = J \alpha(t), \quad (2.9.6)$$

onde $\alpha(t)$ é a aceleração angular expressa em rad/s^2 . Sendo assim a resultante é:

$$k_m i(t) - k_b \omega(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2.9.7)$$

aplicando a transformada de Laplace nas equações acima, é possível gerar as equações em termos de Laplace (s):

$$v(s) = (R + Ls) i(s) + e(s), \quad (2.9.8)$$

$$\tau_b(s) = k_b \omega(s), \quad (2.9.9)$$

$$\tau_m(s) = \tau_b(s) + (Js + B)\omega(s). \quad (2.9.10)$$

Sendo assim é possível determinar o diagrama de blocos do motor, onde a entrada é a tensão e a saída à velocidade angular em rad/s, conforme a Figura 2.17.

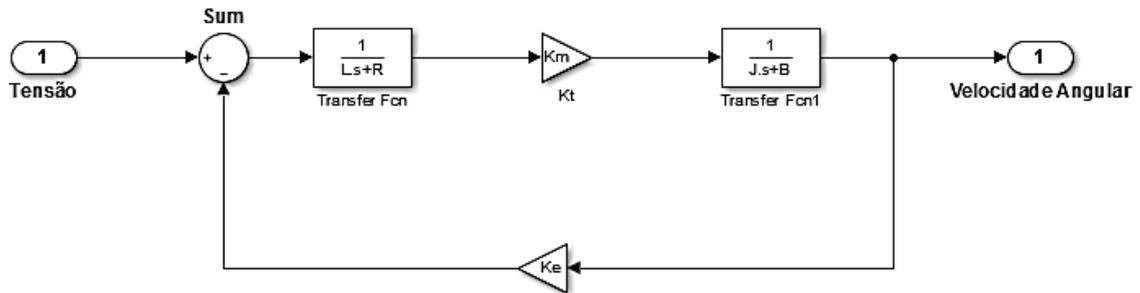


Figura 2.17 - Diagrama de Blocos do Motor DC.

Traduzir as variáveis do sistema dinâmico dos atuadores em valores de tensões possibilita obter como resultante a posição angular do sistema, assim como as velocidades angulares de cada um dos motores atuadores e rodas do veículo, sendo essas componentes intrinsecamente ligadas à cinemática e dinâmica e as velocidades lineares e angulares do sistema.

2.11 Considerações finais

O referencial teórico aqui apresentado serve de base para a compreensão das equações que regem o sistema de movimentação do veículo, bem como a teoria dos métodos *Fuzzy* e Controle Adaptativo, conceitos fundamentais na contribuição para a síntese do controlador com foco no objeto de estudo deste trabalho, o AGV seguidor de linha, onde é demandado um sistema de controle que sensível a variações dinâmicas e que seja passível que seus parâmetros se adaptem frente a essas variações dinâmicas.

Capítulo 3

SISTEMA DE CONTROLE PARA AGV

Com o objetivo de realizar a revisão bibliográfica de forma estruturada, relacionada diretamente com o tema abordado, auxiliando no estudo de terminologias e conceitos teóricos utilizados, bem como auxiliar na síntese de trabalhos relacionados e fontes de consulta, foram utilizados 3 (três) métodos de condução da revisão bibliográfica.

Este capítulo busca abordar o problema de seguimento de trajetória para AGVs seguidores de linha, estruturando trabalhos encontrados na bibliografia da seguinte forma:

1. Trabalhos que trazem as mesmas técnicas propostas neste trabalho de pesquisa, porém levando em consideração outras áreas de aplicação, buscando compreender qual o potencial de aplicação das técnicas aqui propostas, ou seja, as mesmas técnicas utilizadas em outras aplicações;
2. Trabalhos que apresentam técnicas diferentes das propostas por esta pesquisa, onde tais abordagens são objetivadas a resolver o problema de seguimento de trajetória para AGVs seguidores de linha com focos na posição e/ou orientação do veículo, e abordagens na cinemática dinâmica do veículo;
3. Trabalhos que apresentem abordagens utilizando técnicas semelhantes as propostas e cujo o objetivo e problema abordados são semelhantes, ou seja, abordagens onde são empregados controles *Fuzzy* adaptativo para AGVs, considerando a cinemática e dinâmica do veículo.

A revisão bibliográfica apresenta alguns trabalhos onde o objeto de estudo são *mobile robots* seguidores de linha, apesar de ser diferentes da abordagem desta pesquisa, os *mobile robots* possuem características de mobilidades semelhantes, corroborando para a aplicação no AGV desta proposta. Uma característica dos AGVs, é que se enquadram dentro do conceito de sistemas não lineares, ou seja, suas variáveis mensuradas são aleatórias e não previsíveis. São sistemas com características de comportamento aperiódicos, sendo assim existe uma

dependência do seu estado futuro com o estado atual, dependência esta percebida com a evolução do tempo frente ao comportamento das mudanças ocorridas no presente. Nas estratégias de controle de sistemas não lineares, busca-se fazer com que as variáveis de saída do sistema se aproximem de um determinado ponto de referência e estabilize seu valor próximo a esse valor de referência.

Técnicas de controles dentro da grande área de controle inteligente permite que esses sistemas demonstrem em seus resultados alguma garantia de qualidade, eficiência e segurança no controle de um processo como é o caso do estudo realizado por Behmenburg (1993), que apresenta o ajuste de um controlador *Fuzzy* por um modelo de referência, onde a saída do controlador proposto utiliza o modelo inverso da planta e uma abordagem onde a saída desejada do controle *Fuzzy* é obtida através da aplicação de gradiente para adaptação dos parâmetros do controlador.

Outra abordagem de sistemas não lineares com arranjos *Fuzzy* e parâmetros de adaptação é o trabalho de Koo (2001) onde é proposto um esquema de controle *Fuzzy* adaptativo por modelo de referência. A estratégia usa a linearização de feedback adaptativo para uma classe de sistemas não lineares. As leis de adaptação são baseadas no segundo método de Lyapunov, permitindo a derivação das leis de adaptação do controlador *Fuzzy* com foco na estabilidade, desempenho e robustez do sistema. A viabilidade da aplicação destas técnicas foi demonstrada, considerando o controle de um pêndulo invertido na sequência de uma resposta associado ao modelo de referência.

Callai, Coelho e Coelho (2007), investigam diferentes estratégias de adaptação por modelo de referência, onde são estruturadas abordagens com o uso da técnica de controle Proporcional e Integral (PI), associados a uma estrutura de adaptação *Fuzzy*. Neste mecanismo de adaptação é observado como estão às entradas e saídas da planta e suas alterações em relação ao valor de referência, ou seja, a magnitude do seu erro, onde a análise desta variação de erro resulta no ajuste do controlador PI. A estratégia é aplicada em um exemplo de sistema não linear de um balanço horizontal, estruturado com uma haste horizontal e hélices conectadas as suas extremidades, e um potenciômetro conectado ao eixo central com o objetivo de posicionar a hastes em ângulos pré-determinados através do controle da velocidade de rotação das hélices.

Na área de microeletrônica Fei e Zhou (2012), propõe a estratégia de controle adaptativo utilizando um compensador *Fuzzy*, responsável por compensar as incertezas do sistema e distúrbios externos, garantindo a convergência e a estabilidade do sistema em malha fechada.

A proposta é aplicada a um giroscópio triaxial. As validações da abordagem comprovam a robustez do sistema adaptativo com um compensador Fuzzy em comparação com o método convencional de controle adaptativo. Já em outra abordagem de aplicação o trabalho de Su, Xu e Li (2016) apresentam problemas de controle climático de uma estufa onde se busca controle de umidade, temperatura e ventilação usando um controle Fuzzy adaptativo onde as variáveis são mensuradas e a adaptação ocorre frente à análise dos erros confrontados com os valores de referência.

Abordagens adaptativas de controle de sistemas não lineares e controle Fuzzy são também apresentadas por Cho, Park e Mignon (2002), Blazic, Skrjanc e Matko (2003), Yang, Zhou e Ren (2003), Gu, Zhang e Shen (2006), Feng (2006), Nounou e Rehman (2007) e Lee et al. (2007), Zhou, Li, e Shi (2015), Lai et al. (2015), que semelhante aos trabalhos anteriormente descritos, demonstram o uso da técnica, permitindo analisar os meios variados de aplicações dessas técnicas, bem como os resultados alcançados para possível adoção nesta proposta de mestrado. Ainda assim é necessário verificar como vem sendo abordados as técnicas e variáveis para o problema do AGV seguidor de linha.

Outro ponto característico desses veículos é quanto às suas restrições não holonômicas, e os problemas a eles associados: estabilização em um ponto de equilíbrio (*point stabilization*), estabilização de trajetória (rastreamento de trajetória – *trajectory tracking*) e estabilização em uma trajetória parametrizada (seguimento de caminho – *path-following*) (ORTIGOZA et al., 2012), (MORION e SAMSON, 2008), (AGUIAR e HESPANHA, 2007), melhor visualizado a centralidade do problema na figura 3.1:

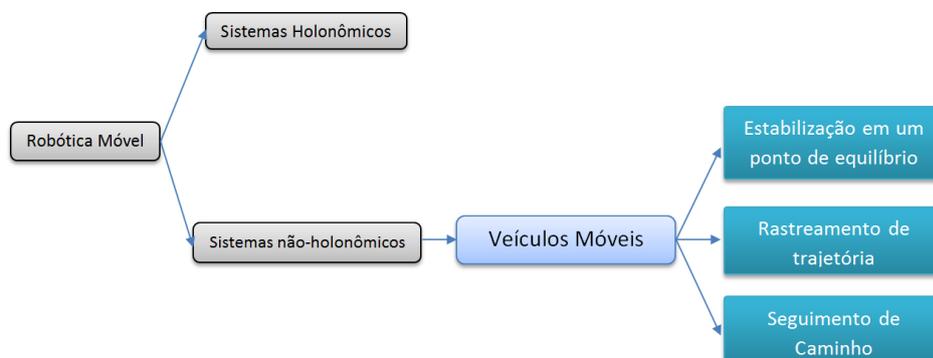


Figura 3.1 - Localização do problema dentro da área de sistemas não-holonômicos.

Limitando a bibliografia existente a veículos não holonômicos, é possível verificar as principais técnicas de controle utilizadas para o problema de o veículo seguir a trajetória e que

analisam posição e orientação do veículo em relação à linha. Em sua maioria abordam as estruturas de controle baseados no fato de realizar a análise do erro de posição e orientação do veículo de forma temporal em relação à trajetória, podendo assim, mensurar estratégias de correções aplicadas ao veículo.

Rezende *et al.* (2011), apresenta um controlador Fuzzy para rastreamento de trajetória aplicado em um robô móvel do tipo uniciclo, onde são consideradas algumas variáveis, como por exemplo, a distância das rodas entre o eixo de tração e a distância entre o ponto de interesse de veículo e o centro do eixo de tração. Nessa abordagem é mensurado o erro da posição e orientação do veículo, que são aplicados nas entradas do controlador, onde através das regras de inferência são traduzidas em componentes vetoriais de velocidades aplicadas na cinemática inversa para gerar as velocidades angulares e lineares do veículo. Os resultados são demonstrados em trajetória circular, lineares e com formato do número oito-“8”, formas essas tradicionais nos trabalhos levantados na revisão bibliográfica.

Borges, Lima e Deep (2000), apresenta uma estrutura com realimentação direta da saída. Tomando como variáveis mensuradas a distância entre o centro do veículo e o centro da trajetória e a orientação angular do veículo em relação à trajetória. São abordados como controle: um controlador proporcional, um controlador linear, e um controlador Fuzzy. Também são usados dois controladores adaptativos independentes baseados na estratégia de modelo de referência, associando as velocidades de referência com as velocidades fornecidas pelo controlador. As simulações aqui propostas ilustram através de comparação entre as três estratégias de controle o desempenho do sistema de controle e suas limitações considerando o erro de trajetória, onde a estratégia de controle Fuzzy apresenta melhores resultados.

Outra técnica aplicada ao problema de rastreamento de trajetória é abordada em Martins et al. (2011), onde é estruturado um Controle a Estrutura Variável propondo o uso de redes neurais de funções de bases radiais. O sistema de controle foi validado mediante simulações de trajetória reta, elipse, em formato de oito analisando os erros de posição e orientação que chegaram próximos à zero com o uso das redes neurais.

Contemplando uma fusão de técnicas Xu, Kan e Yan (2014), apresentam um controlador Fuzzy PID para o rastreamento de trajetória em *mobile robot*. O sistema de controle Fuzzy possui duas entradas, sendo os erros de posição e orientação do veículo, e três saídas sendo essas responsáveis pelo ajuste do controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID). As simulações são desenvolvidas no simulink em diferentes condições: com erros iniciais e sem

erros iniciais, onde são aplicadas em trajetórias semelhantes a dos trabalhos supracitados, porém com condições iniciais diferentes. Os resultados apresentam que o veículo com a estratégia de controle Fuzzy PID tem capacidade de seguir a trajetória com 3 segundos de vantagem e com um *overshoot* reduzido em 40%, comparado com a variação do PID-P, PI, PID- como sistema de controle. Uma estrutura semelhante é abordada por Li *et al.* (2016), onde a diferença entre as duas abordagens é a aplicação de um filtro de Kalman para os ruídos do sistema, e a não variação do PID. Da mesma forma, os resultados apresentados corroboram para a fusão das técnicas Fuzzy e PID, e também demonstram que apenas o PID resulta em uma menor estabilidade e tempo de acomodação do sistema.

A aplicação de métodos clássicos de controle no rastreamento de trajetória, também é abordada por Gomes et al. (2016), onde em um veículo uniclo é aplicado um controlador PID, associado a um sistema de segmento de linha através de uma câmera, onde são analisadas apenas a orientação do veículo em relação a linha através de medições geométricas e a velocidade linear do veículo foi aplicada de forma arbitrária. As simulações foram desenvolvidas em ambiente de simulação e apresentam viabilidade em aplicações com velocidades lineares baixas.

Nos trabalhos supracitados, onde são abordados os problemas de seguimento de trajetória, bem como durante a execução da revisão, apesar de a bibliografia existente apresentar uma variedade de técnicas e seus resultados apresentarem contribuições para a estabilidade e acurácia do veículo, alguns pontos comuns entre os trabalhos requerem atenção, como por exemplo, em todos os trabalhos a velocidade linear e angular do veículo são impostas e ditadas mediante a resultante da cinemática, seja ela direta e/ou inversa, fato este criterioso ao se pensar que para um sistema de aplicação, ou seja, um sistema de controle, que em alguns casos são aplicados em veículos reais e simulados, assumir ou impor que as velocidades atuam com perfeito rastreamento e desempenho, significa dizer que uma velocidade calculada é aplicada instantaneamente, não apresentando nenhum efeito transitório e ocorrência de erros. Sendo assim, pouco provável tonificar assertivas quanto à aplicação, visto que em cenários reais as velocidades desempenhadas pelo veículo podem variar ocasionadas por fatores externos e internos, onde este último tem como exemplo, a dinâmica dos atuadores e/ou a dinâmica geral do veículo, fato negligenciado em todos os trabalhos supracitados que tratam o seguimento de trajetória.

A não inclusão da dinâmica dos atuadores e/ou a dinâmica do veículo possibilita proposições invalidadas quando aplicada, pois se trata de sistemas não lineares com características não holonômicas e com mecanismos de atuação dinâmicos, cujas variáveis estão ligadas ao movimento do veículo, como exemplo a inércia.

No trabalho de Park *et al.* (2009) é proposto uma abordagem de controle adaptativa para rastreamento de trajetória aplicada *mobile robot* considerando a dinâmica dos atuadores. Neste trabalho o autor considera que os parâmetros de cinemática e dinâmica do veículo, e dinâmica dos atuadores são incertos. Utilizando metodologia de controle por modos deslizantes. Através da teoria de estabilidade de Lyapunov, são derivadas leis de adaptação que corroboram a adaptação para os sinais gerados pelo sistema de controle. Já Zhengcai, Yingtao e Qidi (2011), também apresentam um controle adaptativo para um *mobile robot* com foco no seguimento de trajetória. A estratégia de adaptação é aplicada primeiramente ao controle cinemático para gerar velocidades com retroalimentação desta primeira parte do sistema de controle. A segunda parte do sistema de controle é um controlador adaptativo para dinâmica do veículo, onde associado à cinemática, torna as velocidades geradas na primeira etapa alcançadas na segunda etapa de controle. Em paralelo um sistema de controle de referência é utilizado para ajuste das regras de adaptação. A simulação da lei de controle é validada em casos nominais e perturbados.

Taheri-Kalani e Khosrowjerdi (2013) propõem uma abordagem com base nos erros gerados na cinemática e na dinâmica. São utilizados um controlador cinemático baseado na abordagem de linearização de *feedback* e um controlador dinâmico baseado no controle adaptativo de referência do modelo de acordo com presença de distúrbios. Associada a essa estrutura existe um observador de distúrbios, baseado na desigualdade da linearização do sistema, responsável por estimar as perturbações do sistema. A abordagem é aplicada em um *mobile robot*.

Raeisi, Shojaei e Chatraei (2015), utilizam uma rede neural e um observador linear para compor o sistema de controle, esta abordagem faz medição apenas da posição do *mobile robot*. Os controladores propostos empregam leis de controle adaptativo-neurais do tipo saturação para compensar parâmetros incertos, dinâmicas não modeladas e perturbações. As análises de estabilidade baseadas em Lyapunov são utilizadas para garantir que os erros de rastreamento são uniformemente limitados e convergem exponencialmente para erros pequenos.

Ainda baseados na dinâmica com foco no seguimento de trajetória, tendo como parâmetros a orientação e posição do veículo, existe ainda os trabalhos de Corradini e Orlando

(2001), que utilizando uma lei estruturada de controle robusto a incertezas do sistema utilizando a técnicas de modos deslizantes. Outro trabalho que tem possui uma forma de validação característica quanto a essa proposta e pesquisa de mestrado, é o trabalho de Martins *et al.* (2008), que propuseram uma lei adaptativa que ajustava o parâmetro de inércia desconhecida, a validação do trabalho apresenta variações de cargas transportadas pelo veículo, não sendo essas mensuradas pelo sistema.

Com abordagens dinâmicas em AGV's ainda existe os trabalhos Kwak e Park (2012) que descreve o desenvolvimento de um controle Proporcional-Derivativo adaptativo, que se adapta frente aos erros recorrentes da dinâmica dos atuadores do veículo. Fierro e Lewis (1996), apresentam a modelagem da estrutura dinâmica e cinemática do veículo, utilizando um controlador robusto adaptativo associados a uma rede neural, para ajustes dos parâmetros adaptativos. A abordagem proposta por Fierro e Lewis (1996) torna possível utilizar outras técnicas de controle para ajuste dos parâmetros adaptativos, como por exemplo, um controle *Fuzzy*. Das e Kar (2006) apresentam o design e implementação de um controlador *Fuzzy* com atualização de parâmetros dinâmicos através das regras de adaptação.

Olivares-Mendez et al. (2013), aplica o sistema de controle desenvolvido em um veículo urbano real, de forma que o controlador *Fuzzy* seja robusto a incertezas de posição e velocidades do veículo. A validação da abordagem é aplicada em cenários reais e ruas urbanas demonstrando bom desempenho. Yang e Wang (2012) utilizam a modelagem dinâmica e cinemática do veículo para criar regras de adaptação robusta para o seguimento de trajetória, levando em consideração as variações paramétricas do sistema.

A revisão bibliográfica buscou direcionar a trabalhos que além de tratar problemas de seguimento de trajetória utilizando a cinemática, trabalhos que apresentem à dinâmica. Onde foi possível verificar como são abordadas as técnicas quando consideradas a dinâmica dos atuadores e/ou a dinâmica geral do veículo.

Para auxiliar a condução da revisão, foi utilizado o software Start, versão 2.3.4, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES) do departamento de computação da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), [http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool].

Capítulo 4

PROPOSTAS DE TRABALHO

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é apresentada a proposta do sistema de controle fuzzy adaptativo para um AGV seguidor de linha com tração diferencial, com o objetivo de analisar a forma que o AGV segue a trajetória, sempre contemplando aspectos de acurácia e precisão.

A proposta de trabalho traz detalhadamente como o controlador foi modelado e como ele pretende atuar frente às incertezas que afetam o veículo, incertezas essas, pautadas nas variáveis mensuradas, orientação e posição do veículo em relação a linha, associando a adaptação no sistema de controle *fuzzy* proposto.

A abordagem de adaptação nesta proposta está relacionada à ocorrência de fenômenos dinâmicos ligados à movimentação do veículo, para que o sistema de controle proposto seja sensível ao ponto de adaptar -se frente aos erros no seguimento de trajetória. Esses erros são mensurados por meio de um valor de referência para o sistema de controle e os valores das variáveis de posição e orientação do veículo.

Por fim, serão abordadas as considerações finais a respeito da proposta e o que se espera com a execução da mesma.

4.2 Sistema de Controle

O capítulo 3 – Sistemas de Controle para AGV, apresenta algumas técnicas de controle aplicadas em objetos de estudo semelhante ao desta pesquisa, voltados sempre ao objetivo de controlar o AGV ao longo do seguimento de trajetória. Assim, fornecendo indícios de modelagem para um sistema de controle que busque a estabilização e acurácia do veículo.

Nesta pesquisa optou-se por uso da lógica *fuzzy*. O sistema aqui modelado propõe manter o posicionamento e orientação do veículo com erros próximos ao valor de referência do sistema. Com a aplicação do sistema de controle *fuzzy* adaptativo nesses veículos, tornar-se-á possível o tratamento dos fenômenos dinâmicos ocorridos no seguimento de trajetória, necessitando apenas que os sinais de controle mapeados, baseados na experiência heurística do especialista através das variáveis linguísticas, contemplem as variações do sistema.

O sistema de controle aqui proposto é caracterizado como Mamdani, por ser sistemas de fácil modelagem e basear-se na intuição do fenômeno (MAMDANI, 1973).

Para esta pesquisa supõe-se que o veículo se movimenta para frente e através das suas restrições não holonômicas, realizando a movimentação ao longo da trajetória e que o fato de controlar posição e orientação do veículo, obtendo como resultante os valores de velocidade, apresente resultados satisfatórios no seguimento de trajetória.

Um sistema de controle é constituído de alguns componentes que possuem funções para obtenção das saídas, baseado em informações das entradas do sistema. Para representação das funções desempenhadas de cada componente do sistema de controle, assim como o fluxo das informações desde a entrada até a saída, representado através de setas, normalmente é utilizado uma estrutura gráfica para representação do sistema conhecida como diagrama de blocos (OGATA, 2010).

A funcionalidade dessa forma de representação gráfica por diagrama de blocos se dá no fato de que: a visualização da estrutura de controle acaba sendo perceptível e entendível, ao contrário de uma análise do sistema de controle já em um ambiente físico de atuação. Com esse propósito, a Figura 4.1 apresenta o diagrama de bloco representando o sistema de controle e o objeto atuado, que no caso desta proposta de pesquisa é o AGV seguidor de linha com tração diferencial.

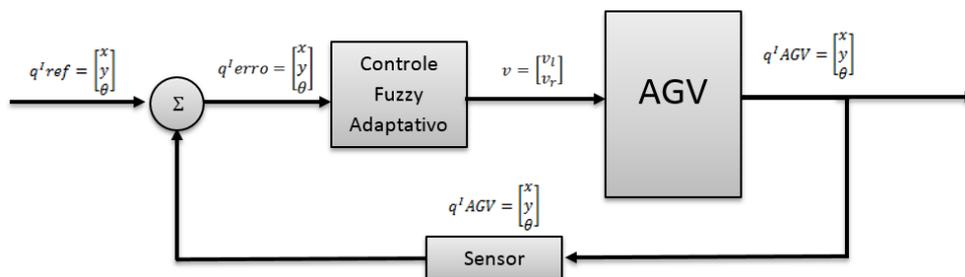


Figura 4.1 - Diagrama de blocos do sistema de controle.

O diagrama de blocos apresenta as variáveis de entrada e saída do sistema. Como variáveis de entrada do sistema são impostos valores de referência para posição e a orientação do veículo, que nesta abordagem o valor de referência é 0 (zero), valor este que o sistema de controle buscará sempre atingir. Como variáveis de saída são as resultantes de posição e orientação do veículo.

Como entradas do sistema de controle, são utilizados erros resultantes dos valores de referência e posição e orientação do veículo, que passando pelo sistema de controle *fuzzy* adaptativo resultam nas saídas do sistema de controle que são as velocidades de cada uma das rodas do veículo.

A escolha de *fuzzy* adaptativo como técnica de controle é abordada visando um mapeamento detalhado do fenômeno dinâmico do veículo, da adaptação do sistema de controle frente a esse fenômeno e os erros ocorridos no seguimento de trajetória, sendo essas características mapeadas intuitivamente pelo especialista através de categorização linguística.

Para obter os valores de posição e orientação do veículo é necessário mecanismo de sensoriamento, que nesta pesquisa é aplicado uma câmera posicionada no ponto estratégico a frente do veículo.

Neste processo de sensoriamento com a câmera, são utilizadas técnicas de visão computacional, o que possibilita detectar um trecho da linha de cor contrastante com o solo e determinar à qual distancia d , diferentes pontos centrais da linha estão o eixo geométrico central do veículo, bem como, determinar qual a orientação θ , figura 4.2.

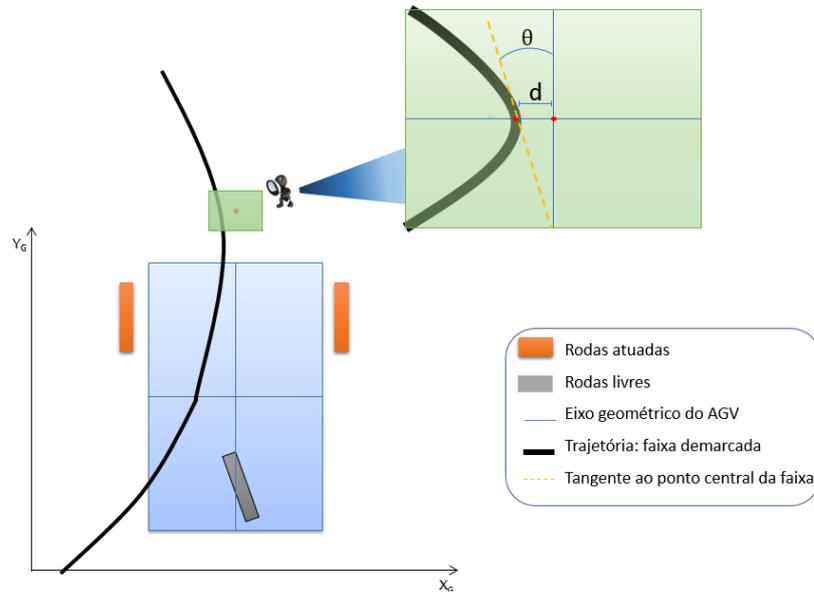


Figura 4.2 – Momento de captura da câmera e obtenção da informação de distância e orientação.

Os ferramentais técnicos aplicados na câmera ocorrem em duas etapas, sendo elas:

- Pré-processamento da imagem: nessa etapa o principal foco é identificar na imagem gerada pela câmera, figura 4.3, o que é a linha de trajetória do veículo, sendo necessário a remoção de qualquer tipo de ruído na imagem e também objetos no campo de visão da câmera que possam interferir na identificação da linha, onde para isso é utilizado técnicas de pré-processamento de imagens, figura 4.4.

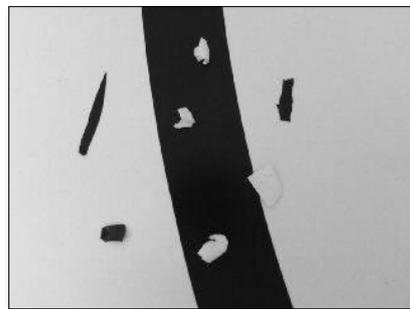


Figura 4.3 – Imagem capturada pela câmera

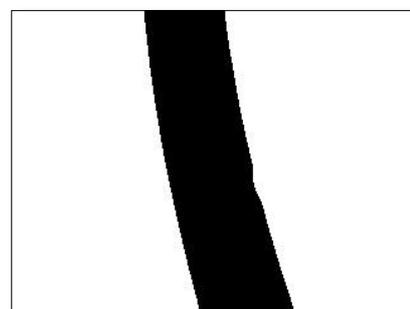


Figura 4.4 - Imagem após etapas de pré-processamento e eliminação de ruídos

- Processamento da imagem: na etapa de processamento, são identificados 5 pontos centrais ao longo da faixa e também quais os ângulos que os segmentos de reta que ligam esses pontos formando a orientação do veículo. O objetivo é determinar 5 pontos centrais ao longo do comprimento da faixa, Figura 4.5, e também quais os ângulos que os segmentos de reta que ligam esses pontos formam em relação a orientação do veículo, Figura 4.6.

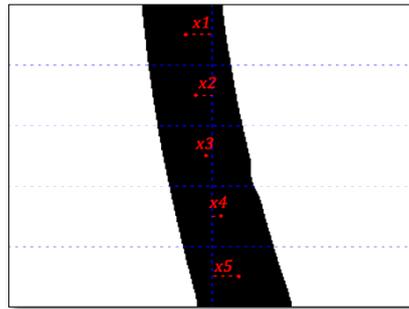


Figura 4.5 – Distância dos pontos ao centro

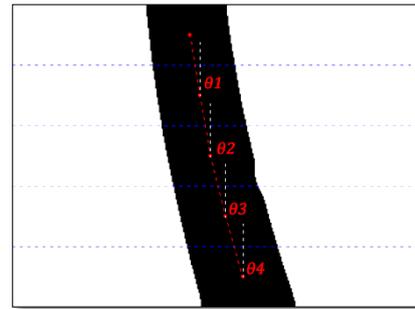


Figura 4.6 – Ângulos entre os segmentos de retas e uma linha imaginária vertical

O processo de obtenção dessas informações está no escopo do projeto, porém advêm de trabalhos desempenhados por outros pesquisadores do laboratório TEAR, onde desde a captura e o pré-processamento da imagem da faixa, até o processamento e obtenção das informações, são aplicados filtros e mecanismos relacionados ao tratamento de imagens (SANTOS, 2016), os quais não serão descritos nesta pesquisa, mas indispensável para o sistema de controle e representado por meio do bloco sensor no diagrama de blocos da Figura 4.1.

A proposta desta pesquisa contempla a modelagem de um sistema de controle *fuzzy* adaptativo para um AGV seguidor de linha com tração diferencial, como mencionado anteriormente, onde no diagrama de blocos é representado pelo bloco **Controle Fuzzy Adaptativo**. A Figura 4.7, apresenta a explosão representativa do bloco de controle dentro do diagrama de blocos, sendo esse bloco o de principal interesse e abordagem por esta pesquisa.

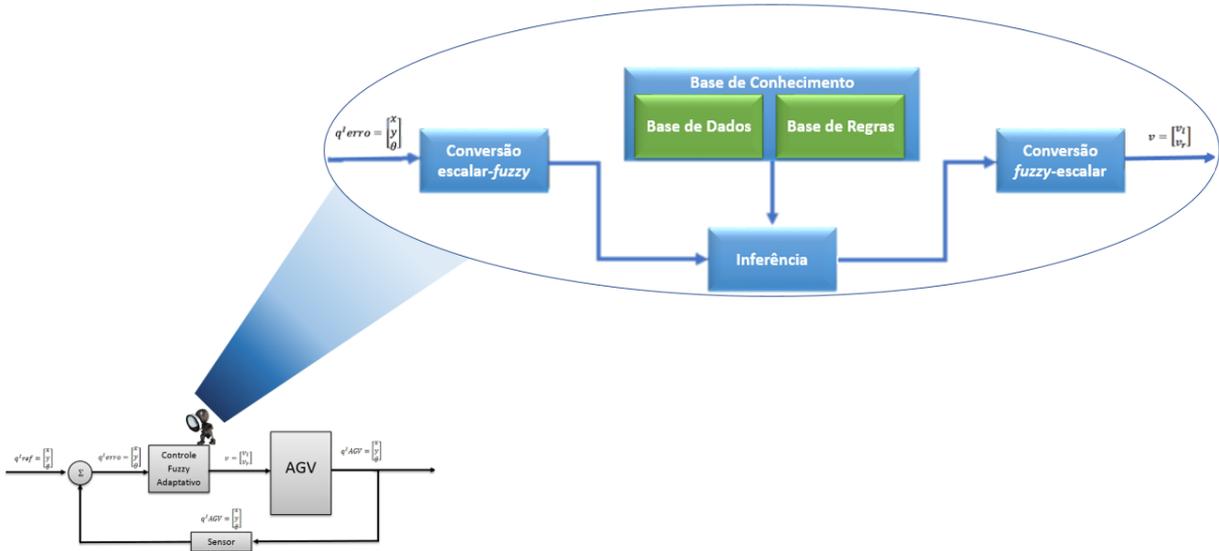


Figura 4.7 – Descrição do sistema de controle fuzzy adaptativo proposto

O sistema de controle utilizado é do tipo Mamdani, com triangulação e trapézios em seus conjuntos e o uso dos operadores de \max , máximo, e \min , mínimo, onde a conjunção opera sobre o mínimo e a disjunção opera sobre o máximo do conjunto no processo de inferência. Para a conversão *fuzzy*-escalar é utilizado o método de centroide. Todas as representações conceituais foram abordadas no capítulo 2 de Fundamentação Teórica, corroborando para a proposta de trabalho.

A composição de toda a estrutura do sistema de controle *fuzzy* adaptativo é crucial para que o veículo obtenha as velocidades a ser desempenhadas, entretanto um aspecto desse sistema de controle é ser adaptativo frente a incertezas e distúrbios dinâmicos que afetam o veículo. Para isso uma importante estrutura a ser modelada dentro do sistema de controle é a base de conhecimento e o processo de inferência.

Essas estruturas do sistema de controle são responsáveis pela tomada de decisão, contemplando os fenômenos de dinâmica de forma qualitativa. Nesse contexto, foram mapeadas variáveis linguísticas características para o problema de seguimento de trajetória, tendo como duas componentes principais a orientação e a distância do veículo em relação à linha. Como resultante do sistema de controle, são mapeadas as componentes de velocidade de cada uma das rodas do veículo, por tratar-se de um veículo com tração diferencial.

A tabela 4.1 apresenta as variáveis linguísticas mapeadas para o sistema de controle proposto, tendo como: 3 (três) variáveis linguísticas referentes a distância e orientação do

veículo aplicadas de forma independentes, assim como e 3 (três) variáveis linguísticas referentes as velocidades desempenhadas em cada umas das rodas.

Tabela 4.1 Variáveis linguísticas: granularidade da base, siglas e descrições.

Distância		Orientação		Velocidade Esquerda		Velocidade Direita	
Sigla	Descrição	Sigla	Descrição	Sigla	Descrição	Sigla	Descrição
N	Negativo	N	Negativo	B	Baixa	B	Baixa
Z	Zero	Z	Zero	M	Media	M	Media
P	Positivo	P	Positivo	A	Alta	A	Alta

Por meio das variáveis linguísticas é possível mapear a ocorrência de fenômenos dinâmicos que resultam em erros do veículo seguindo a trajetória de forma intuitiva, para então modelar a base de regras do sistema de controle *fuzzy* e associar os parâmetros de adaptação do sistema.

Dessa forma são dispostas as variáveis linguísticas para a distância e orientação do veículo através de seu comportamento errôneo ao seguir a trajetória, então são mapeadas quais as melhores velocidades de forma qualitativa a ser atribuída em cada uma das rodas para que o veículo se acomode sobre a trajetória e por fim estruturar a base de regras dentro da base de conhecimento do sistema *fuzzy* adaptativo.

A Figura 4.8 e a Figura 4.9 apresentam o mapeamento das variáveis linguísticas no plano da trajetória referentes à distância d e apresenta o mapeamento das variáveis linguísticas no plano do seguimento de trajetória referente a orientação θ em relação ao campo de visão da câmera.

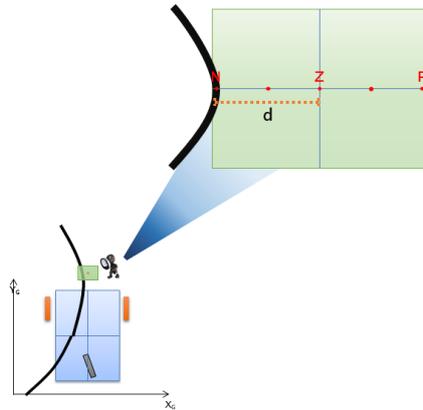


Figura 4.8 – Mapeamento das variáveis linguísticas para a distância.

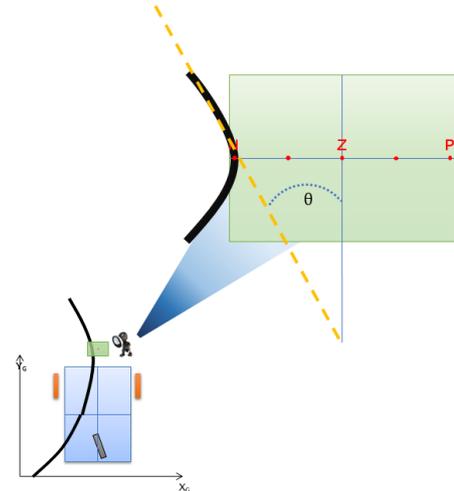
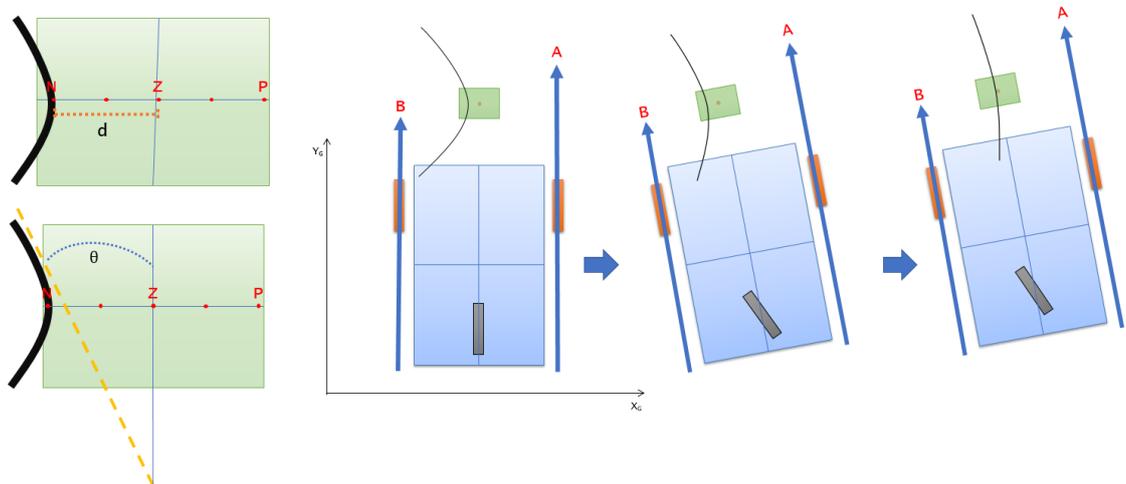


Figura 4.9 – Mapeamento das variáveis linguísticas para a orientação.

Com a associação das variáveis linguísticas e a visualização da ocorrência do fenômeno errôneo sobre a trajetória e o centro do veículo, é possível definir intuitivamente as variáveis linguísticas de velocidade da roda esquerda, V_E , e velocidade da roda direita, V_D que qualificam a correção do fenômeno de erro, demonstrando a estruturação das regras do sistema de controle.

Sendo assim, assumindo que: o valor de referência do sistema de controle é 0 (zero) e coincidente com o centro geométrico do veículo e o centro da câmera, a esquerda do centro geométrico do veículo considera-se como área negativa em relação ao centro e à direita positiva. Dessa forma é possível definir a seguinte regra: quando a distância d é **N – Negativa** ou a orientação θ é **N – Negativa**, a ação a ser tomada é colocar a velocidade da roda esquerda V_E como **B – Baixa** e a velocidade da roda direita V_D como **A – Alta**, buscando a acomodação do centro geométrico do veículo junto ao centro da faixa, Figura 4.10.



se $d = N$ então $V_E = B$ e $V_D = A$

se $\theta = N$ então $V_E = B$ e $V_D = A$

Figura 4.10 – Definição intuitiva de regras para correção de erros de posição e orientação do AGV sobre a linha.

Seguindo essa mesma análise para todos os fenômenos de erros relacionados ao posicionamento a orientação do veículo, a base de regras é constituída. Contendo 3 regras variando as tomadas de decisão de velocidade frente aos erros de orientação e de posição, a tabela 4.2 apresenta as possíveis regras do processo de inferência.

Tabela 4.2 Tabela de Regras de Inferência.

d/θ		V_E	V_D
N	→	B	A
Z		M	M
P		A	B

Ao final da elaboração da base de regras é possível parafrasear o conceito de adaptação, pois um sistema é dito como adaptativo quando estruturado para adaptar-se, ou seja, seja capaz de modificar a sua saída de acordo com a variação dinâmica dos seus parâmetros de entrada (ASTROM e WITTENMARK, 1994). Sendo assim a base de regras do sistema *fuzzy* é adaptada para comportamentos característicos dos possíveis erros no segmento de trajetória, e possui faixas de atuação, onde a faixa de utilização das regras adapta-se de acordo com o fenômeno dinâmico, indo de um fenômeno de erro mais à esquerda até um conjunto de possibilidades de erros mais à direita, além disso do sistema ser estruturado e sintonizado com base no fenômeno, i.e. de acordo com o fenômeno é utilizada uma regra ou uma composição de regras. Com isso a proposta contempla o objetivo de o sistema de controle ser adaptativo ao problema do veículo seguir a trajetória, sempre buscando manter a coincidência do ponto central da linha com o ponto estratégico do centro da câmera.

Como mencionado anteriormente, o sistema *fuzzy* adaptativo abordado por esta pesquisa consiste de suas regras e funções de pertinência baseada na triangulação e trapezoidais, utilizando operadores de MAX e MIM e centroide para conversão *fuzzy*-escalar. A Figura 4.11 apresenta a estrutura do sistema de controle fuzzy adaptativo com suas respectivas entradas,

posição e orientação, e suas respectivas saídas, velocidade da roda esquerda e da roda direita do veículo.

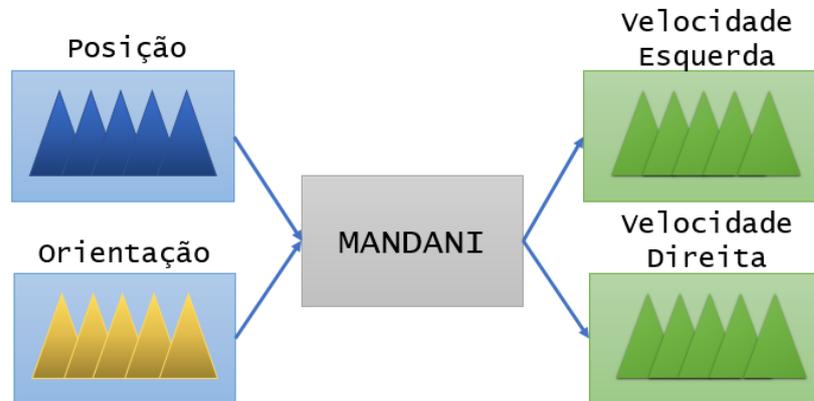


Figura 4.11 – Estrutura de Entradas e Saídas do sistema de controle *fuzzy* adaptativo.

Na Figura 4.12 apresenta o primeiro conjunto de variáveis linguísticas baseadas na distância, porém com intervalos de conjuntos caracterizados com letras apenas como título de demonstração.

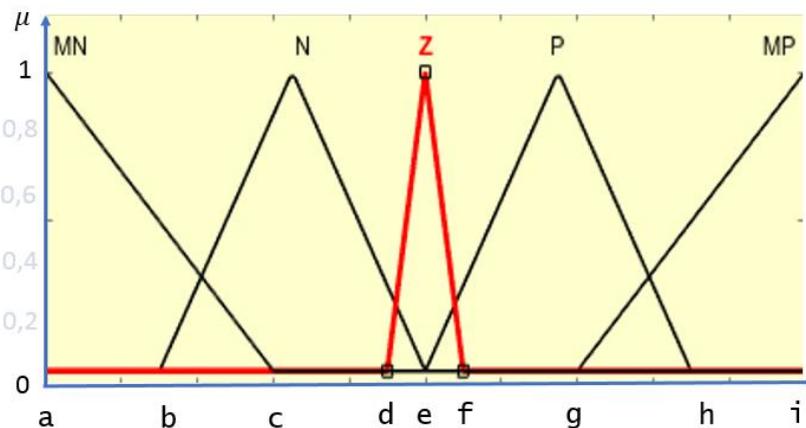


Figura 4.12 – Conjunto de variáveis linguísticas referentes a distância e orientação.

A figura 4.13 apresenta o conjunto de variáveis linguísticas baseadas na velocidade da roda direita, porém os intervalos dos conjuntos também são caracterizados com letras.

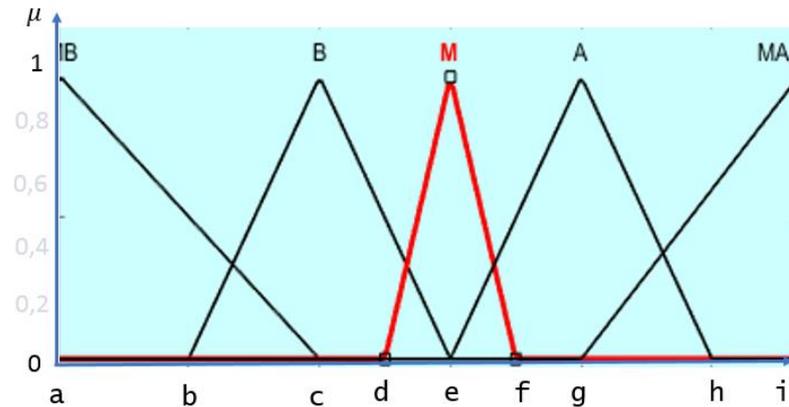


Figura 4.13 – Conjunto de variáveis linguísticas referentes a velocidades impostas às rodas.

Não são apresentadas figuras que representem o conjunto de variáveis linguísticas baseadas na orientação, pois a granularidade do conjunto de orientação e distância são iguais, assim como para as velocidades de cada uma das rodas diferenciando apenas seus respectivos intervalos de conjuntos.

4.3 Considerações finais

Este capítulo apresentou a estrutura da proposta de trabalho desta pesquisa, destacando como são utilizados os conceitos supracitados no capítulo 2 e como é constituído o sistema de controle *fuzzy* adaptativo com base no fenômeno intuitivo de movimentação do veículo pelo ambiente e a forma em que ele está sobre a linha em determinados momentos. O capítulo ainda apresenta a estrutura da base de regras *fuzzy* passível de aplicação no veículo, baseando-se em duas variáveis à serem mensuradas: posição e orientação do veículo em relação a linha. Vale ressaltar que as técnicas de obtenção dessas variáveis são dispostas através de processamentos de imagens não contemplados nessa proposta de pesquisa, não sendo explicado as formas de obtenção dessas informações, pois tais técnicas foram desenvolvidas por meio de outros trabalhos dentro do grupo de pesquisa do TEAR, entretanto, se fazem necessárias sua adoção para atingir o objetivo final desta pesquisa. Diante desta proposta anunciada, a validação dos resultados dar-se-á por meio de cenários de testes e aplicações de métodos comparativos com o sistema de controle *fuzzy* adaptativo, onde essa validação é abordada no capítulo 5 de teste.

Em resumo, a ideia deste trabalho está relacionada ao sistema de controle de um AGV seguidor de linha onde será utilizado um sistema de controle fuzzy adaptativo, com uma base

de regras está pautada sobre a análise intuitiva de movimentação do veículo ao longo da trajetória, tornando a base de regras adaptável ao fenômeno em ocorrência. Em relação ao sistema de controle sua função é manter o veículo com maior precisão e acurácia em relação a linha, mensurando para isso duas variáveis posição e orientação do veículo, obtidas através de uma câmera.

IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são descritos os caminhos e abordagens adotados para o desenvolvimento do sistema de controle *fuzzy* adaptativo proposto. Também é apresentado as formas de validação da pesquisa, que faz o uso de técnicas de controle clássico aplicado às variáveis mensuradas, posição e orientação do veículo em relação a linha. Como técnica de controle clássica, é apresentado o PID (Proporcional, Integral, Derivativo), ilustrando como a técnica é aplicada ao controle do veículo, sendo utilizado para comparação com o sistema de controle fuzzy adaptativo, sendo a última técnica de controle o foco desta pesquisa.

São apresentadas as cargas a serem transportadas no AGV, a fim de testes do sistema de controle, e os cenários de testes, onde são demonstradas as formas de pista com faixa para que o veículo siga a trajetória corroborando para a validação dos resultados.

5.2 Cenários de Teste

Buscando corroborar a validação da proposta, foram estruturados cenários de testes para os sistemas de controle, tanto para o método de controle *fuzzy* adaptativo proposto, quanto para o PID como métodos comparativos, visando sempre que o AGV siga a linha com maior acurácia e precisão. Para isso é utilizado um veículo com tração diferencial, cujo o peso total é 4,583 kg, com dois motores responsáveis pela atuação de velocidade em cada uma das rodas, Figura 5.1.

O AGV deste trabalho é estudado em parceria com as linhas de pesquisa do Grupo de Robótica Móvel do Laboratório de Mecatrônica da EESC-USP e do Laboratório TEAR – UFSCAR.

Para que o sistema de controle atue no veículo, possibilitando o seguimento de trajetória, são necessárias interações entre estruturas tanto físicas quanto computacionais. No AGV desta pesquisa são utilizados dois motores MAXON, juntamente com dois drivers EPOS 24/5, sendo esse conjunto responsável pela atuação de velocidade em cada uma das rodas do veículo.

Na operação desse pacote de hardware com os sistemas de controle fuzzy é utilizado o ROS – *Robot Operating System*, que é um conjunto de bibliotecas e ferramentas de código aberto, com o objetivo de auxiliarem a manipulação de arquiteturas robóticas, envolvendo drivers, hardwares de forma facilitada com os algoritmos de controle desses dispositivos.

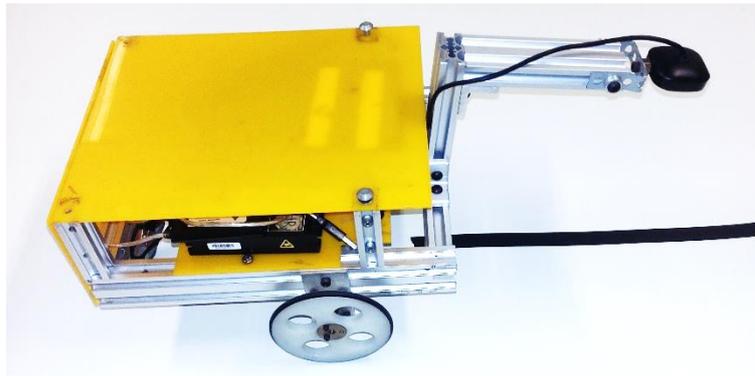


Figura 5.1 – Objeto de estudo: AGV seguidor de linha com tração diferencial.

Como um dos objetivos do controle é: manter o veículo seguindo a trajetória com maior acurácia e precisão, e sendo sensível a ruídos e/ou fenômenos associados a dinâmica de movimentação, como por exemplo a variação de carga, são caracterizados pesos de transporte para este veículo, Figura 5.2, em três níveis: CARGA 01 - veículo vazio, CARGA 02 – veículo com a metade da carga total: 2 Kg e CARGA 03 – veículo com o total de carga: 4 Kg.

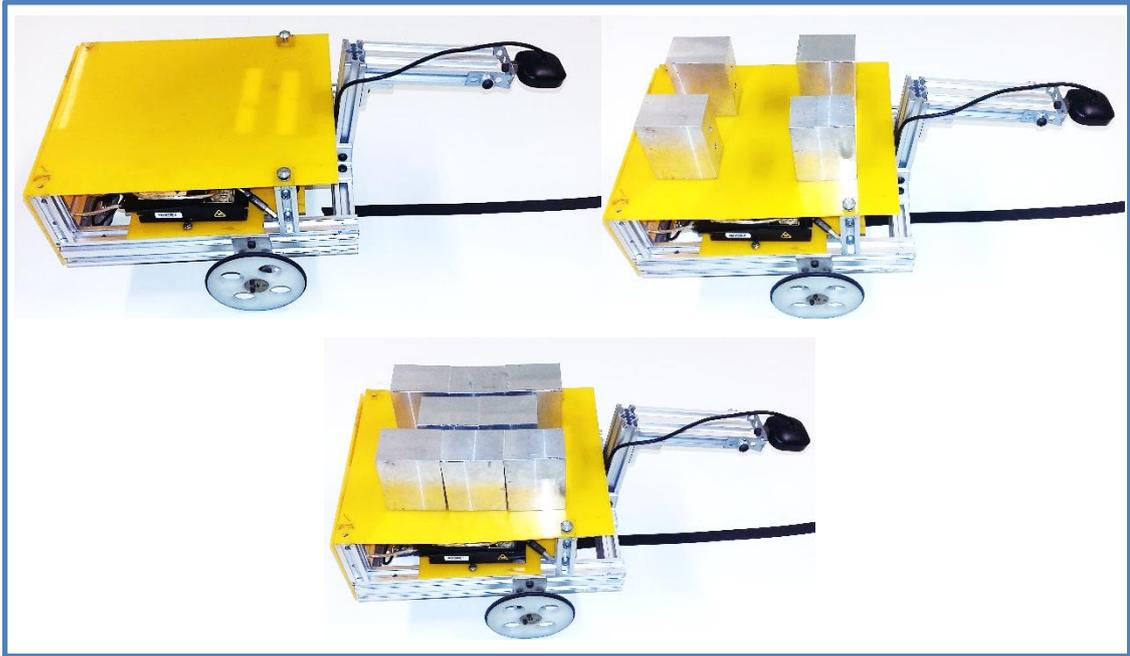


Figura 5.2 – AGV com as cargas de transporte.

Como pista a ser percorrida pelo veículo, são abordadas duas pistas diferentes: uma pista 01, contemplando a linha reta sem contornos curvilíneos com comprimento de 2,5 metros, Figura 5.3, e uma pista 02, contemplando movimentos de curvas a esquerda e a direita e retas, com comprimento variado, Figura 5.4. A linha demarcada na pista para que o veículo siga a trajetória possui 19 milímetros.

Um ponto favorável à arquitetura do veículo e esta estrutura de pista, é sua forma dinâmica dentro da aplicação, pois ao levar este domínio de problema para ambientes fabris, a facilidade em repintar ou até mesmo demarcar a linha a ser seguida dentro desses ambientes pode ser feita de forma rápida e dinâmica o que torna o uso da abordagem de veículos seguidores de linha com a arquitetura proposta nesta pesquisa, viável.



Figura 5.3 – Pista 01 à ser percorrida em linha reta.

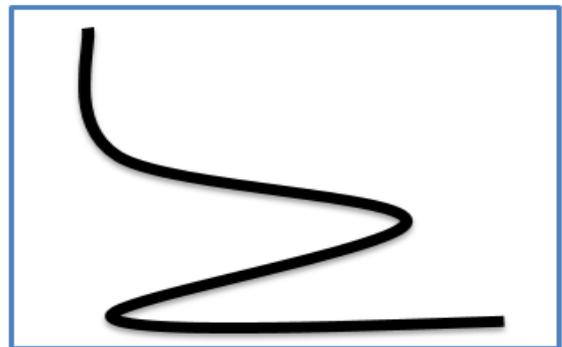


Figura 5.4 – Pista 02 à ser percorrida com movimentos curvilíneos a esquerda, a direita e em retas.

Para as velocidades impostas no veículo foi determinada uma velocidade média de 0.4 metros por segundo (m/s), com saturação de velocidade de até 0.6 metros por segundo (m/s) em cada uma das rodas, tais valores foram determinados frente as capacidades de rotação de cada um dos motores apurados em seus *datasheets*. Vale enfatizar que este objeto de estudo realiza movimentos apenas para a frente e sem movimentação lateral, devido à sua não holonomia.

Sendo assim o cenário de teste é associado entre as pistas a serem percorridas, as cargas de transporte, as variáveis mensuradas e os dois sistemas de controle conforme apresentados na tabela 5.1 e na tabela 5.2.

Tabela 5.1 Cenário de Testes 01 – Controle PID.

Cenário de Teste 01			
Sistema de Controle	Variável Controlada	Tipo de Pista	Cargas Transportadas
Controle PID	Orientação	Pista 01	Carga 01, Carga02, Carga 03
		Pista 02	Carga 01, Carga02, Carga 03
	Distância	Pista 01	Carga 01, Carga02, Carga 03
		Pista 02	Carga 01, Carga02, Carga 03

Tabela 5.2 Cenário de Testes 02 – Controle *Fuzzy* Adaptativo.

Cenário de Teste 02			
Sistema de Controle	Variável Controlada	Tipo de Pista	Cargas Transportadas
Controle Fuzzy Adaptativo	Orientação	Pista 01	Carga 01, Carga02, Carga 03
		Pista 02	Carga 01, Carga02, Carga 03
	Distância	Pista 01	Carga 01, Carga02, Carga 03
		Pista 02	Carga 01, Carga02, Carga 03

5.3 Sistema de Controle PID – Proporcional, Integral, Derivativo

Diante dos cenários de teste expostos na seção 5.2, o sistema de controle PID é aplicado nesses cenários teste, para análise comparativa com o sistema de controle *fuzzy* adaptativo.

Os testes realizados com PID baseiam-se em testes isolados das variáveis mensuradas, testes para orientação e para a distância do veículo em relação a linha na pista 01 e testes para orientação e para a distância do veículo em relação a linha na pista 02, buscando avaliar o comportamento do sistema de controle.

A aplicação do PID na movimentação do veículo é realizada da seguinte forma: mantém-se uma velocidade média linear de 0.4 m/s em cada uma das rodas e mediante ao erro é gerado o valor do PID, subtraindo da velocidade de uma roda e aumentando da outra quando o erro apresenta valores positivos para a variável mensurada, e o inverso quando apresentado erros de valores negativos, mantendo assim a característica do veículo em ser de tração diferencial.

5.3.1 Cenário de Teste 01 – PID Orientação

O primeiro conjunto de testes realizado é o PID para a Orientação do veículo no seguimento de trajetórias retas, pista 01, e curvilíneas, pista 02, variando a carga transportada em seus três níveis supracitados.

Sendo assim a variável mensurada nesse primeiro conjunto de teste é a orientação do veículo em relação a linha, onde são mensurados erros em relação ao *setpoint* do sistema. Como o sensor adotado é a câmera, o centro geométrico da câmera que está no centro geométrico do ponto estratégico a frente do veículo é dito como o *setpoint* 0 (zero) e a esquerda deste *setpoint* a geração de ângulos negativos e a direita ângulos positivos. A Figura 5.5 apresenta essas características, os pontos verdes representam os extremos da linha e o centro da linha, os pontos verdes centrais superiores e inferiores representam os extremos centrais da área analisada pelo

processamento de imagem e extração de informações em relação a linha e o ponto amarelo representa o ponto central do campo de visão da câmera, sendo 640 por 480 pixels que aproxima-se de 19 cm por 13.5 cm e a região de interesse central, destacada em vermelho é representada por um quinto dessa área.

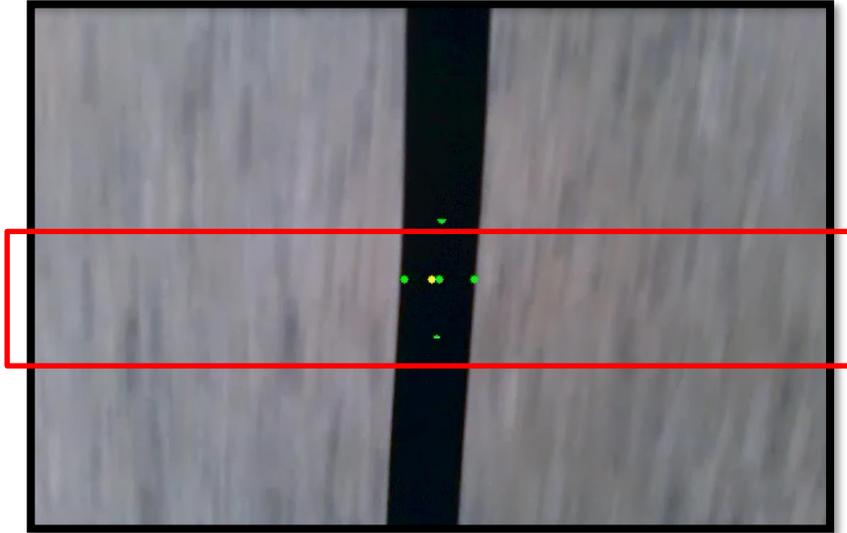


Figura 5.5 – Posicionamento da linha no centro da câmera e área análise de erros.

Para o controle PID aplicado nesse primeiro cenário de teste, as constantes foram sintonizadas conforme método de ajuste Ziegler-Nichols, cujos valores estão descritos na tabela 5.3. Nesse teste foram utilizados os 3 termos do sistema de controle: os termos Proporcional, o Integrativo e o Derivativo.

Tabela 5.3 Descrição das constantes do controle PID, pista 01.

K_p	K_i	K_d
5	2,5	1

Estes valores foram atribuídos primeiramente no cenário de maior saturação do sistema, i.e., onde ele apresenta maior carga à ser transportado na pista 01. A Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8 apresenta a variação de erros desde o início da reta até o seu fim, com as variações de cargas 01, 02 e 03.

Através das figuras é possível identificar que a estabilização dos erros chega próximos a zero após os 7 segundos. A Figura 5.8 ainda apresenta melhor essa estabilização, mantendo-se estável até o fim do percurso. As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam picos de erros semelhantes,

porém quando o sistema transporta o maior nível de cargas, carga 03, os picos de erro acabam aumentando em cerca de 40% dos erros produzidos para o teste com carga 01 e carga 02.

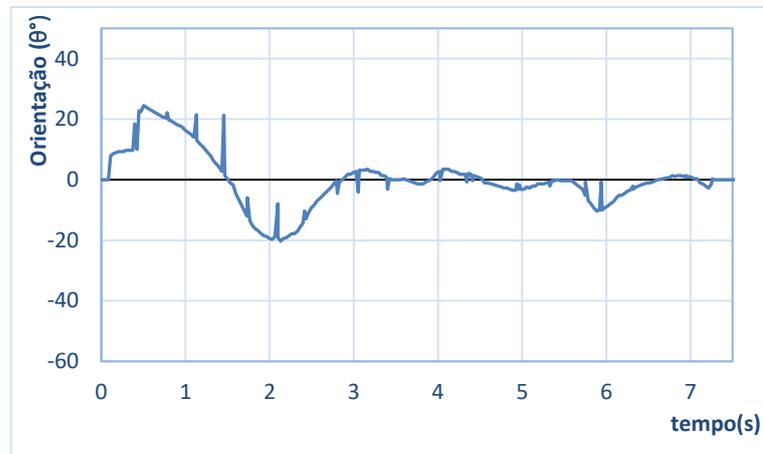


Figura 5.6 – Erros de orientação do AGV na pista 01 para a variação de carga 01.

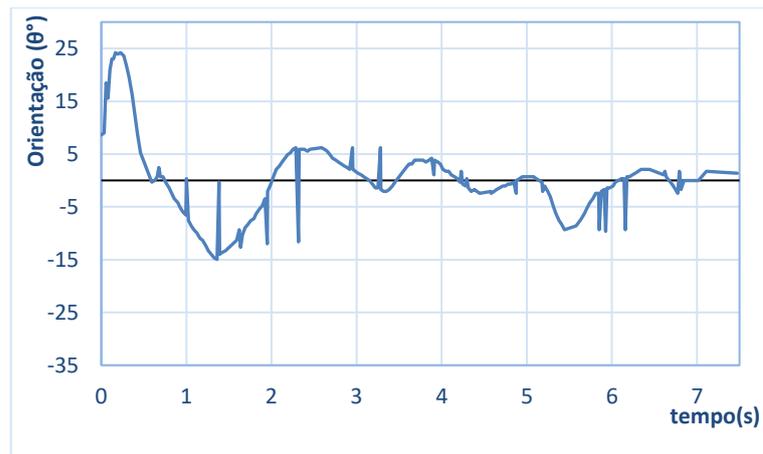


Figura 5.7 – Erros de orientação do AGV na pista 01 para a variação de carga 02.

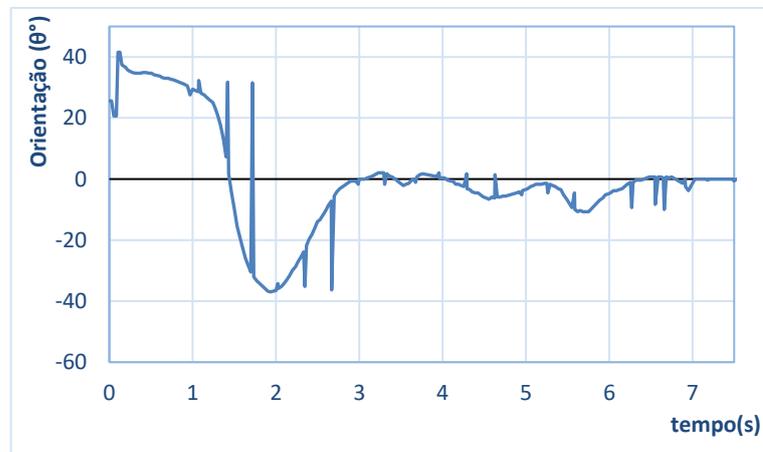


Figura 5.8 – Erros de orientação do AGV na pista 01 para a variação de carga 03.

A evolução das velocidades aplicadas em cada uma das rodas em função dos erros supracitados para o nível de carga 01, na pista 01, teve como a velocidade linear média da roda esquerda aproximadamente 0,402 m/s enquanto que da roda direita 0,398 m/s. Já a velocidade linear de cada uma das rodas para o nível de carga 02, ainda aplicadas à pista 01, a velocidade linear média da roda esquerda aproxima-se de 0,404 m/s e para a roda direita de 0,395 m/s. Por fim, o valor de sinal aplicado para a velocidade linear de cada uma das rodas com o nível de carga 03 à pista 01, é de 0,401 m/s para a roda da esquerda e a velocidade linear média aplicada para a roda direita em aproximadamente 0,399 m/s.

Frente a esses resultados, é possível identificar que a variação da orientação do veículo em relação a linha para a pista 01, com os níveis de cargas alternados, justifica que nesses cenários a velocidade seja maior do lado esquerdo que do lado direito, pois a variação de ângulo em relação a linha é maior ao lado direito gerando maiores erros de ângulos positivos, sendo assim, para que o veículo possa acomodar-se na linha é necessário aumento de velocidade na roda esquerda e redução da roda direita.

Os gráficos anteriormente apresentados trazem a evolução quantitativa de algumas variáveis mensuradas durante o movimento do veículo no cenário de teste 01, com a variável mensurada sendo a orientação do veículo em relação a linha, para a pista 01, com variação de cargas.

Neste primeiro cenário de teste foi então realizado controle da variável orientação, entretanto a variável distância possui relação direta quanto à orientação do veículo em relação a linha, pois um ângulo só pode ser gerado devido a variação das distâncias de centro, através de um cateto oposto ao ângulo. Sendo assim, a variável distância é mensurada, entretanto não controlada nesses testes. A Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11 apresenta a variação da distância em relação ao *setpoint* 0 (zero) para as variações de carga 01, carga 02 e carga 03, demonstrando que ao se controlar a orientação do veículo em relação a linha, a distância é corrigida devido à sua associação com a redução de ângulos, porém apresentando pontos de picos de instabilidades em relação ao centro/*setpoint* da linha.

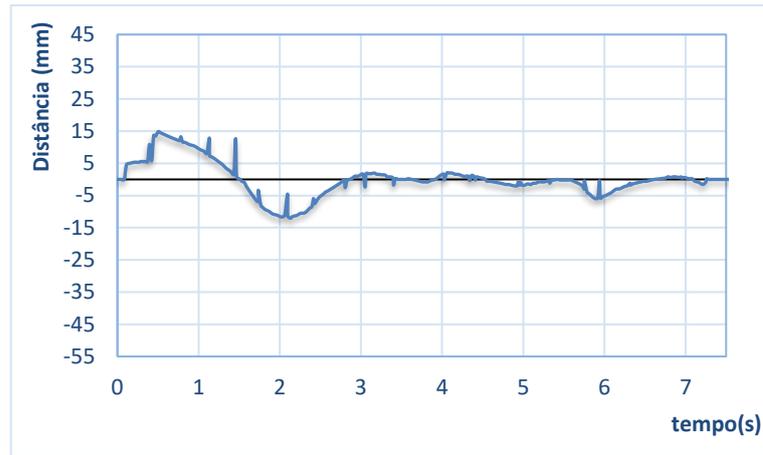


Figura 5.9 – Erros de distância do AGV na pista 01 para a variação de carga 01.

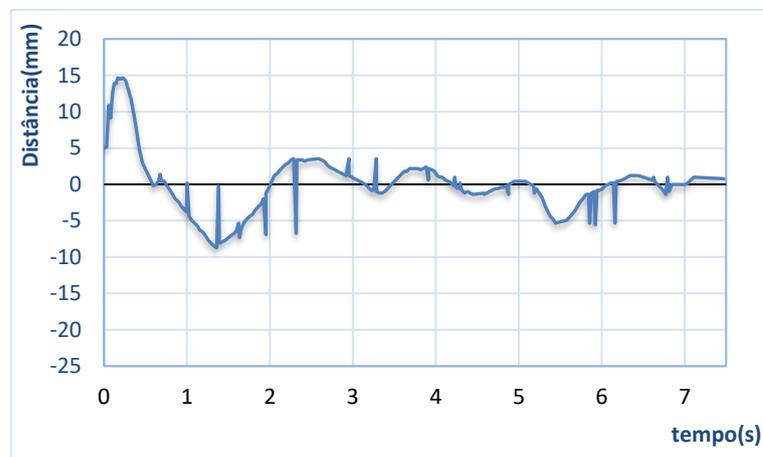


Figura 5.10 – Erros de distância do AGV na pista 01 para a variação de carga 02.

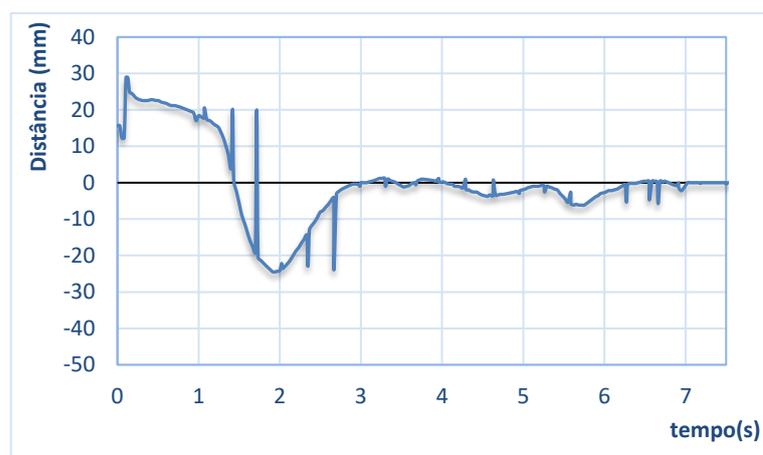


Figura 5.11 – Erros de distância do AGV na pista 01 para a variação de carga 03.

Os resultados apresentam alterações de amplitudes repentinas, tal fato é atribuído a ruídos provenientes do sensor, a câmera, devido a alterações de iluminação e refletância da

linha na pista, pois o ambiente de teste não foi caracterizado como um ambiente controlado, buscando que ao realizar os testes com o sistema de controle *fuzzy* adaptativo proposto, variáveis e ruídos externos não mensurados sejam resolvidos pelo sistema de controle *fuzzy* adaptativo.

A tabela 5.4 apresenta de forma resumida os dados acima quantificados e ainda apresenta estimativas estatísticas quanto aos erros mensurados em relação a orientação e distância do veículo.

Tabela 5.4 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.

	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 03	Variância	Desvio Padrão
Orientação	0,1147	82,9861	9,1096	0,5840	287,4387	16,9540	0,1231	52,2439	7,2279
Distância	0,0835	28,7701	8,3637	0,4939	117,3432	10,8325	0,0945	18,01	4,2438

Ainda dentro do cenário de teste 01 – PID para a orientação do veículo, existe a segunda pista para análise de movimentação. Sendo assim a próxima análise descrita corresponde à orientação em relação a pista 02 e suas variações de cargas. Os valores de PID para o segundo teste dentro do cenário 01 são alterados, pois os valores para controle em linha reta não foram suficientes para controle do veículo em momentos de curvas e os valores de ganhos aplicados no cenário de teste para a pista 01 foram altos, fazendo com que o veículo perdesse a linha e ou oscilasse em torno da referência. Os valores estão descritos na tabela 5.5.

Tabela 5.5 Descrição das constantes do controle PID, pista 02.

Kp	Ki	Kd
10	2,5	3

Sendo assim as análises gráficas apresentadas subsequentes corresponde ao segundo arcabouço de testes realizados, porém agora sobre a segunda pista a ser percorrida pelo veículo, mantendo as mesmas variações de carga. A Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14, vêm ilustrando o fenômeno de movimentação errôneo do veículo com base na orientação durante a pista 02, para as variações de carga 01, carga 02 e carga 03.

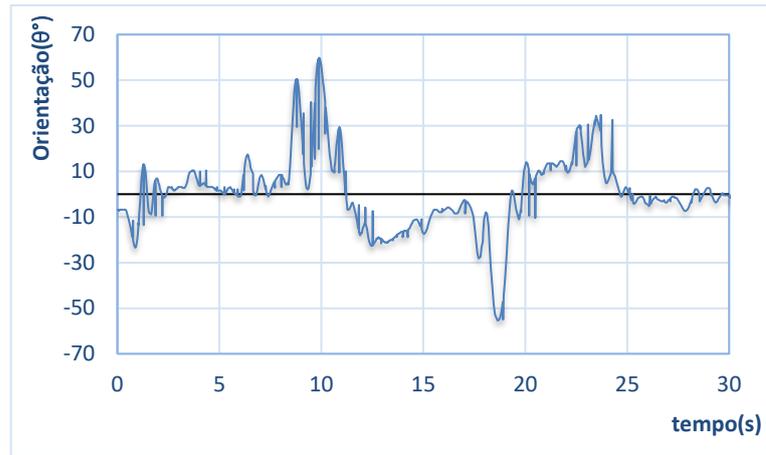


Figura 5.12 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.

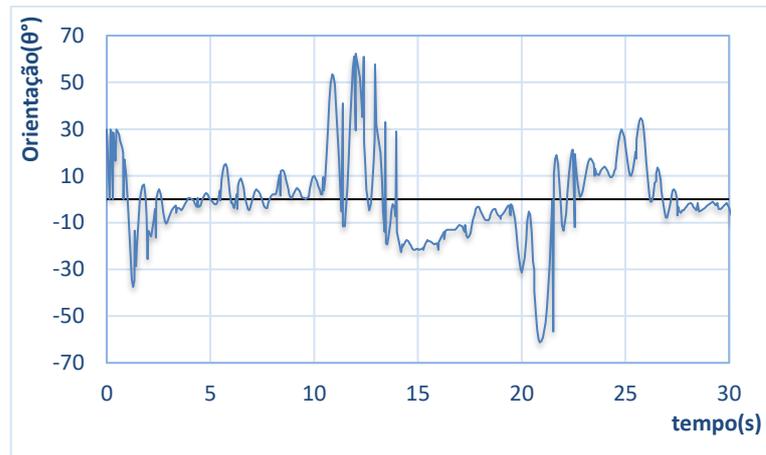


Figura 5.13 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.

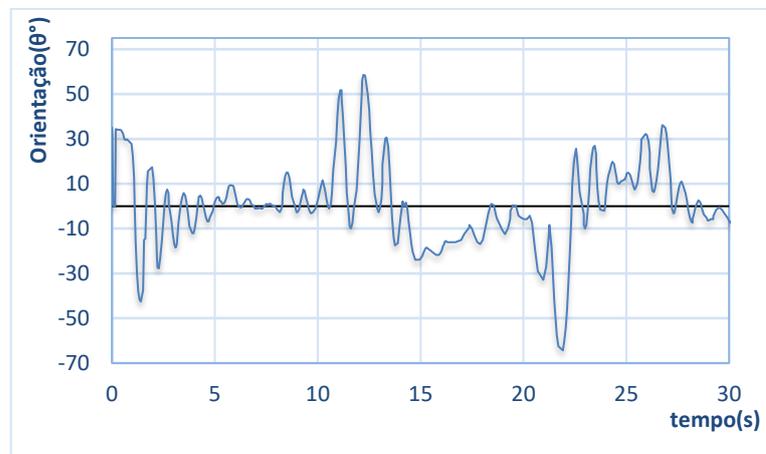


Figura 5.14 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.

Dentre os gráficos supracitados, a variação de orientação do veículo é maior quando as cargas de transportes são as intermediárias, carga 02. Os índices de variação de pico a pico nos gráficos estão relacionados aos movimentos de curvas presentes na pista 02, curvas a direita picos positivos e curvas a esquerda picos negativos.

Quanto a evolução do sinal de controle de velocidade aplicada em cada uma das rodas em função dos erros supracitados para o nível de carga 01, na pista 02, foi gerado uma velocidade linear média de 0,414 m/s para a roda esquerda e 0,399 m/s para a roda direita, e para a velocidade linear média de cada uma das rodas para o nível de carga 02, ainda aplicadas à pista 02, resultou em 0,413 m/s para a roda esquerda e para a roda direita 0,399. Para a velocidade linear média aplicada em cada uma das rodas para o nível de carga 03 à pista 02, a roda esquerda apresentou 0,405 m/s e para a roda direita 0,387 m/s.

Os gráficos anteriormente apresentados, trazem a evolução quantitativa de variáveis mensuradas durante o movimento do veículo no cenário de teste 01, com a variável mensurada sendo a orientação do veículo em relação a linha, para a pista 02, com variação de cargas. Somado a isso a Figura 5.15, Figura 5.16 e Figura 5.17 apresenta a distância de mensurada durante o seguimento de linha na pista 02 com as respectivas variações de cargas. Novamente os maiores picos registrados de variação, são em relação a carga intermediária transportada, carga 02.

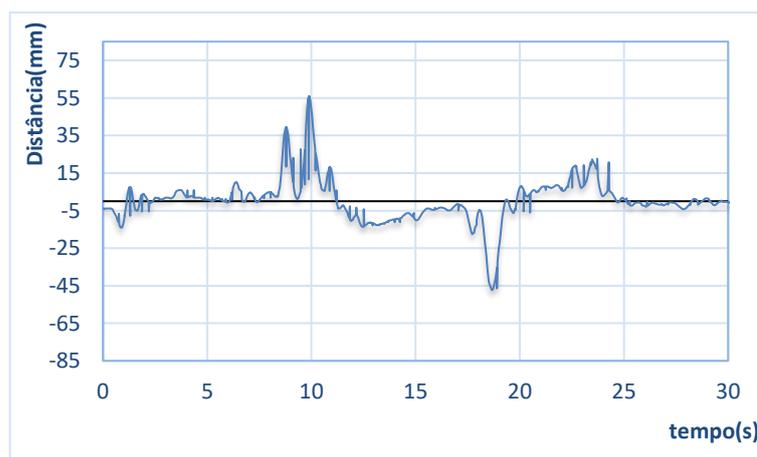


Figura 5.15 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.

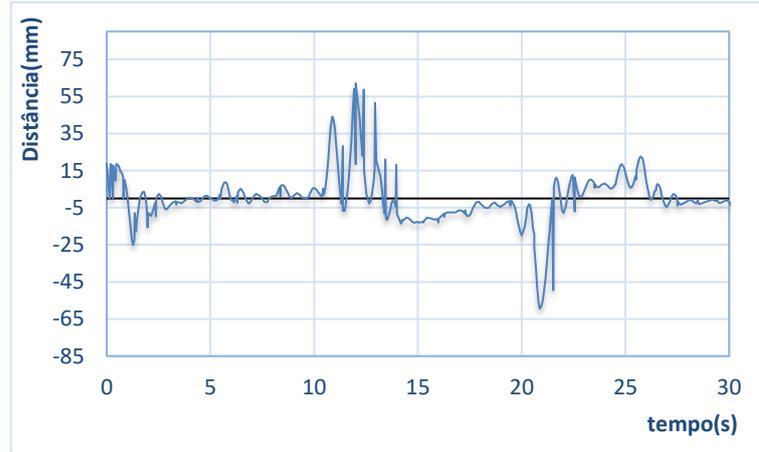


Figura 5.16 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.

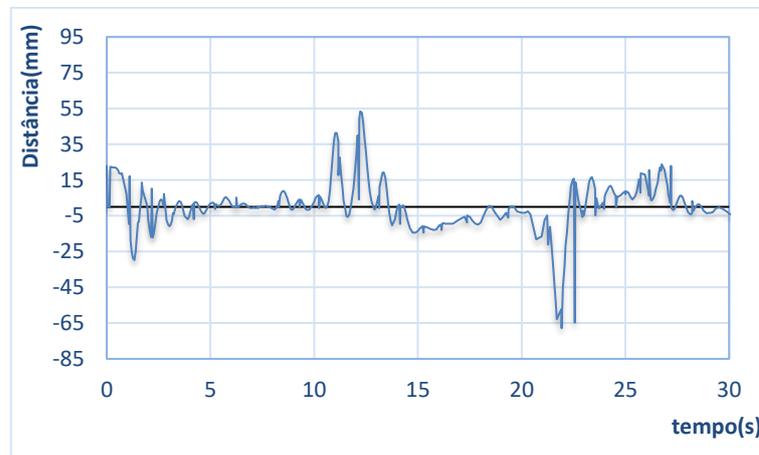


Figura 5.17 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.

A tabela 5.6 apresenta de forma resumida os dados acima quantificados e ainda apresenta estimativas estatísticas quanto aos erros mensurados para futuras análises.

Tabela 5.6 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 02, cargas 01,02 e 03.

	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 03	Variância	Desvio Padrão
Orientação	1,3256	245,3652	15,6641	0,1731	275,3497	16,5937	1,2811	294,0378	17,1475
Distância	0,9539	122,9273	11,0873	0,1838	146,9778	12,1234	0,7930	155,8022	12,4821

Esse primeiro cenário de teste é avaliado no aspecto de método comparativo com o sistema de controle *fuzzy* adaptativo proposto. A variação de carga no sistema de controle PID mostra maior influência na estabilidade do sistema quando imposta uma carga intermediária, carga 02, tanto para a pista 01 e para pista 02. Em cada um dos cenários foram necessários aplicação de valores diferentes para as constantes do PID, pois os valores das constantes do primeiro cenário de teste quando aplicado a curvas não respondia de forma satisfatória, fazendo com que o veículo perdesse a linha.

Para demonstrar a acurácia e precisão do veículo no segmento de trajetória e necessário o segundo conjunto de teste agora demonstrando resultados quanto ao sistema de controle *fuzzy* adaptativo, sendo assim o próximo cenário de teste apresenta o desempenho desse sistema de controle.

5.3.2 Cenário de Teste 01 – PID Distância

Dentro do segundo conjunto de testes realizados com o sistema de controle PID, a variável agora mensurada é a distância do centro da linha em relação ao centro da câmera do veículo. Sendo assim, neste cenário primeiramente é apresentado o comportamento do controle PID para a pista 01, linha reta, com as respectivas variações de carga. As amostras gráficas da Figura 5.18, Figura 5.19 e Figura 5.20, apresentam os valores de erros de distância mensurados em relação ao valor de referência do sistema de controle.

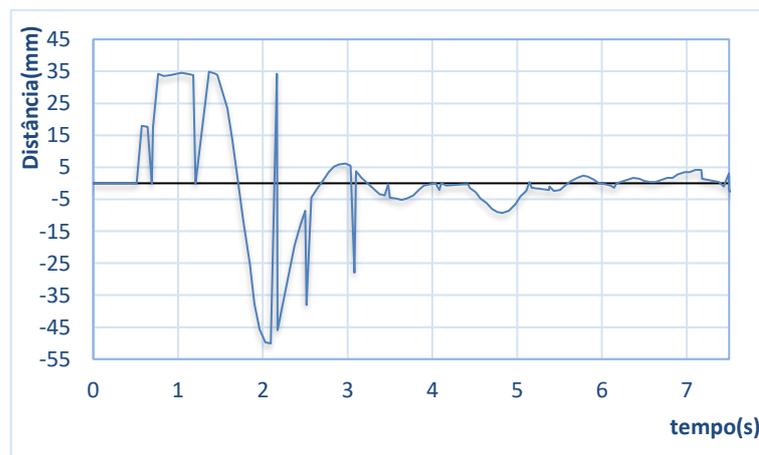


Figura 5.18 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.

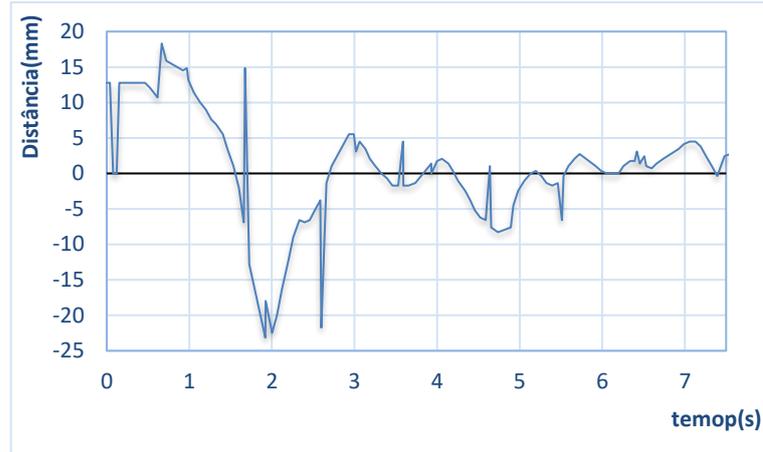


Figura 5.19 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.

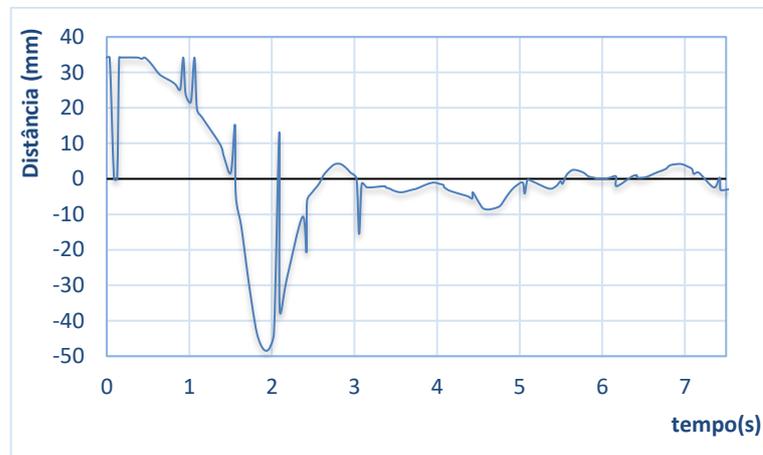


Figura 5.20 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 03.

Para o PID aplicado frente aos erros expostos anteriormente desse cenário de teste, foram novamente sintonizados conforme métodos de Ziegler-Nichols, cujos valores para as constantes de ganhos são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 Descrição das constantes do controle PID, pista 01.

K_p	K_i	K_d
10	6	0

Para as velocidades lineares medias aplicadas em cada uma das rodas, quando transportada a carga 01 foi obtido 0,408 m/s para a roda esquerda e 0,392 m/s para a roda direita. Quando levanta em consideração uma carga de transporte intermediária, carga 02, foi observado

que a velocidade linear média da roda esquerda foi de 0,407 m/s e para a roda direita 0,393 m/s, por fim para a carga máxima a ser transportada, foi aplicada uma velocidade linear média a roda esquerda de 0,412 m/s enquanto que para a roda direita foi 0,388 m/s.

Assim como no cenário de teste anterior onde a variável controlada era a orientação, a variável distância era mensurada, entretanto nesse cenário de teste a variável controlada foi a distância de centros de linha entre o centro da câmera, sendo assim a Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.33 apresentam os erros de orientação mensurados, mas não controlados.

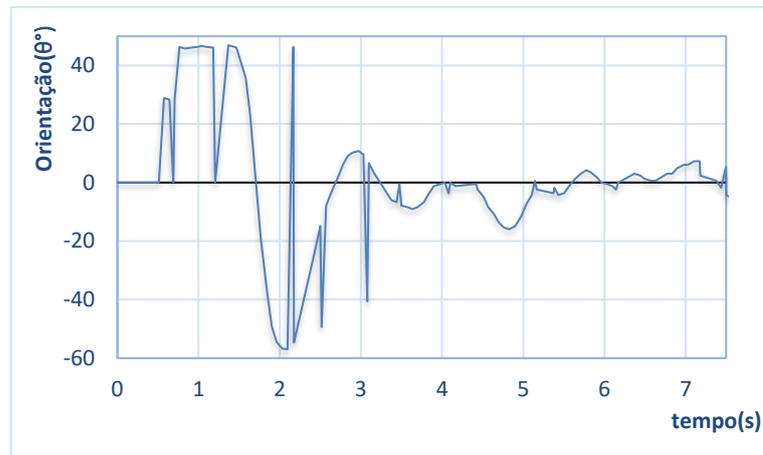


Figura 5.21 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.

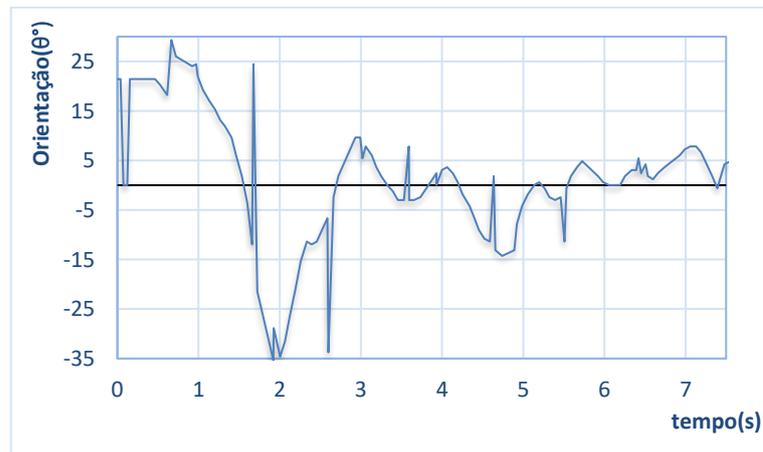


Figura 5.22 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.

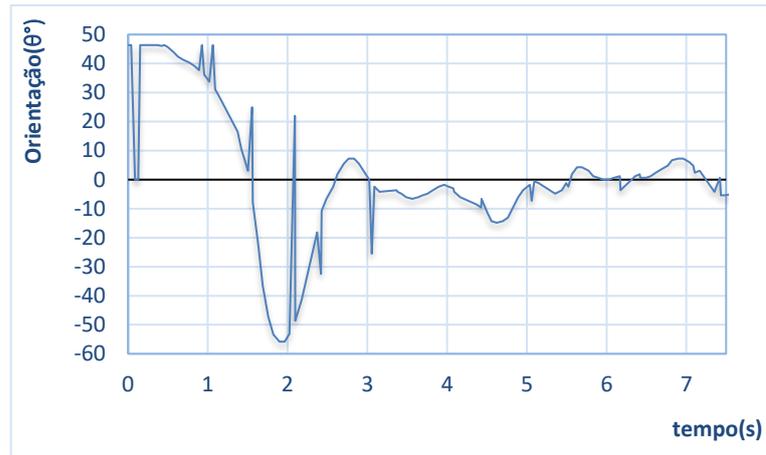


Figura 5.23 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 03.

Diante dos resultados e variáveis mensuradas e controladas nesse cenário de teste, a tabela 5.8 apresenta os resultados obtidos quanto aos erros, onde são aplicados a média, variância e desvio padrão desses erros.

Tabela 5.8 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.

	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 03	Variância	Desvio Padrão
Distância	0,5775	256,6225	16,0194	0,9012	64,3757	8,0234	1,5535	281,7932	16,7867
Orientação	0,9688	460,2938	21,4545	1,6127	173,4093	13,1685	2,3092	527,3867	22,9649

Contemplando a pista 02 e ainda tendo como variável mensurada a distância, foram realizados testes com o controle PID aplicado a essa variável e a variação de carga associada, buscando a coincidência de centros. Dessa forma, para os próximos resultados de controle os valores de PID para o segundo teste dentro do cenário 01, mensurando a distância, foram mantidos por corresponde a correção do fenômeno de movimentação do veículo na pista 02.

As figuras que apresentam os erros de distância mensurados sobre a pista 02 são as Figuras 5.24, 5.25 e 5.26.

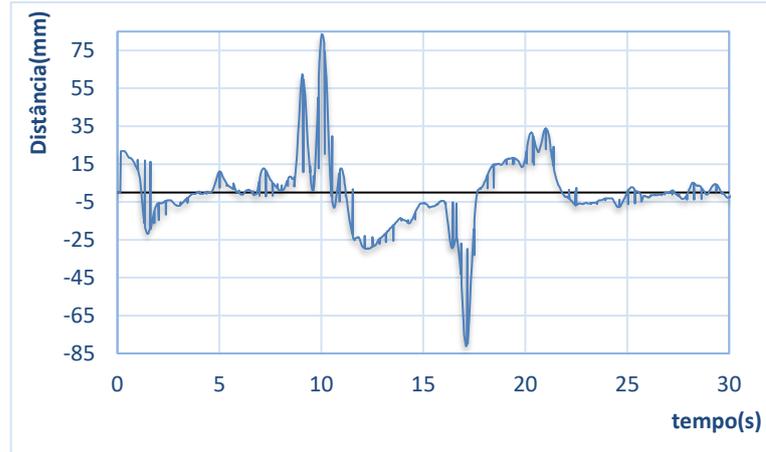


Figura 5.24 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.

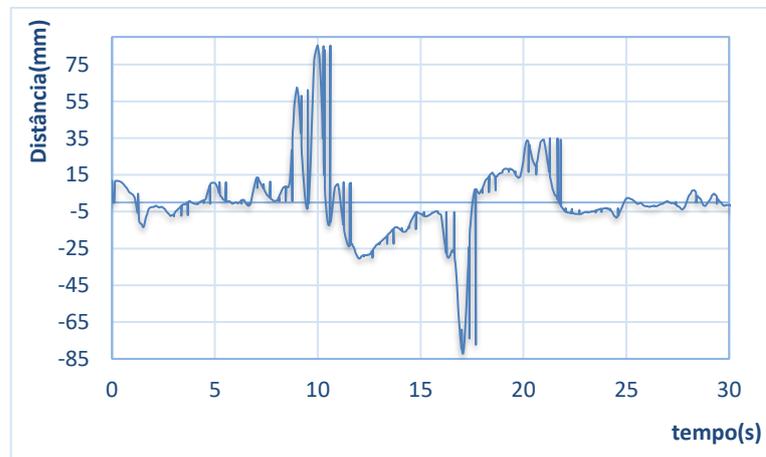


Figura 5.25 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.

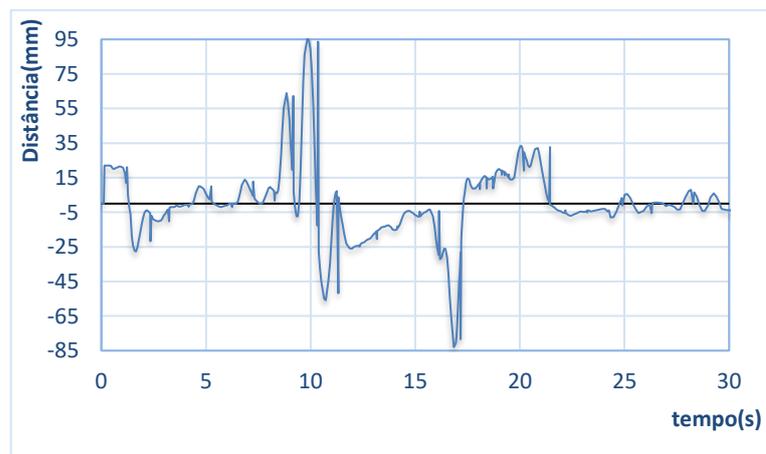


Figura 5.26 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.

Nesse cenário de teste as velocidades lineares medias aplicada as rodas quanto a carga de transporte 01, resultou em 0,4238 m/s para a roda esquerda e 0,4063 m/s para a roda direita.

Para a carga 02 a velocidade linear média aplicada a roda esquerda do veículo foi de 0,4240 m/s e 0,4060 m/s para a carga de transporte 03 foi obtido como velocidade linear média para a roda esquerda 0,4221 m/s e 0,4079 m/s para a roda direita. A Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29 apresentam a variável distância que nesse cenário de teste foi apenas mensurada e não controlada.

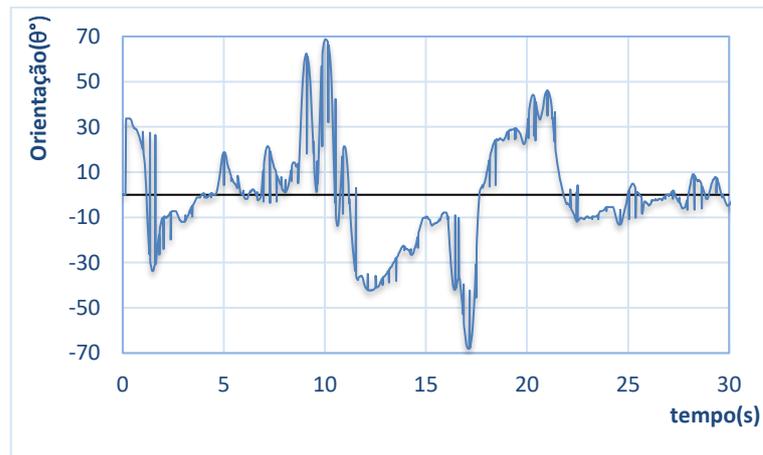


Figura 5.27 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.

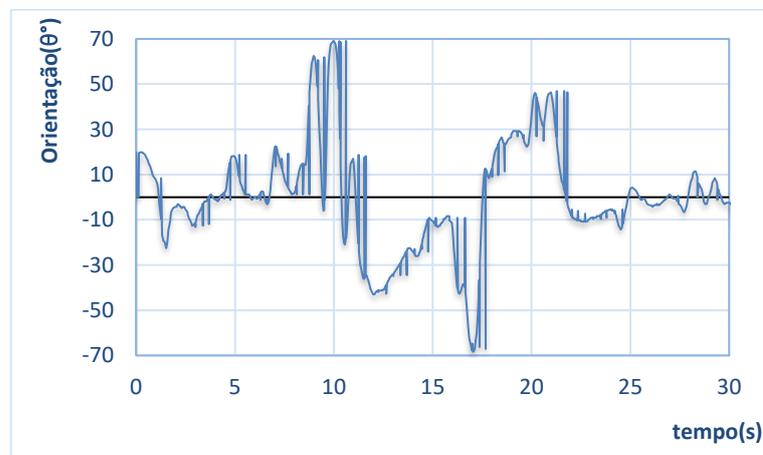


Figura 5.28 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.

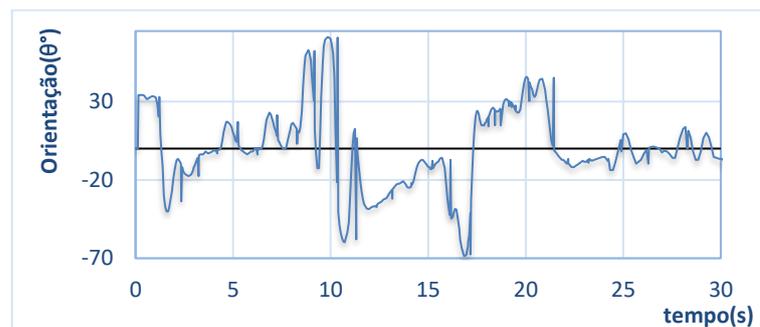


Figura 5.29 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.

Por fim os resultados obtidos quanto a média dos erros, variância e desvio padrão em relação as variáveis mensuradas e as cargas transportadas são apresentadas na tabela 5.9.

Tabela 5.9 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação PISTA 02, CARGAS 01,02 e 03.

	Média Erro Carga 01	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 02	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 03	Variância	Desvio Padrão
Distância	0,0553	349,2265	18,6876	-0,0004	387,6449	19,6887	0,8990	495,1104	22,2511
Orientação	-0,2813	543,8300	23,3202	-0,4671	573,8147	23,9544	1,8765	705,4215	26,5598

5.4 Análise cenário de teste 01 – Controle PID aplicado aos erros de Orientação e Distância

Analisando o cenário de teste para o controle PID é possível verificar que na pista 01, quando a variável em questão controlada foi a orientação os erros mensurados foram menores que quando comparados ao cenário de teste cuja variável controlada era a distância e a orientação foi apenas mensurada. Em momentos semelhantes como por exemplo para a carga 01, quando a variável orientação era controlada seus erros mensurados aproximam-se de picos de 25 graus a direita da faixa e 20 graus a esquerda da faixa, resultados maximizados quando a variável orientação na pista 01 foi apenas mensurada, com picos de erros aproximando-se de 50 graus a esquerda e a direita da faixa, gerando indicativos de que o veículo tenha tendência de oscilação na referência (linha de trajetória) maiores, até o sistema de controle assumir uma faixa de estabilidade, no momento em que a variável orientação não foi mensurada pelo PID.

As mesmas características se apresentam nos outros casos, carga 02 e 03, pois quando controlada a orientação do veículo sobre a linha, as faixas de erros de oscilação se apresentaram menores que comparadas com casos onde a variável orientação foi apenas mensurada.

Ainda analisando pontos de desempenho ligados a pista 01, quando a variável controlada foi a distância seu desempenho em relação a redução de erros de distância de centros

se mostrou ineficiente. Através dos gráficos é possível verificar que as faixas de erros para a variável distância quando aplicado controle PID são maiores e com valores de correção não suavizados, contrapondo os resultados de quando a variável distância foi apenas mensurada como uma consequência da aplicação de controle na correção dos erros de orientação. Tal fato é aplicável a todas as cargas de transporte, demonstrando faixas e picos de erros de distância menores quando a variável distância não foi controlada, cenário de teste 01 – PID aplicado a orientação.

Ambos os fatos e análises acima, são corroborados através das tabelas 5.4 e 5.8, onde os melhores índices de variância, desvio padrão e média ponderada dos erros com aplicação das variações de cargas, são apresentados quando a variável controlada é a orientação e a variável mensurada distância.

Considerando agora a pista 02 para a aplicação do PID, para a variável controlada, orientação do veículo em relação a linha, os erros de orientação novamente apresentaram-se menores em relação ao cenário de teste, onde a variável orientação foi apenas mensurada, com erros de orientação superando 70 graus de pico. Os erros ocorridos em momentos de curva apresentam-se menores quando a variável controlada é a orientação, fatos justificados quando comparados os gráficos de orientação na pista 02 do PID orientação com os gráficos de orientação do PID distância, ainda na pista 02.

A aplicação do controle PID na variável distância considerando a pista 02 mostrou resultados de desempenho satisfatórios quando comparados com a variável distância advindas do sistema de controle PID aplicado a orientação.

No sistema de controle PID aplicado a orientação, a variável distância que só foi mensurada, apresenta resultados melhores que quando aplicado o PID, com picos de erros de 55 mm a esquerda e 50 mm a direita. Entretanto já nos casos onde o PID é aplicado na distância, esses valores de picos chegam a aproximadamente 95 mm para curvas a esquerda e 75 para curvas a direita nos maiores casos de uso do sistema, ou seja, quando transportada cargas maiores.

Os fatos anteriormente mencionados a respeito da pista 02 são corroborados visualmente e qualitativamente através dos gráficos e quantitativamente através das tabelas 5.9 e 5.6.

Sendo assim a análise final quanto ao sistema de controle PID: é seu uso com melhores resultados quando aplicado a variável orientação, fazendo com que o veículo siga a trajetória com maior precisão e acurácia que o controle PID aplicado a distância.

5.5 Sistema de Controle *Fuzzy* Adaptativo

Para o segundo cenário de teste, foi aplicado o sistema de controle *fuzzy* proposto do tipo SIMO, do inglês *single-input, multiple-output*, sistema com característica de ter uma entrada (erros de orientação ou erros de distância) e duas saídas (velocidade de cada uma das rodas), buscando ainda manter o veículo com coincidência de centros e apresentando acurácia e precisão no seguimento de linha.

5.5.1 Cenário de Teste 02 – Sistema de Controle *Fuzzy* Adaptativo - Orientação

Esta primeira etapa do sistema de controle *fuzzy* adaptativo está pautada sobre a quantificação das bases de regras e dos intervalos de conjuntos das funções de pertinência.

A Figura 5.30 apresenta o sistema SIMO para controle de orientação do veículo em relação a linha, tendo como entrada os erros de orientação e como saída as velocidades de rotação de cada uma das rodas.

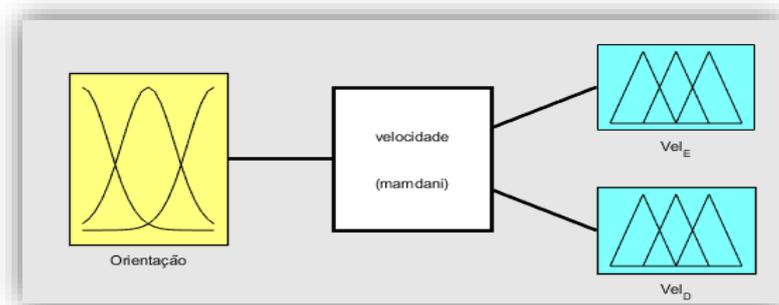


Figura 5.30 – Sistema SIMO de controle para a orientação do veículo em relação a linha.

Para a variável mensurada sendo orientação do veículo em relação a linha, foram definidos os intervalos de entrada de erros e as variáveis linguísticas conforme apresentado na

Figura 5.31. Os valores extremos de erros foram definidos conforme ao maior ângulo de varredura da câmera, ou seja, a esquerda 80° e a direita 80°.

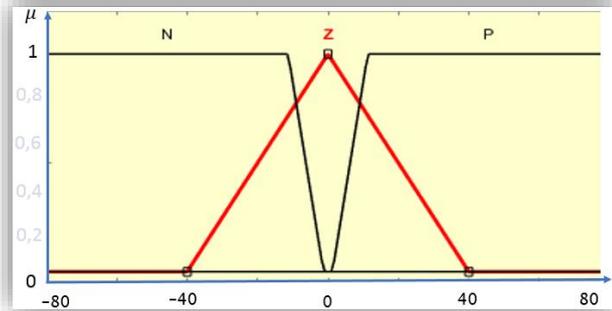


Figura 5.31 – Orientação - variável de entrada do sistema fuzzy.

As variáveis linguísticas foram caracterizadas com granularidade 3, baseada nos valores de entrada tendo como: N - **N**egativo, Z - **Z**ero e P - **P**ositivo, com os respectivos intervalos: N[-100 -80 10 0], Z[-40 0 40] e P[0 10 80 100]. Para essa variável de entrada, as variáveis linguísticas N e P assumem formatos trapezoidais enquanto que a variável Z assume formato triangular.

Para os resultantes/consequentes da variável orientação, foram trabalhados os mesmos intervalos para velocidade em ambas as rodas. A Figura 5.32 apresenta a granularidade das variáveis linguísticas e os respectivos intervalos das velocidades de rotação de cada uma das rodas.

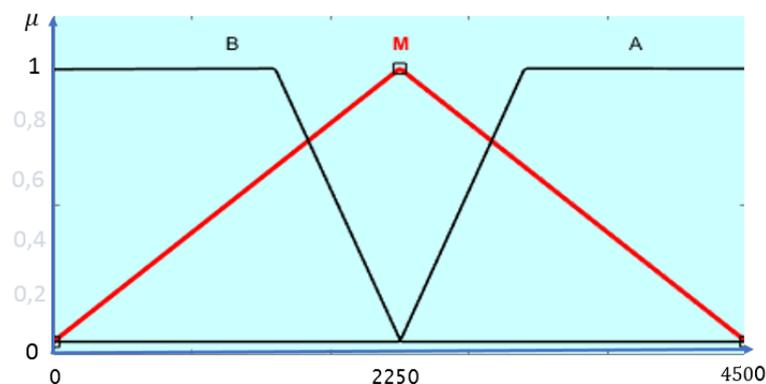


Figura 5.32 – Velocidade de rotação das rodas.

Para a aplicação de velocidade em cada uma das rodas a granularidade da base foi novamente obtida com intervalos triangulares e trapezoidais, onde para as variáveis linguísticas B - **B**aixa o intervalo correspondente é [0 0 1500 2250], para M - **M**édia [0

2250 4500] e para A – Alta [2250 3000 4500 4500]. Os mesmos intervalos e granularidade das variáveis linguísticas se repetem para ambas as rodas.

Associado as variáveis de entrada e saída está o processo de inferência e sua base de regras. Nesse sistema para a acurácia e precisão atingida foi necessário a utilização de 3 regras de inferência, baseadas nas variáveis linguísticas, tabela 5.10.

Tabela 5.10 Regras de Inferência do sistema fuzzy.

θ		V_E		V_D
N	->	B	e	A
Z		M		M
P		A		B

As variações de cargas nesse sistema de controle foram aplicadas buscando validar a qualidade do sistema em responder a variações dinâmicas mesmo sem mensurá-las. Sendo assim a Figura 5.33, Figura 5.34 e Figura 5.35 apresentam os gráficos de evolução de erros em relação ao *setpoint* do sistema, com as variações de cargas aplicadas a pista 01.

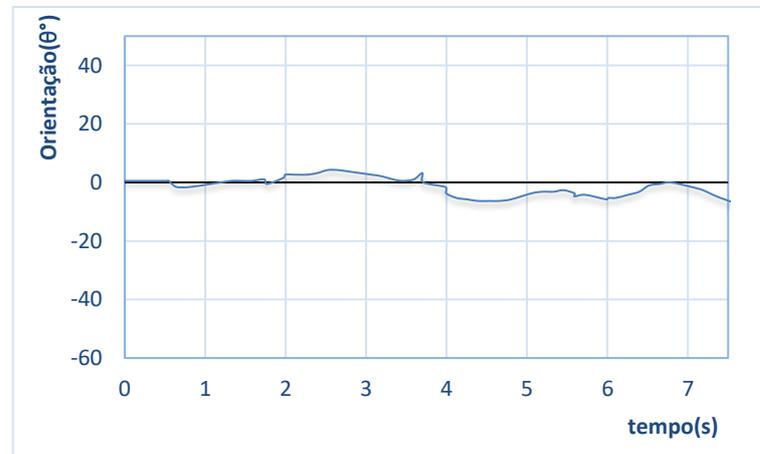


Figura 5.33 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.

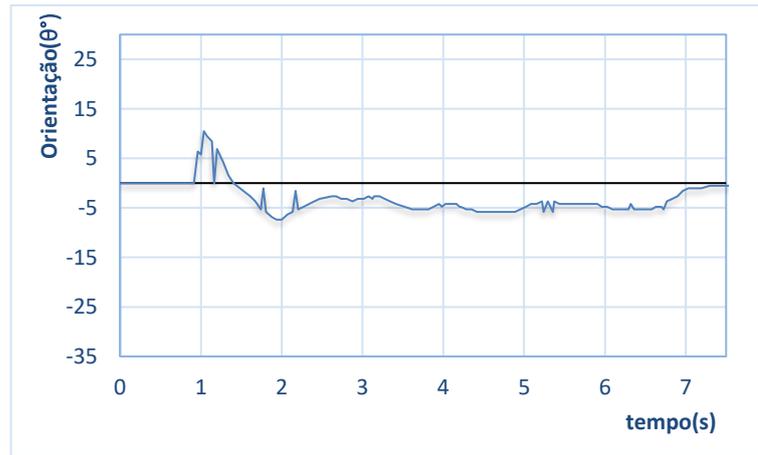


Figura 5.34 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.

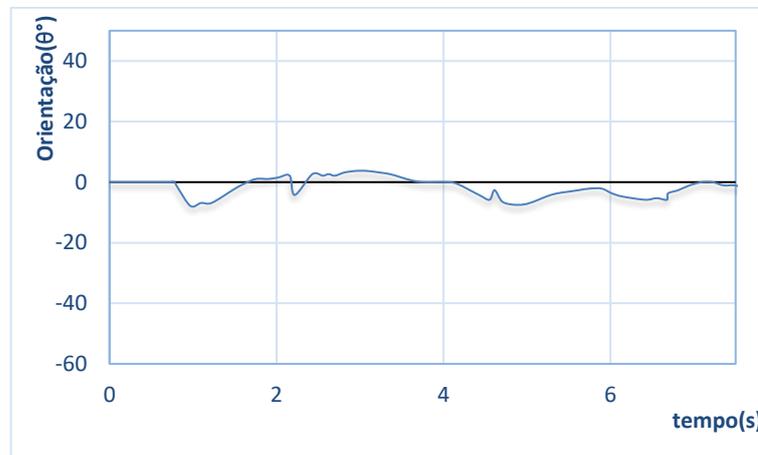


Figura 5.35 – Erros de orientação do veículo na pista 01 para a variação de carga 03.

As velocidades lineares médias aplicada as rodas quanto a carga de transporte 01, resultou em 0,4133 m/s para a roda esquerda e 0,4118 m/s para a roda direita. Quando a carga de transporte era a carga 02 a velocidade linear média aplicada a roda esquerda do veículo foi de 0,4138 m/s e 0,4112 m/s, e em relação a carga de transporte 03 foi obtido como velocidade linear média para a roda esquerda 0,4115 m/s e 0,4135 m/s para a roda esquerda.

Assim como no sistema de controle PID, a variável alvo é a orientação, entretanto a redução consequente distancia se faz presente também no controle *fuzzy*. A Figura 5.36, Figura 5.37 e Figura 5.38 apresentam a evolução da distância de centros de linha e centro de câmera para as variações de cargas e dinâmicas do sistema.

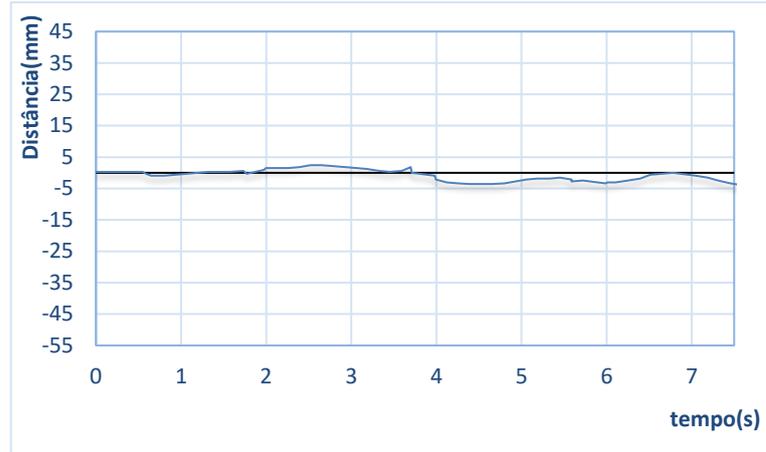


Figura 5.36 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.

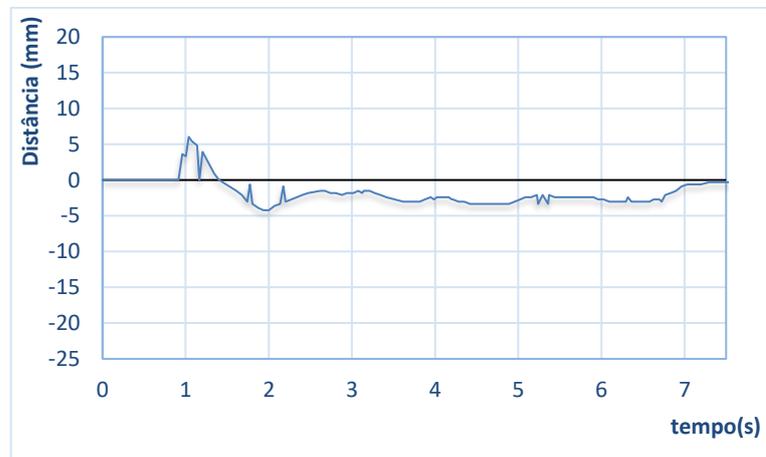


Figura 5.37 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.

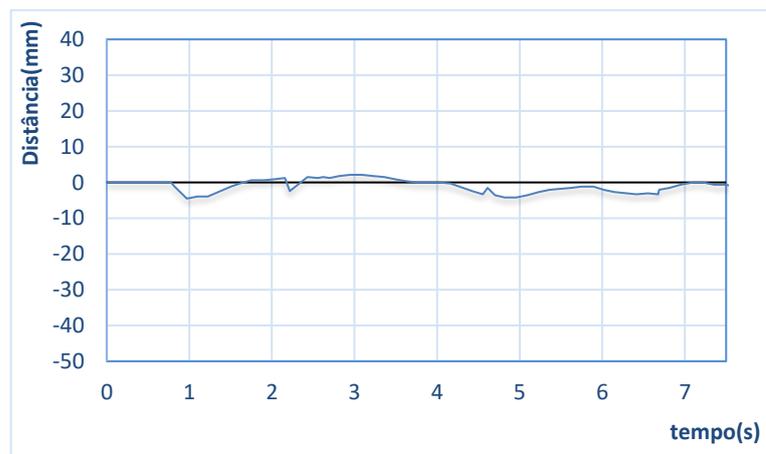


Figura 5.38 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 03.

A tabela 5.11 apresenta os dados quantificados e ainda apresenta estimativas estatísticas quanto aos erros mensurados em relação a orientação e distância do veículo em relação a linha.

Tabela 5.11 Quantificação dos dados do cenário de teste 02 – Orientação PISTA 01, CARGAS 01,02 e 03.

	Média Erro Carga 01	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 02	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 03	Variância	Desvio Padrão
Orientação	-0,9630	9,1950	3,0323	-2,2112	10,6058	3,2566	-1,1821	9,9276	3,1508
Distância	-0,5488	2,9899	1,7291	-1,2592	3,4599	1,8600	-0,6742	3,2315	1,7976

Para o segundo cenário de teste do sistema de controle *fuzzy*, contemplando a pista 02 e considerando a variação de cargas 01, cargas 02 e cargas 03, a Figura 5.39, Figura 5.40 e Figura 5.41 apresentam os erros de orientação mensurados ao longo do seguimento de linha, validando a proposta desta pesquisa.

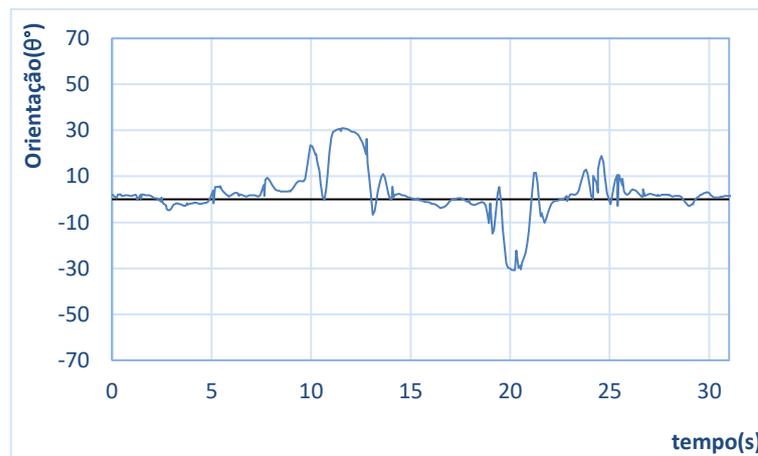


Figura 5.39 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.

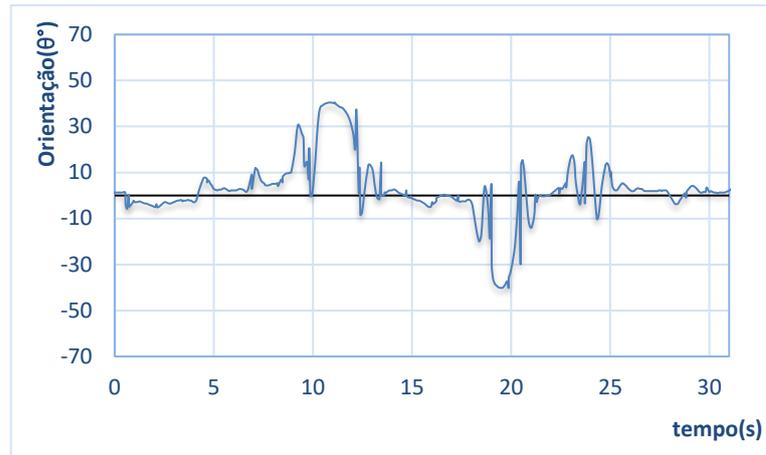


Figura 5.40 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.

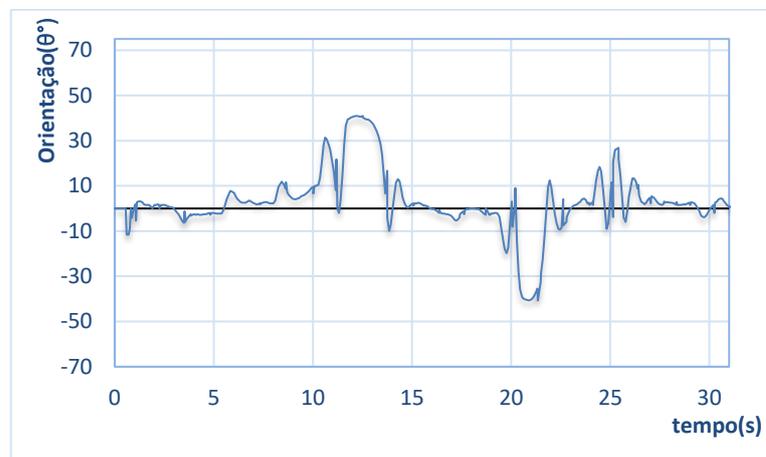


Figura 5.41 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.

As velocidades lineares médias aplicada as rodas quanto para a carga de transporte 01, resultou em 0,4057 m/s para a roda esquerda e 0,4197 m/s para a roda direita. Quando a carga de transporte era a carga 02 a velocidade linear média aplicada a roda esquerda do veículo foi de 0,4063 m/s e 0,4188 m/s, e em relação a carga de transporte 03 foi obtido como velocidade linear média para a roda esquerda 0,4060 m/s e 0,4191 m/s para a roda esquerda.

Com a aplicação do sistema de controle *fuzzy* adaptativo os erros de distância em relação a linha reduziram comparados ao sistema de controle PID. A Figura 5.42, Figura 5.43 e a Figura 5.44 apresentam erros mensurados por meio da câmera para a distância aplicadas na pista 02 para as variações de cargas.

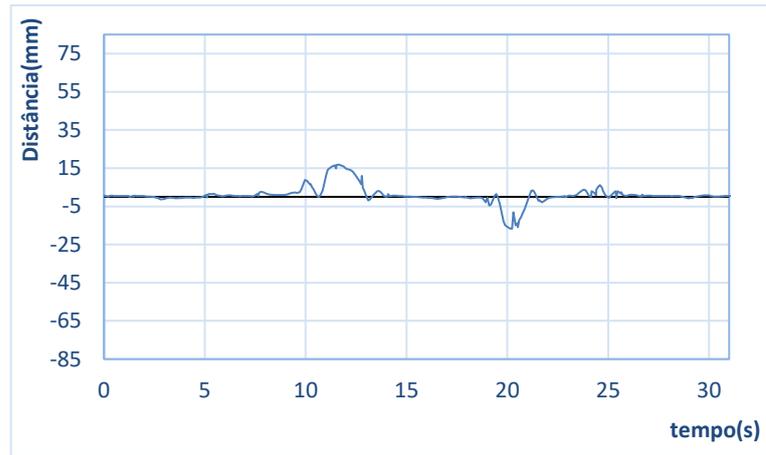


Figura 5.42 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.

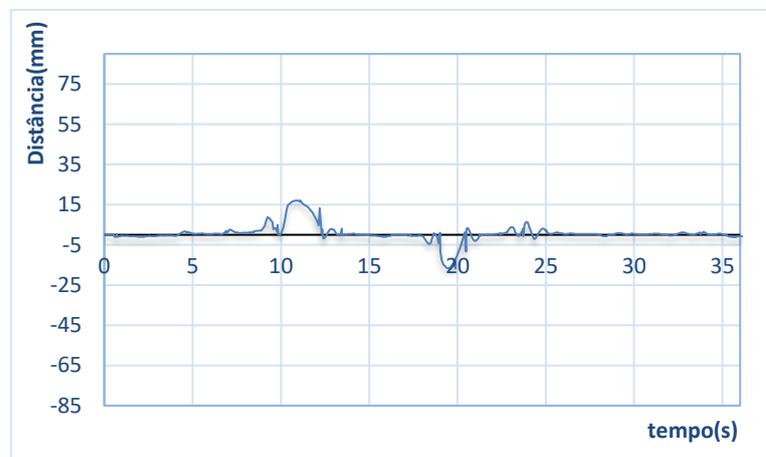


Figura 5.43 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.

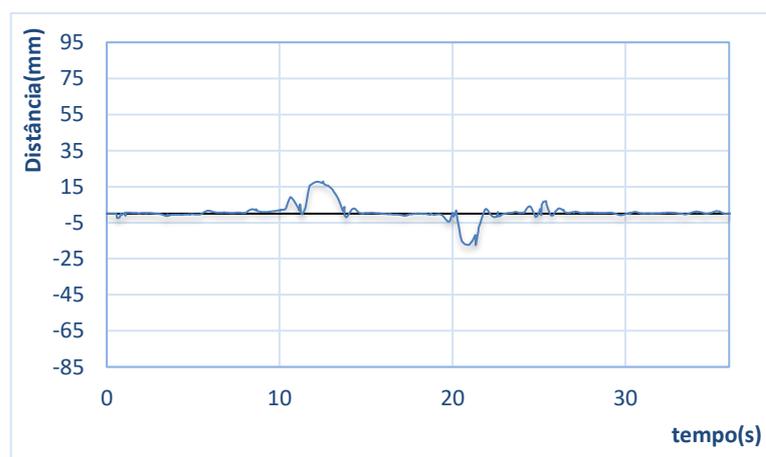


Figura 5.44 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.

A tabela 5.9 traz os erros quantificados e relação a orientação e distância do veículo, apresentando média, variância e desvio padrão dos erros para as variações de carga.

Tabela 5.12 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.

	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 03	Variância	Desvio Padrão
Orientação	2,1937	88,6128	9,4134	2,4360	155,9361	12,4874	7,4944	158,9930	12,6092
Distância	0,7516	18,0676	4,2506	0,6753	18,6395	4,3172	1,6711	20,2356	4,4984

5.5.2 Cenário de Teste 02 – Sistema de Controle *Fuzzy* Adaptativo – Distância

Dentro do cenário de teste 02, ainda foi aplicado o sistema de controle *fuzzy* adaptativo para a variável distância para a pista 01 e pista 02. Novamente foram aplicadas variações de cargas transportadas a fim de testes para o sistema de controle e sua sensibilidade as variações dinâmicas causadas devido a carga de transporte.

Novamente foi aplicado um sistema de controle *fuzzy* adaptativo do tipo SISO, Figura 5.45, onde como entrada: é mensurada e controlada a variável distância do centro da linha em relação ao centro da câmera, buscando a coincidência desses centros. Como saída do sistema de controle *fuzzy* adaptativo, são impostos os valores das velocidades das rodas esquerda e direita do veículo.

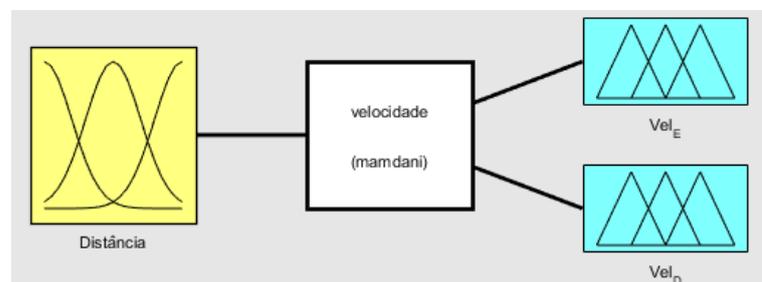


Figura 5.45 – Sistema SIMO de controle para a Distância do veículo em relação a linha.

Para a entrada do sistema de controle, distância os intervalos de erros correspondem ao campo de visão da câmera. Sendo assim são mensurados erros de -100 mm, distância máxima do centro da linha a esquerda do centro da câmera e 100 mm distância máxima do centro da

linha a direita do centro da câmera. A Figura 5.46 apresenta os limites dos intervalos de entrada de erros do sistema de controle, bem como as variáveis linguísticas aplicadas.

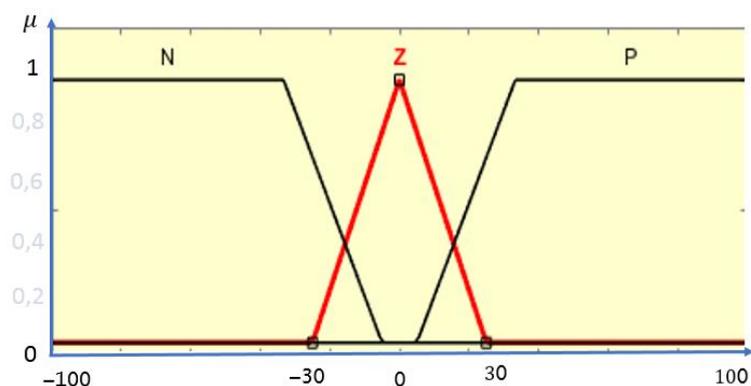


Figura 5.46 –Distância - variável de entrada do sistema *fuzzy*.

As variáveis linguísticas aplicadas para a entrada do sistema *fuzzy* adaptativo foram 3 caracterizadas da seguinte forma com seus respectivos intervalos de conjuntos: N – Negativo [-100 -100 -30 -5], Z – Zero [-30 0 30] e P – Positivo [5 30 100 100]. Para as variáveis linguísticas N e P foram utilizados conjuntos do tipo trapezoidais, já para o conjunto Z foi aplicada triangulação no conjunto.

O conseqüente da entrada de erros dos motores é a aplicação da velocidade das rodas que tiveram como variáveis linguísticas: B – Baixa [0 0 1580 2180], M – Média [1000 2250 3500] e A – Alta [2330 2930 4500 4500], novamente para as extremidades, B e A, foram adotadas conjuntos do tipo trapezoidais e para a região central, M, foi aplicada triangulação, Figura 5.47.

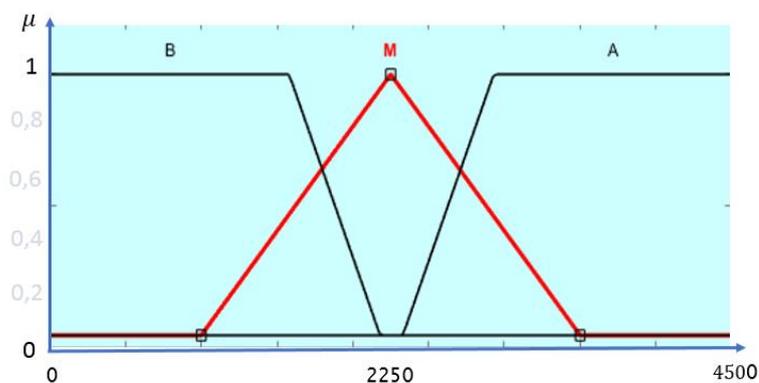


Figura 5.47 – Velocidade de rotação das rodas.

Para ambas as velocidades das rodas, as variáveis linguísticas e intervalos dos conjuntos da Figura 5.47 são as mesmas tanto para a roda esquerda do veículo quanto para a roda direita.

Para o processo de inferência e compondo a base de conhecimento, as regras adotadas ainda foram 3 associando o antecedente, erros de distância, e o consequente, velocidade das rodas, tabela 5.13.

Tabela 5.13 Regras de Inferência do sistema *fuzzy*.

D (mm)		V_E		V_D
N	->	B	e	A
Z		M		M
P		A		B

Tendo os intervalos definidos e as regras aplicadas, o conjunto de testes iniciais contemplou a variação de carga, aplicadas a pista 01 e tendo como variável mensurada a distância de centros de linha e centro de câmera. A Figura 5.48, Figura 5.49 e Figura 5.50 apresentam evolução dos erros mensurados e controlados ao longo da pista 01 com a variação de cargas transportadas.

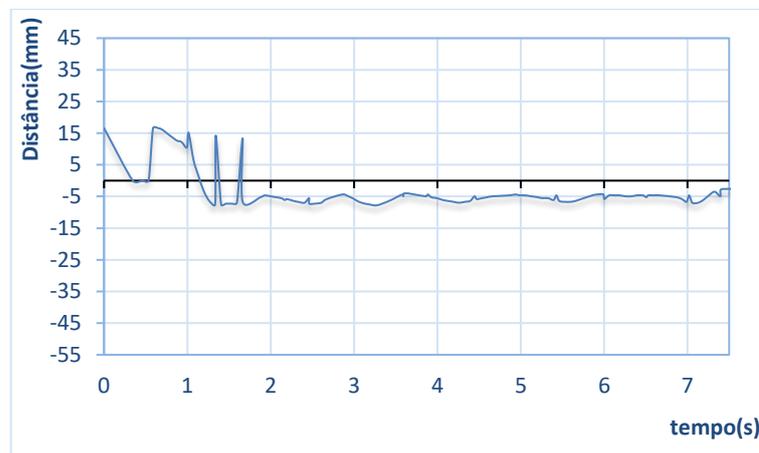


Figura 5.48 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.

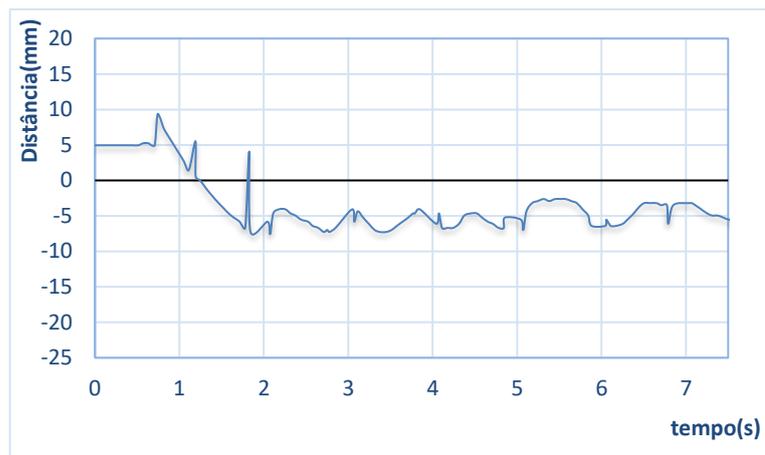


Figura 5.49 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.

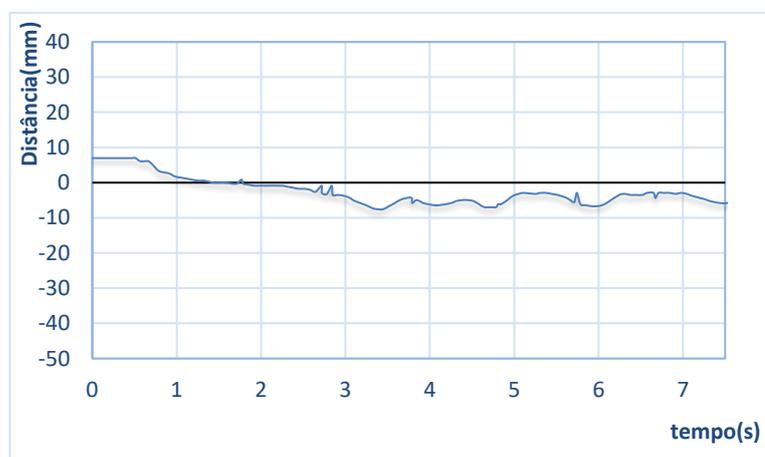


Figura 5.50 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 03.

Foram mensuradas saída do sistema de controle fuzzy adaptativo que correspondem as velocidades de cada roda do veículo. Sendo assim foi estimado a velocidade linear média de para a roda esquerda de 0.412 m/s e para a roda direita 0.413 m/s quando aplicada a carga de transporte 01. Já para a carga de transporte 02 foi aplicada uma velocidade linear media da roda esquerda de 0.415 m/s enquanto que para a roda direita foi de 0.410 m/s, e por fim quando transportada a carga 03 foi estimado uma velocidade linear média aplicada a roda esquerda de 0.414 m/s e para a roda direita de 0.411 m/s.

Assim como nos outros cenários de testes anteriormente descritos a variável complementar a variável controlada, nesse caso tendo como complementar a orientação, foi mensurada para fins demonstrativos quanto a influência da orientação do veículo frente a variável controlada. Sendo assim a Figura 5.51, Figura 5.52 e Figura 5.53 apresentam a evolução dos erros de orientação em relação a pista 01, com a aplicação da variação de carga.

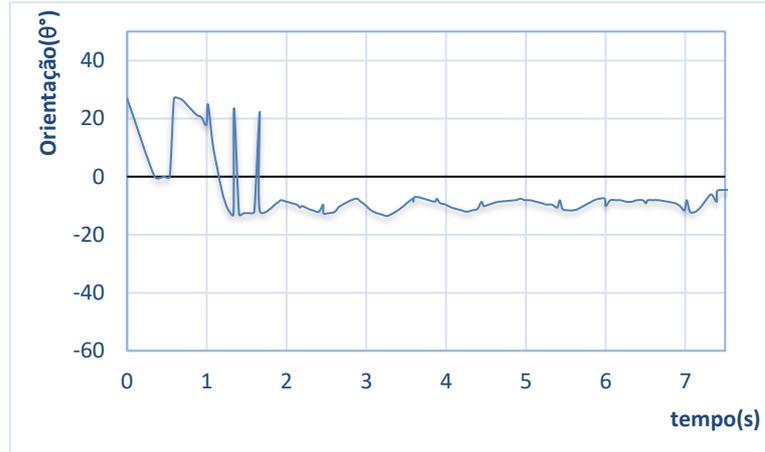


Figura 5.51 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 01.

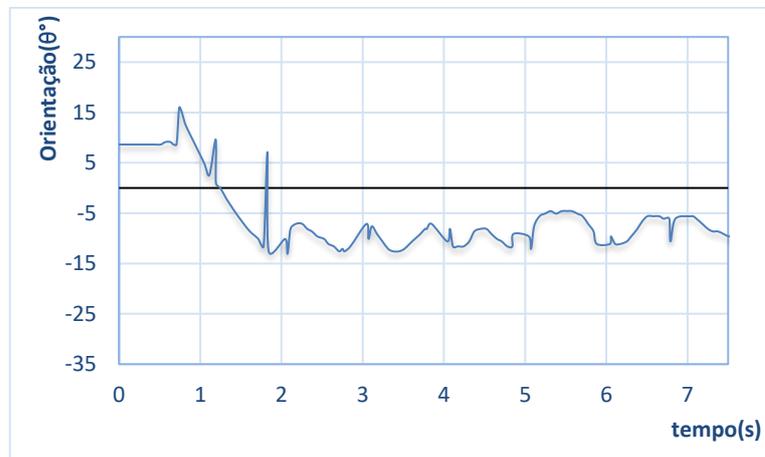


Figura 5.52 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 02.

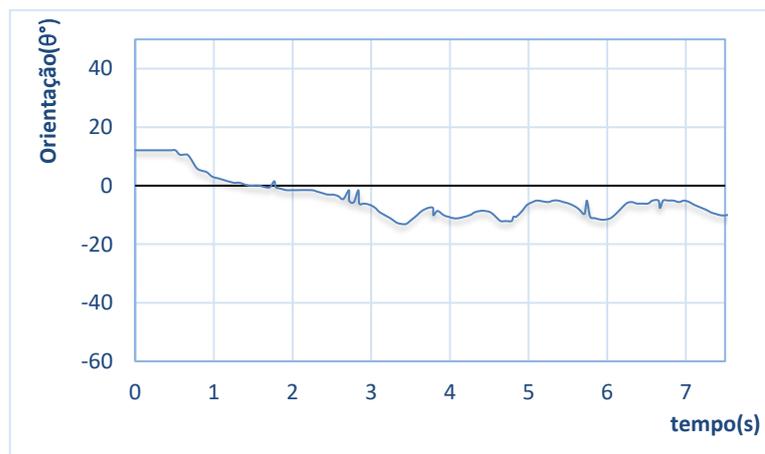


Figura 5.53 – Erros de distância do veículo na pista 01 para a variação de carga 03

Foram mensuradas a média, variância e desvio padrão dos erros mensurados e são apresentados na tabela 5.14.

Tabela 5.14 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.

	Média Erro Carga 01	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 02	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 03	Variância	Desvio Padrão
Distância	-1,9377	29,6358	5,4439	-2,0627	17,5207	4,1858	-1,5517	16,2086	4,0260
Orientação	-3,4341	85,7811	9,2618	-3,5904	53,0793	7,2856	-2,7030	49,1913	7,0136

O segundo grupo de testes realizados dentro do cenário 02, foram testes sobre a perspectiva da pista 02, onde foi controlada a distância e coincidência entre centros de linha e centro de câmera e as variações de carga 01,02 e 03. A Figuras 5.54, 5.55 e 5.56 apresentam a evolução do erro de distância sobre a pista 02.

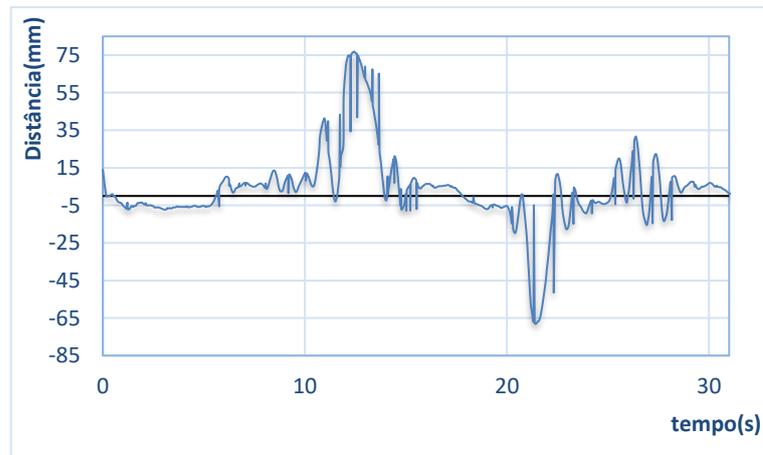


Figura 5.54 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.

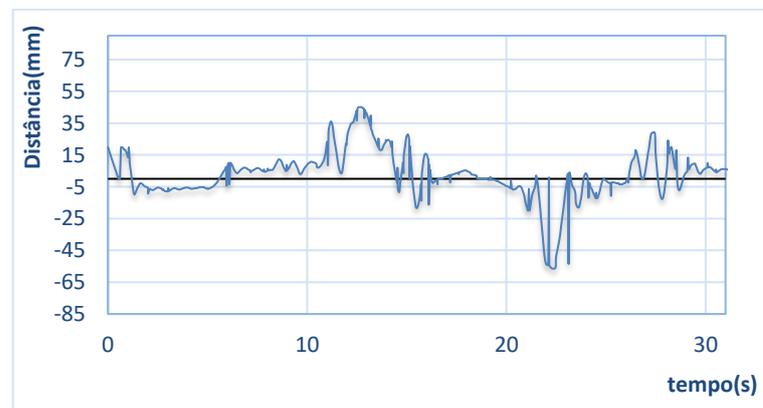


Figura 5.55 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.

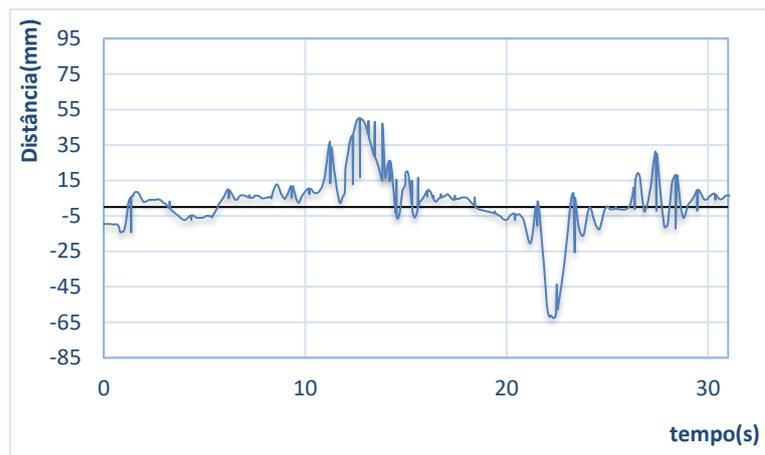


Figura 5.56 – Erros de distância do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.

Foram aplicadas velocidades linear média à roda esquerda de 0.392 m/s e para a roda direita de 0.433m/s quando transportada a carga 01. No teste em que a carga de transporte foi a carga 02 as velocidades lineares medias foram: 0.392 m/s para a roda esquerda e 0.433 m/s para a roda direita, finalizando com 0.393 m/s para a roda esquerda e 0.433 m/s para a roda direita quando a carga transportada foi a carga 03.

A variável orientação foi mensurada apresentando os erros de orientação em relação a pista 02 quando o controle fuzzy adaptativo atuava frente aos erros de distância. Sendo assim a Figura 5.57, Figura 5.58 e Figura 5.59 apresentam essa evolução de erros de orientação.

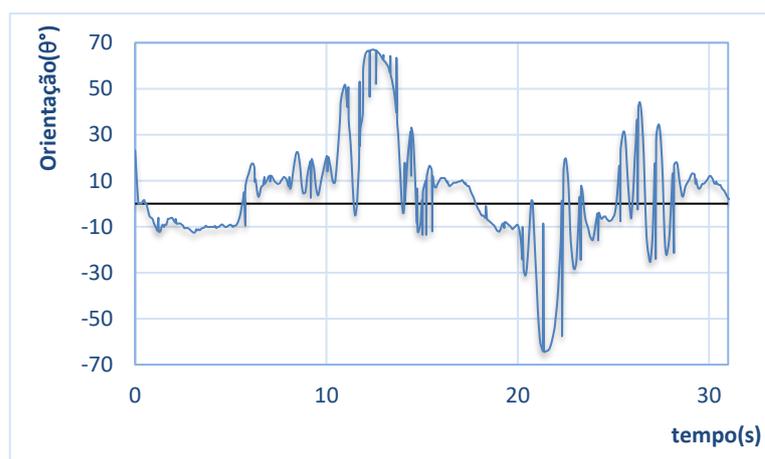


Figura 5.57 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 01.

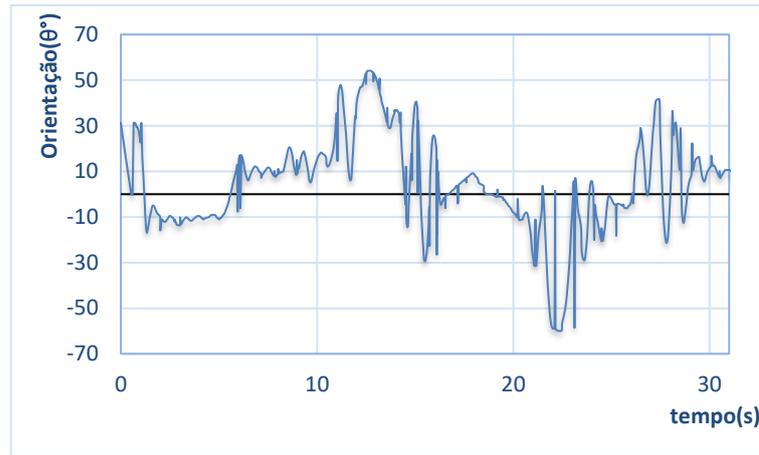


Figura 5.58 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 02.

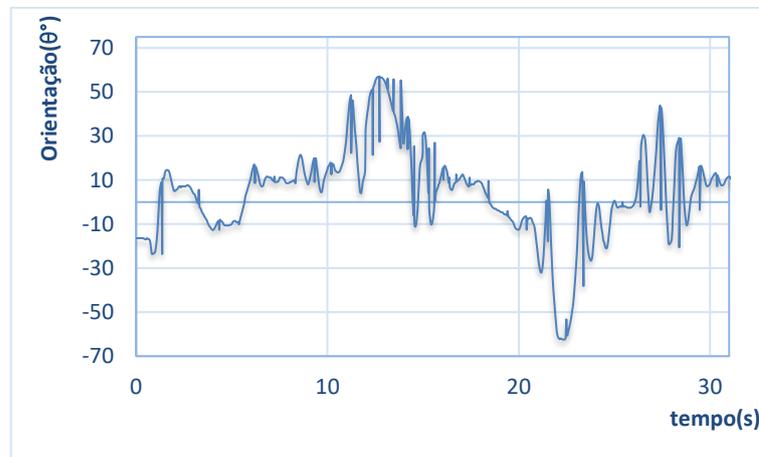


Figura 5.59 – Erros de orientação do veículo na pista 02 para a variação de carga 03.

Este cenário de teste finaliza-se com a quantificação dos resultados frente aos erros apresentados de distância e orientação para a pista 02 com variações de carga, tabela 5.15, onde foram aplicadas as métricas de média, variância e desvio padrão.

Tabela 5.15 Quantificação dos dados do cenário de teste 01 – Orientação pista 01, cargas 01,02 e 03.

	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro	Variância	Desvio Padrão	Média Erro Carga 03	Variância	Desvio Padrão
Distância	6,3463	449,9149	21,2112	4,2329	210,9980	14,5258	4,8015	239,1962	15,4660
Orientação	7,7553	525,8818	22,9321	6,5770	396,1386	19,9032	10,5090	401,6038	20,0401

5.6 Análise cenário de Teste 02 - Controle Fuzzy Adaptativo aplicado aos Erros de Orientação e Distância

O primeiro sistema de controle fuzzy adaptativo analisado em relação a movimentação do veículo na pista 01, é quando controlada a variável orientação. No sistema fuzzy adaptativo controlando a orientação os resultados gráficos apresentam faixas de atuação reduzidas quando comparadas com o sistema de controle fuzzy aplicado a distância, onde possui a variável orientação mensurada e não controlada. Os picos de erros chegam a 20 graus quando a variável controlada é a distância, já quando a variável controlada é a orientação os erros de picos mensurados chegam a no máximo 10 graus, evidenciando novamente melhores resultados quando controle é aplicado a orientação.

Quando a variável controlada é a distância os erros de distância que apresentam menores valores em relação a linha são os erros de distância para quando a variável controlada é a orientação, que opera em faixas de 5mm a esquerda da faixa e 5 mm a direita, enquanto que quando a variável controlada é a distância e seus picos de erros chegam a 20 mm.

Corroborando os resultados quanto a pista 01, as tabelas 5.11 e 5.14 apresentam a média, variância e desvio padrão dos erros mensurados mostrando que em pista 01 o melhor controle aplicado é o controle fuzzy adaptativo aplicado a orientação.

Novamente quando comparados os erros de orientação do controle fuzzy adaptativo na pista 02, com controle aplicado a variável orientação, com os erros de orientação quando o controle foi realizado sobre a distância, tendo a variável orientação apenas mensurada, os resultados dos gráficos novamente voltam a apresentar relevância ao uso do controle fuzzy aplicado a orientação, pois os erros são reduzidos mais suavemente frente as curvas a esquerda e a direita, quando aplicado controle fuzzy adaptativo sobre a variável orientação e os picos e faixas de estabilização são menores.

Para a distância, quando aplicado o controle fuzzy nessa variável os gráficos apresentam desempenho inferior quando comparado com os resultados dos erros de distância mensurados pelo sistema de controle fuzzy adaptativo, corroborando novamente para validação de uso da variável orientação para o seguimento de trajetória devido a sua redução de erros e oscilações do veículo sobre a pista. Outro ponto apresentado e a suavização de correção frente aos erros

mensurados, os gráficos quando confrontados apresentam picos com concavidades mais abertas para o controle aplicado a orientação.

5.7 Comparativo - Controle *Fuzzy* Adaptativo X Controle PID

Para análise de desempenho do sistema de controle fuzzy adaptativo, o comparativo de resultados é feito entre os melhores resultados de desempenho do controle PID, confrontados com os melhores resultados do sistema de controle *fuzzy* adaptativo aplicado.

Sendo assim a primeira análise realizada está relacionada quanto sistema de controle PID aplicado a orientação na pista 01, onde atuando para correção de erros da variável orientação apresentou uma redução de até aproximadamente 94% de erros, quando imposta a maior carga sobre o veículo, comparado com o controle PID aplicado à distância, onde a variável orientação foi apenas mensurada. Para a pista 02, o controle PID para orientação mostrou-se aplicável ao problema quando comparado com o PID aplicado a distância, pois a redução de erros quando submetido uma carga 03, foi de aproximadamente 31,7%.

Para o controle fuzzy adaptativo, quando controlada a variável orientação também se apresentaram resultados pertinentes quanto ao domínio do problema, pois para a pista 01 com o maior nível de carga, carga 03, o sistema apresenta erros de orientação de aproximadamente 56,2% melhores que os erros de orientação quando a variável controlada é a distância, e para a pista 02, ainda com a carga 03 aproximadamente 28,7% de redução de erros.

Sendo assim o controle *fuzzy* adaptativo aplicado a orientação é avaliado frente aos resultados do controle PID aplicado a orientação, por apresentarem os melhores resultados nos cenários de testes propostos.

Buscando avaliar o sistema de controle fuzzy adaptativo quando aplicado ao cenário de teste da pista 01, com a carga 03 e o sistema de controle PID orientação com no mesmo cenário de teste, foram observadas outras duas métricas estatísticas apresentadas nas tabelas ao fim de cada cenário de teste, sendo elas: a variância buscando avaliar o quão longe em geral os resultados estão do valor de referência e o desvio padrão buscando avaliar o quão próximo da média de erros os valores tendem a estar.

Nesse cenário de teste, pista 01 e carga 03, o controle PID orientação apresentou índices de variância de aproximadamente 52,2439 e o sistema de controle fuzzy adaptativo apresenta índice de variância de 9,9226, uma redução de aproximadamente 81%, já no fator desvio padrão, o controle PID orientação apresentou índice de 7,2279 e o controle fuzzy adaptativo apresentou 3,1508, quantificando uma redução de 56,4%. Sendo assim o controle fuzzy adaptativo em decorrência de seus resultados, apresenta maior adaptação ao domínio de problema que o sistema de controle PID quando submetidos ao cenário de maior estresse do sistema, pois maiores cargas resultam em maiores implicações dinâmicas.

Avaliando o sistema de controle PID orientação e o sistema de controle fuzzy adaptativo, submetidos agora ao cenário de teste para a pista 02, com a maior imposição de carga, carga 03, o sistema de controle PID orientação apresenta índice de 294,0378 de variância enquanto que o sistema de controle fuzzy adaptativo apresenta índice de 158,9930, tendendo a uma redução de 45,9 % em relação ao PID orientação. Já para os índices de desvio padrão o controle PID apresentou índices de 17,1475 e o controle fuzzy adaptativo 12,6092, com índice aproximadamente 26,5% menores.

Todos os resultados podem ser ainda confrontados visualmente ao observar os gráficos dos cenários de teste, onde são evidentes a redução de picos de erros e a suavidade do controle fuzzy adaptativo em relação ao controle PID, mesmo em seus piores casos: Sistema de controle PID distância e sistema de controle fuzzy adaptativo aplicado a distância. O sistema de controle fuzzy adaptativo mostra resultados mais característicos dentro do domínio de problema e suavização de sinais de controle frente as variações dinâmicas do sistema, i.e. o sistema de controle fuzzy adaptativo, acabou resultando em ser sensível quanto às variações dinâmicas e atuando de suavizada frente a essas variações. Sendo assim a aplicação que apresenta melhores resultados e a adotada como sistema de controle para a melhoria de acurácia e precisão do veículo no seguimento de trajetória é o controle fuzzy adaptativo aplicado a variável orientação.

CONCLUSÃO

A integração da robótica em meios industriais vem avançando a precisão e otimização de processos, resultando níveis de desempenhos elevados. Uma dessas aplicações são os AGVs seguidores de linha dentro deste cenário industrial. Um dos pontos de investigação quanto à resultante de desempenho desses veículos estão associadas às suas limitações de movimentação, necessitando de sistemas de controle de trajetória que consigam ser sensíveis quanto a variações e fenômenos associados à sua dinâmica de movimentação.

A aplicação de AGVs em ambientes industriais, semelhantes ao objeto de estudo desta pesquisa apresenta vantagens devido à sua dinâmica em criação e mudança de trajetórias, pois basta que seja pré-definida uma trajetória perceptível pelo sensor, a câmera, para que o sistema de controle possa entrar em ação.

Quanto ao sistema de controle de AGVs um fator de importância dentro do domínio de problema, são as resultantes de acurácia e precisão do veículo ao seguir sua trajetória. Pois existe a necessidade de estabilizar-se com erros de posição e orientação os mais próximos possíveis de seus valores de referência.

A medida que a necessidade de precisão e acurácia no seguimento de trajetória vai elevando-se, a modelagem de sistemas de controle para esses veículos tende a ficar mais complexos, e a habilidade matemática humana tende a ser reduzida na busca dessa acurácia e precisão. Sendo assim, existe a necessidade de algoritmos inteligentes que consigam aproximar-se de resultados esperados frente as necessidades do sistema de controle.

Neste trabalho é utilizada a abordagem de sistemas fuzzy dentro da área de sistemas de controle, buscando modelar o conhecimento humano de forma mais intuitiva dentro da aplicação afim de melhoria quanto à acurácia desses veículos no seguimento de trajetória. Outro ponto viável quanto à aplicação de sistemas de controle fuzzy, é devido a sua liberdade

de atuação em relação ao modelo matemático, não sendo necessário mapear modelos matemáticos complexos e sim o mapeamento intuitivo do especialista em observância ao fenômeno dinâmico de movimentação do veículo.

Nessa pesquisa foram aplicados cenários de testes buscando validar o sistema de controle fuzzy adaptativo proposto, frente a uma técnica de controle tradicional, PID. Nesses cenários de testes foram validados casos em que as variáveis mensuradas foram controladas separadamente, a fim de avaliar a contribuição de cada uma no fenômeno de movimentação do veículo.

Ao aplicar o sistema de controle fuzzy adaptativo e o sistema de controle PID nas variáveis orientação e distância do veículo, foi visto que os resultados quando o sistema de controle fuzzy adaptativo foi aplicado ao controle do veículo no seguimento de trajetória os picos de erros foram menores para as variáveis mensuradas que quando comparado ao sistema de controle PID, com reduções significativas de até 80% de erros.

O sistema de controle PID mostrou-se suficiente para aplicações de cenários onde o sistema apresenta coeficientes lineares, i.e. em determinados momentos quando a dinâmica de movimentação era apresentada como a resultante de variação de cargas baixas ou quando o veículo movimentava-se sem cargas impostas os picos de erros eram aceitáveis dentro do domínio de problema. Entretanto quando a carga de transporte imposta ao veículo atingia níveis de capacidade de carga, o sistema de controle PID não mantinha o veículo seguindo a trajetória e/ou os picos de erros foram elevados em relação ao sistema de controle fuzzy adaptativo.

Outro ponto de maior abrangência dentro do domínio de problema por parte do sistema de controle fuzzy adaptativo, foi que seus parâmetros de controle foram mantidos os mesmos em todos os instantes, mesmo quando impostas as variações de carga, ou seja, o sistema conseguiu adaptar-se frente às variações dinâmicas de movimentação. Entretanto para o sistema de controle PID foram necessárias imposições de parâmetros de controle nos coeficientes de ganhos para cada cenário de teste, buscando uma adaptação do especialista manual do especialista a cada teste.

Sendo assim, para os cenários de testes buscou-se controlar e mensurar as variáveis isoladamente, onde foi possível validar que o sistema de controle fuzzy adaptativo é viável e aplicável dentro deste domínio de problema, onde a acurácia e precisão do veículo no

seguimento de trajetória foram elevadas quando comparadas ao sistema de controle clássico, PID.

6.1 Trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos futuros para gerar novas contribuições para o controle de AGVs seguidores de linha, pode-se citar a união das variáveis, orientação e distância, no sistema de controle fuzzy adaptativo buscando melhorias de resultados comparados aos resultados quando as variáveis são tratadas isoladamente.

Outro ponto é a modelagem do sistema em ambientes e cenários de testes virtuais, otimizando assim, recursos e tempo em testes do sistema de controle, objetivando apenas ajustes finos no objeto de estudo real.

Abordagens de técnicas de controle ditas como ótimas, robustas, podem ser aplicadas como comparativo ao sistema adaptativo, visando mensurar as melhores técnicas dentro do domínio de problema.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ASTROM, K.J; WITTENMARK, B.; **Adaptive Control**. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing, 1994.
- AGUIAR, A. P.; HESPANHA, J. P. Trajectory – Tracking and Path-Following of Underactuated Autonomous Vehicles With Parametric Modeling Uncertainty. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v.52, n.8, 2007.
- BORGES, G. A.; LIMA, A. M. N.; DEEP, G. S. **Design of an Output Feedback Trajectory Controller for an Automated Guided Vehicle**. XIII Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis- SC, Brasil, 2000.
- BORGES, G. A.; LIMA, A. M. N., Controladores Cinemáticos de Trajetória para Robôs Móveis com Tração Diferencial. **VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. Bauru - SP, 2003.
- BLAZIC, S.; SKRJANC, I.; MATKO, D. Globally stable direct fuzzy model reference adaptive control. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 139, n. 1, p. 3-33, 2003.
- BEHMENBURG, C. Model reference adaptive systems with fuzzy logic controllers. In: Second Conference on Control Applications, Vancouver, BC, Canada, 1993. **Proceedings...** Canada: IEE Computer Society, p. 172-176, 1993.
- CASTRO, P. A. D.; CAMARGO, H. A. Learning and optimization of fuzzy rule base by means of self-adaptive genetic algorithm. **2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems**, v. 2, p. 1037–1042, 2004. Budapest - Hungary.
- CALLAI, T. C.; COELHO, L. S.; COELHO, A. A. R. Controle Nebuloso adaptativo por modelo de referência: projeto e aplicação em sistemas não lineares. **Sba Controle & Automação**, v. 18, n. 4, Natal – Brasil, 2007.
- CHO, Y-W.; PARK, C-W.; MIGNON, P. An indirect model reference adaptive fuzzy control for SISO Takagi-Sugeno model. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 131, n. 2, p. 197 – 215, 2002.
- CORRADINI, M. L.; ORLANDO, G. Robust tracking control of mobile robots in the presence of uncertainties in the dynamical model. **Journal of Robotic Systems**, v. 18, n. 6, p. 317–323, 2001.
- DAS, T.; KAR, I. N.; Design and Implementation of an Adaptive Fuzzy Logic-Based Controller for Wheeled Mobile Robots, **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v.14, n. 3, 2006.
- EL YOUSSEF, E. S., Controle por modo deslizante de robôs móveis sobre rodas. **Tese de Doutorado**. Florianópolis, 2013.

FANTONI, I.; LOZANO, R. **Communications and Control Engineering: Non-linear Control for Underactuated Mechanical Systems**. 1. ed. London: Springer-Verlag, 2002.

FEI, J.; ZHOU, J. Robust Adaptive Control of MEMS Triaxial Gyroscope Using Fuzzy Compensator. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B**, v. 42, n. 6, p. 1599 – 1607, 2012.

FENG G. A survey on analysis and design of model based fuzzy control systems, **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 14, n. 5, p. 676-697, 2006.

FIERRO, R.; LEWIS, F. L. Control of a nonholonomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics. **Journal of Robotic Systems**, v. 14, n. 3, p. 149–163, 1997.

GOODWIN, G.C.; MAYNE, D.Q.; **A Parameter Estimation Perspective of Continuous Time Model Reference Adaptive Control**. v. 23, n. 1, 1987.

GU, H.; ZHANG, T.; SHEN, Q. Decentralized model reference adaptive sliding mode control based on fuzzy model, **Journal of Systems Engineering and Electronics**, v. 17, n. 1, p. 182-192, 2006.

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.

GOODWIN, G. C.; SIN, K. S.; **Adaptive filtering: prediction and control**. Prentice Hall, 1984.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. **Sixth International Fuzzy Systems Association World Congress/ Tutorial - IFSA95**. 1995, p. 01 – 38.

HAMMOND, G. *Agv's at Work: Automated Guided Vehicle Systems*. [S. l.]:Springer – Verlag, 1986.

JIANG, M.; MOTAI, Y.; ZHU, X., **Predictive fuzzy control for a mobile robot with nonholonomic constraints**. ICAR:12th International Conference on Advanced Robotics. **Proceedings...** [S.l.]:IEEE Computer Society 2005.

KWAK, H-J.; PARK, G-T., Design of an Adaptive PD Controller for the Weiht-Independent Motion Control of a Mobile Robot. **International Journal of Advanced Robotic Systems**. 2012.

KWAK, H-J.; PARK, G-T., Design of an Adaptive PD Controller for the Weiht-Independent Motion Control of a Mobile Robot. **International Journal of Advanced Robotic Systems**. 2012.

KOLMANOVSKY, I.; MCCLAMROCH, N. H. Developments in nonholonomic control problems. **IEE Control Systems**, v. 15, n. 6, p. 20-36, 1995.

KUNHE, F., GOMES, J., & FETTER, W. Mobile robot trajectory tracking using model predictive control. **In II IEEE latin-american robotics symposium**, São Luis, Brazil (2005).

- KOLMANOVSKY, I.; MCCLAMROCH, N. H. Developments in nonholonomic control problems. **IEE Control Systems**, v. 15, n. 6, p. 20-36, 1995.
- KOO, T.J., Stable model reference adaptive fuzzy control of a class of nonlinear systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 9, n. 4, p 624-636, 2001.
- KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications**. Prentice Hall, 1995. 574 p.
- LANDAU, Y. D.; Adaptive Control: The model reference approach. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**. v. SMC-14, n.1, p.169-170, 1984.
- 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.
- LEE, W. K; HYUN, C.; KIM, E.; PARK, M. Model reference adaptive synchronization of TS fuzzy discrete chaotic systems using output tracking control, **Chaos, Solitons, and Fractals**, v. 34, n. 5, p. 1590-1598, 2007.
- LAI, G.; LIU, Z.; ZHANG, Y.; CHEN, C. L. P. Adaptive Fuzzy Tracking Control of Nonlinear Systems With Asymmetric Actuator Backlash Based on a New Smooth Inverse. **IEEE Transactions on Cybernetics**, v. 46 n. 6, p 1250 - 1262, 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.
- MARTINS, N. A.; ELYOUSSEF, E. S.; BERTOL, D. W.; PIERI, E. R. D.; MORENO, U. F.; CASTELAN, E. d. B. Trajectory tracking of a nonholonomic mobile robot with kinematic disturbances: a variable structure control design. **Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)**, **IEEE**, v. 9, n. 3, p. 276-283, 2011.
- MARTINS, F. N., Modelagem e compensação da dinâmica de robôs móveis e sua aplicação em controle de formação. **Tese de Doutorado**. Espírito Santo, 2009.
- MARTINS, F. N.; CELESTE, W. C.; CARELLI, R.; SARCINELLI-FILHO, M.; BASTOS-FILHO, T.F. An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot trajectory tracking. **Control Engineering Practice**, v. 16, n. 11, p. 1354-1363, 2008.
- MORIN, P.; SAMSON, C. Motion control of wheeled mobile robots. **In: Springer Handbook of Robotics**. [S.l.]: Springer, p. 799-826, 2008.
- MÜLLER, T. **Automated Guided Vehicles**. IFS(Publications) Ltd/Springer-Verlag, UK/Berlin.1983.
- MAMDANI, E. H. Applications of *fuzzy* algorithm for control of a simple dynamic plant. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, New York, v. 121, n. 12. 1973, p. 1585 - 1588.
- MUKAIDOMO, M. **Fuzzy logic for beginners**. Singapore: Word Scientific, 2001.
- MCNEILL, F. M.; THRO, E. **Fuzzy logic: a practical approach**. Academic Press Professional 1994. 292 p.

- 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.
- NOUNOU, H. N. E REHMAN, H. Application of adaptive fuzzy control to AC machines, **Applied Soft Computing**, v. 7, n. 3, p. 899-907, 2007.
- NARENDRA, K.; VALANI, L.; Stable adaptive controller design—Direct Control. **IEEE Transactions on Automatic Control**. v. 23, n. 4, 1978.
- NGUYEN, H. T.; WALKER, E. A. **A First Course in Fuzzy Logic**. Third ed. Boca Raton - FL - USA: Chapman & Hall/CRC, 2006.
- NICOLETTI, M. D. C.; CAMARGO, H. A. **Fundamentos da teoria de conjuntos fuzzy**. São Carlos: Editora UFSCar, 2009.
- OLIVARES-MENDEZ, M. A.; CAMPOY, P.; MELLADO-BATALLER, I.; MONDRAGON, I.; MARTINEZ, C.; SANCHEZ-LOPEZ, J. L. Autonomous Guided Car Using a Fuzzy Controller. **Recent Advances in Robotics and Automation**, v.480, 2013.
- ORIOLO, G.; Wheeled Robots. **Encyclopedia of Systems and Control**. London: Springer-Verlag, 2014.
- ORTIGOZA, R. S.; ARANDA, M. M.; ORTIGOZA, G. S.; GUZMAN, V. M. H.; VILCHIS, M. A. M.; GONZALES, G. S.; LOZADA, J. C. H.; CARBAJAL, M. O. Wheeled mobile robots: a review. **Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)**, IEEE, v. 10, n. 6, p. 2209-2217, 2012.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da teoria de conjuntos fuzzy a processos de biomedicine**. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- MORANDIN JR. O. Projeto e construção de um AGV para sistemas flexíveis de manufatura. **Dissertação de Mestrado**. Universidades do Estado de São Paulo - USP, São Carlos, 1994.
- PARK, B. S.; YOO, S. J.; P, J. B.; CHOI, Y. H. Adaptive Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robots Considering Actuator Dynamics: Dynamic Surface Design Approach. **American Control Conference**. St Louis, USA, 2009.
- RAEISI, Y.; SHOJAEI, K.; CHATRAEI, A.; Output Feedback Trajectory Tracking Control of a Car-like Drive Weeled Mobile Robot Using RBF Neural Network. **International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference**, 2015.
- RESENDE, C.Z.; ESPINOZA, F.; BRAVO, I.; FILHO, M. S.; FILHO, T. F. B. A trajecotry Tracking Controller with Dynamic Gains for Mobile Robots. **International Conference on Intelligent Robots and Systems**. 2011.
- RICH, E. **Artificial Intelligence**. US: Mcgraw-hill Inc., 1983. 436 p.
- REZNIK, L. **Fuzzy Controllers**. United Kingdom: Newnes, 1997.
- SANTOS, R. L. D.; Desenvolvimento e análise de desempenho de método de detecção de linha utilizando visão computacional. **Trabalho de Conclusão de Curso**. São Carlos , 2016.

SU, Y.; XU, L.; LI, D. Adaptive Fuzzy Control of a Class of MIMO Nonlinear Systems With Actuator Saturation for Greenhouse Climate Control Problem. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 13, n. 2, 2016.

SHEN, Q.; JIANG, B.; COCQUEMPOT, V., Adaptive Fuzzy Observer-Based Active Fault-Tolerant Dynamic Surface Control for a Class of nonlinear Systems with Actuator Faults. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 22, n. 2, 2014.

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

SHLEEG, A. A.; ELLABIB, I. M. Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Interference Systems for the Breast Cancer Risk. **International Journal of Computer, Information, Systems and Control Engineering**, v. 7, n. 10, p. 695–699, 2013.

SUGENO, M. An introductory survey of fuzzy control information. **Science**, London, v. 36, p. 59-83, 1974.

SHAW, I.S.; SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, FAPESP, 1999.

TAHERI-KALANI, J., KHOSROWJERDI, M.J., Adaptative robust fuzzy-based dynamical controller design for wheeled mobile robot. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, v 26, p 2557-2566, 2014.

VILLATE, J. E., **Física 1: Dinâmica. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto**.2012.

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.

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.

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.

ZIMMERMANN, J. H. **Fuzzy set theory and its applications**. 2. ed. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1991.399 p.

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

_____. Outline of new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, SMC-3, n. 1, p. 28-44, 1973.

ZHENGCAI, C.; YINGTAO, Z. QIDI, W. Adaptive Trajectory Tracking Control for a Nonholonomic Mobile Robot. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 24, n. 3, 2011.

ZHANG, T.P.; WEN, H.; ZHU, Q., Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems in Pure Feedback Form Based on Input-to-State Stability. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 18, n. 1, 2010.

ZHOU, Q.; LI, H.; SHI, P. Decentralized Adaptive Fuzzy Tracking Control for Robot Finger Dynamics. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 23, n. 3, p. 501 – 510, 2015.

ZHENGCAI, C.; YINGTAO, Z. QIDI, W. Adaptive Trajectory Tracking Control for a Nonholonomic Mobile Robot. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 24, n. 3, 2011.

YANG, Y.; ZHOU, C.; REN, J. Model reference adaptive robust fuzzy control for ship steering autopilot with uncertain nonlinear systems, **Applied Soft Computing**, v. 3, n. 4, p. 305-316, 2003.

YANG, F.; WANG, C. Adaptive tracking control for uncertain dynamic nonholonomic mobile robots based on visual servoing. **Journal of Control Theory and Applications**, v. 10, n. 1, p 56–63, 2012.