

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS– UFSCAR
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA– CCET
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO– DC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO– PPGCC

Wallace Pereira Neves dos Reis

**Um Controlador Fuzzy-Adaptativo em
Cascata com Multi-sensores para o Aumento
da Exatidão na Posição do AGV Seguidor de
Linha**

Wallace Pereira Neves dos Reis

**Um Controlador Fuzzy-Adaptativo em
Cascata com Multi-sensores para o Aumento
da Exatidão na Posição do AGV Seguidor de
Linha**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência da Computação.

Área de concentração: Inteligência Artificial

Orientador: Prof^o Dr. Orides Morandim Junior

São Carlos

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Wallace Pereira Neves dos Reis, realizada em 29/05/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Orides Morandin Junior (UFSCar)

Prof. Dr. Roberto Santos Inoue (UFSCar)

Prof. Dr. Andre Carmona Hernandes (UFSCar)

Prof. Dr. Marco Henrique Terra (USP)

Prof. Dr. Denis Fernando Wolf (USP)

*Dedico esse trabalho a Giselle, minha companheira e luz da minha vida,
e a uma das minhas mães do coração, Dinda (in memoriam).*

Agradecimentos

Agradeço a toda minha família, que me apoiou a todo o instante ao longo da caminhada que me trouxe até aqui.

Agradeço à minha esposa, Giselle Couto, que compartilhou de todos os momentos que envolveram esse trabalho e me deu muito suporte.

Ao Professor Orides, meu sinceros agradecimentos por me acolher e aceitar como orientando. Obrigado por todos os conhecimentos compartilhados e que venham os próximos projetos!

Aos companheiros de TEAR e do PET-EnC que fizeram parte direta e indiretamente desse trabalho, especialmente ao amigo Guilherme José.

À Deus que me oportunizou tudo isso.

Resumo

Veículos autoguiados (AGVs) são usados em ambientes de manufatura há mais de cinco décadas. As tecnologias aplicadas aos AGVs avançaram junto com os avanços da eletrônica e da computação, o que ampliou a capacidade de sensoriamento e de processamento dos veículos. Atualmente, esses veículos são empregados em sistemas de logística interna e na linha de produção de indústrias, mas também são empregados em ambientes diversos. Por se tratar de um sistema guiado, o controle de posição é essencial para o funcionamento do sistema. Um bom desempenho do sistema de controle permite uma aplicação segura do AGV no ambiente e impacta o desempenho de uma linha de produção, por exemplo. Muitas soluções têm sido propostas na literatura, entretanto, ainda há fatores que não são considerados. Dois desses fatores são o comportamento dinâmico do veículo sob diferentes condições de carga e a utilização de diferentes gradezas para diminuir as incertezas de medição e melhorar o desempenho do controlador. Sendo o AGV um sistema complexo, várias variáveis do sistema podem ser medidas e o problema pode ser tratado como um problema multivariável. Nessa condição, é esperado que a utilização de múltiplos sensores aliada à capacidade de adaptação do controlador de acordo com a condição de carga contribua positivamente para o desempenho do sistema de controle, aumentando sua exatidão. Assim, o objetivo desse trabalho é apresentar a proposta de um controlador fuzzy-adaptativo em cascata utilizando múltiplos sensores para o problema de controle de posição de AGVs. O sistema proposto visa aumentar a exatidão na posição do AGV.

Palavras-chave: Veículo autoguiado. Sistemas de Controle. Controle de Posição. Controle Fuzzy. Controle Adaptativo. Controle em Cascata..

Abstract

Automated Guided Vehicles (AGVs) have been used in manufacturing environments for over five decades. The technologies applied to AGVs advanced along with electronics and computing technology progress, which increased vehicles' sensory and processing capacity. Currently, such vehicles are applied to internal logistics systems and industries' shop floor, but they are also used in different environments. As a guided system, position control is essential for the system. A good control system performance allows a safe application of AGV in the environment and impacts the performance of a production line, for example. Many solutions have been proposed in the literature. However, there are still factors that still need to be considered. Two of these factors are vehicle dynamics under different load conditions and the application of multiple measurements to reduce measurement uncertainties and improve controller performance. Since AGV is a complex system, several system variables can be measured, and the problem can be treated as a multivariable problem. In this condition, using multiple sensors allied with the controller's adaptive capacity following the load condition is expected to contribute positively to the control system's performance and increase its accuracy. Thus, this work aims to present the proposal of a cascaded and multi-sensors adaptive fuzzy controller for the AGVs position control problem. The proposed system aims to increase the accuracy of the AGV position.

Keywords: Automated Guided Vehicle. Control Systems. Position Control. Fuzzy Control. Adaptive Control. Multivariable Control..

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração do problema de controle de posição de um AGV seguidor de linha.	50
Figura 2 – Exemplos de trajetórias considerando a exatidão versus a precisão. . .	51
Figura 3 – Formulação do problema para o uso da câmera como sensor principal para medição de erro.	51
Figura 4 – Visão macro da proposta do trabalho.	62
Figura 5 – Representação do sistema de controle fuzzy-adaptativo em cascata proposto neste trabalho.	63
Figura 6 – Detalhamento da malha de controle da proposta nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.	65
Figura 7 – Detalhe do controlador fuzzy-adaptativo em cascata.	67
Figura 8 – Chassis base do AGV montado em estrutura de perfil de alumínio. . . .	72
Figura 9 – Representação das coordenadas de referência global e dos parâmetros e vetores de movimento envolvidos no sistema para a elaboração do modelo cinemático do AGV.	73
Figura 10 – Base eletrônica do AGV em que são fixados os sensores e a unidade de controle do veículo.	74
Figura 11 – Visão em perspectiva e lateral da base eletrônica do veículo com o detalhe da estrutura da câmera fixada na parte inferior da mesma. . . .	75
Figura 12 – Visão em perspectiva e lateral da montagem final do AGV.	75
Figura 13 – Estrutura de hardware embarcada no AGV.	76
Figura 14 – Hardware da unidade de controle, Raspberry Pi 3B, e módulo de expansão utilizado para conexão dos sensores.	77
Figura 15 – Módulo de câmera utilizado e indicação de conexão com a Raspberry Pi.	78

Figura 16 – Representação da câmera e da área capturada: por meio das distâncias e ângulo de campo de visão conhecidos, é possível aproximar o valor do pixel, em metros, na imagem.	79
Figura 17 – Exemplos das etapas de processamento de imagem executadas no serviço de processamento de imagem.	80
Figura 18 – Eixos de referência do AGV e de referência da imagem e valores de ângulo e distância de acordo com o eixo de referência do AGV.	81
Figura 19 – Descrição gráfica do método para cálculo do ângulo e da distância do AGV em relação à faixa guia.	82
Figura 20 – Exemplos de valores de ângulo e da distância do AGV em relação à faixa guia de acordo com o eixo de referência.	82
Figura 21 – Módulo GY-521 com CI MPU6050 e eixos e sentidos de giro do sensor.	84
Figura 22 – Encoder incremental rotativo e módulo usado para leitura dos pulsos dos encoders.	85
Figura 23 – Sensor de corrente por efeito Hall baseado no CI ACS712ELECTR-30A-T.	87
Figura 24 – Conversor analógico-digital 16 bits ADS1115.	87
Figura 25 – Motores DC utilizados como atuadores do AGV AD02.	88
Figura 26 – Módulo de acionamento dos motores DC: SparkFun Monster Moto Shield.	89
Figura 27 – Arquitetura inspirada em SOA embarcada no AGV.	91
Figura 28 – Representação de um serviço utilizando o padrão Fachada.	93
Figura 29 – Representação de um software majoritário utilizando o padrão Fachada.	94
Figura 30 – Diagrama UML de casos de uso do software majoritário de leitura das entradas analógicas.	95
Figura 31 – Diagrama UML de classes do software majoritário de leitura das entradas analógicas.	95
Figura 32 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 1.	98
Figura 33 – Superfície de controle do sistema de inferência fuzzy 1.	99
Figura 34 – Detalhamento das malhas de controle fuzzy implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.	100
Figura 35 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 2.	101
Figura 36 – Superfície de controle do sistema de inferência fuzzy 2.	103
Figura 37 – Detalhamento das malhas de controle fuzzy implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.	104

Figura 38 – Comparação do início do movimento do AGV medido pelas IMUs e pelo processamento de imagem.	105
Figura 39 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 3.	107
Figura 40 – Detalhamento das malhas de controle fuzzy implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.	109
Figura 41 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 4.	110
Figura 42 – Detalhamento das malhas de controle fuzzy. Malha de controle com FIS1, FIS2, FIS3 e FIS 4 com controle PID de velocidade dos motores.	112
Figura 43 – Detalhamento das malhas de controle PID implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.	113
Figura 44 – Detalhamento das malhas de controle PID concorrente implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.	115
Figura 45 – Imagem com as pistas demarcadas por fitas brancas no piso de borracha preto usadas para os ensaios do AGV com as respectivas medidas.	120
Figura 46 – Configurações de carga ensaiadas, com a localização das cargas na plataforma do AGV.	120
Figura 47 – Resultados dos experimentos com PID1 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	127
Figura 48 – Resultados do controlador PID1 para o AGV a vazio no cenário pista retangular.	128
Figura 49 – Resultados do controlador PID1 para o AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	129
Figura 50 – Resultados dos experimentos com PID2 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	130
Figura 51 – Resultados dos controladores PID2 para o AGV a vazio no cenário pista retangular.	131
Figura 52 – Resultados dos controladores PID2 para o AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	132
Figura 53 – Resultados dos experimentos com PID3 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	133

Figura 54 – Resultados dos experimentos com PID3 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	134
Figura 55 – Resultados do controlador PID3 para o AGV a vazio no cenário pista retangular.	135
Figura 56 – Resultados do controlador PID3 para o AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	136
Figura 57 – Resultados do controlador PID3 para o AGV com cargas de 2 <i>kg</i> e 3 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	137
Figura 58 – Resultados do controlador PID3 para o AGV com carga de 4 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	138
Figura 59 – Resultados dos experimentos com PID4 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	139
Figura 60 – Resultados dos experimentos com PID4 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	140
Figura 61 – Resultados do controlador PID4 para o AGV a vazio no cenário pista retangular.	141
Figura 62 – Resultados do controlador PID4 para o AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	142
Figura 63 – Resultados do controlador PID4 para o AGV com carga de 2 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	143
Figura 64 – Resultados do controlador PID4 para o AGV com cargas de 3 <i>kg</i> e 4 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	144
Figura 65 – Resultados dos experimentos com Fuzzy1a na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para condição a vazio.	145
Figura 66 – Resultados do controlador Fuzzy1a, com entradas de ângulo e distância medidos. AGV a vazio no cenário pista retangular.	146
Figura 67 – Resultados do controlador Fuzzy1a, com entradas de ângulo e distância medidos. AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	147
Figura 68 – Resultados dos experimentos com Fuzzy1b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	148
Figura 69 – Resultados dos experimentos com Fuzzy1b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	149

Figura 70 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV a vazio no cenário pista retangular.	150
Figura 71 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	151
Figura 72 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 2 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	152
Figura 73 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 3 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	153
Figura 74 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 4 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	154
Figura 75 – Resultados dos experimentos com Fuzzy2a na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	155
Figura 76 – Resultados do controlador Fuzzy2a da Figura 37(a). AGV a vazio no cenário pista retangular.	156
Figura 77 – Resultados do controlador Fuzzy2a da Figura 37(a). AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	157
Figura 78 – Resultados dos experimentos com Fuzzy2b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	158
Figura 79 – Resultados dos experimentos com Fuzzy2b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	159
Figura 80 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV a vazio no cenário pista retangular.	160
Figura 81 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	161
Figura 82 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 2 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	162

Figura 83 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 3 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	163
Figura 84 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 4 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	164
Figura 85 – Resultados dos experimentos com Fuzzy3a na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	165
Figura 86 – Resultados do controlador Fuzzy3a da Figura 40(a). AGV a vazio no cenário pista retangular.	166
Figura 87 – Resultados do controlador Fuzzy3a da Figura 40(a). AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	167
Figura 88 – Resultados dos experimentos com Fuzzy3b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	168
Figura 89 – Resultados dos experimentos com Fuzzy3b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	169
Figura 90 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV a vazio no cenário pista retangular.	170
Figura 91 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 1 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	171
Figura 92 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 2 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	172
Figura 93 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 3 <i>kg</i> no cenário pista retangular. A figura mostra dois ensaios diferentes com a mesma carga para mostrar o comportamento típico do veículo.	173
Figura 94 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 4 <i>kg</i> no cenário pista retangular.	174
Figura 95 – Resultados dos experimentos com Fuzzy4 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	175

Figura 96 – Resultados dos experimentos com Fuzzy4 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.	176
Figura 97 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV a vazio no cenário pista retangular.	177
Figura 98 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV com carga de 1 kg no cenário pista retangular.	178
Figura 99 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV com carga de 2 kg no cenário pista retangular.	179
Figura 100 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV com carga de 3 kg no cenário pista retangular.	180
Figura 101 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV com carga de 4 kg no cenário pista retangular.	181
Figura 102 – Representação dos elementos básicos de uma malha de controle em malha fechada.	214
Figura 103 – Representação de um sensor real como a combinação de um sensor ideal e suas fontes de erro.	215
Figura 104 – Representação de um sistema de controle fuzzy simples considerando múltiplas entradas e apenas uma saída.	217
Figura 105 – Esquemático das conexões entre os módulos de expansão da GPIO e os conversores de nível lógico.	225
Figura 106 – Esquemático das conexões entre os módulos de expansão da GPIO e os dispositivos do AGV.	226
Figura 107 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 1 para os controladores Fuzzy2a e Fuzzy2b.	234
Figura 108 – Superfície de controle do sistema de inferência fuzzy 1 para os controladores Fuzzy2a e Fuzzy2b.	234
Figura 109 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 kg.	235
Figura 110 – Ações de controle dos FIS2 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 0 kg.	236
Figura 111 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 kg.	237
Figura 112 – Ações de controle dos FIS2 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 1 kg.	238
Figura 113 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 kg.	239
Figura 114 – Ações de controle dos FIS2 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 0 kg.	240

Figura 115–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 <i>kg</i>	241
Figura 116–Ações de controle dos FIS2 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 1 <i>kg</i>	242
Figura 117–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 2 <i>kg</i>	243
Figura 118–Ações de controle dos FIS2 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 2 <i>kg</i>	244
Figura 119–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 3 <i>kg</i>	245
Figura 120–Ações de controle dos FIS2 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 3 <i>kg</i>	246
Figura 121–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 4 <i>kg</i>	247
Figura 122–Ações de controle dos FIS2 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 4 <i>kg</i>	248
Figura 123–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 <i>kg</i>	249
Figura 124–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 0 <i>kg</i>	250
Figura 125–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 0 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	251
Figura 126–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 <i>kg</i>	252
Figura 127–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 1 <i>kg</i>	253
Figura 128–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 1 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	254
Figura 129–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 <i>kg</i>	255
Figura 130–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 0 <i>kg</i>	256
Figura 131–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 0 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	257
Figura 132–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 <i>kg</i>	258

Figura 133–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 1 <i>kg</i>	259
Figura 134–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 1 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	260
Figura 135–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 2 <i>kg</i>	261
Figura 136–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 2 <i>kg</i>	262
Figura 137–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 2 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	263
Figura 138–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 4 <i>kg</i>	264
Figura 139–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 4 <i>kg</i>	265
Figura 140–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 4 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	266
Figura 141–Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 1 para o controlador Fuzzy4.	267
Figura 142–Superfície de controle do sistema de inferência fuzzy 1 para o controlador Fuzzy.	267
Figura 143–Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 2 para o controlador Fuzzy4.	268
Figura 144–Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 3 para o controlador Fuzzy4.	269
Figura 145–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 <i>kg</i>	270
Figura 146–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 0 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	271
Figura 147–Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 0 <i>kg</i>	272
Figura 148–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 0 <i>kg</i>	273
Figura 149–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 <i>kg</i>	274

Figura 150–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 1 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	275
Figura 151–Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 1 <i>kg</i>	276
Figura 152–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 1 <i>kg</i>	277
Figura 153–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 2 <i>kg</i>	278
Figura 154–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 2 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	279
Figura 155–Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 2 <i>kg</i>	280
Figura 156–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 2 <i>kg</i>	281
Figura 157–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 3 <i>kg</i>	282
Figura 158–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 3 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	283
Figura 159–Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 3 <i>kg</i>	284
Figura 160–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 3 <i>kg</i>	285
Figura 161–Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 4 <i>kg</i>	286
Figura 162–Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 4 <i>kg</i> . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.	287
Figura 163–Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 4 <i>kg</i>	288
Figura 164–Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 4 <i>kg</i>	289

Lista de tabelas

Tabela 1 – Identificação das grandezas medidas pelos sensores embarcados no AGV e identificação de algumas grandezas que podem ser estimadas por meio de algoritmos.	64
Tabela 2 – Características da câmera empregada no AGV.	78
Tabela 3 – Variáveis da imagem e do sensor da câmera e equivalências de tamanho do pixel.	79
Tabela 4 – Principais especificações do módulo GY-521 e IMU MPU6050.	84
Tabela 5 – Especificações do encoder E6B2-CWZ6C.	85
Tabela 6 – Principais parâmetros do sensor de corrente por efeito Hall ACS712.	87
Tabela 7 – Especificações dos Motores DC utilizados no AGV AD02.	88
Tabela 8 – Principais parâmetros do Módulo e dos CIs VNH2SP30.	89
Tabela 9 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 1.	99
Tabela 10 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 2.	102
Tabela 11 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 3.	107
Tabela 12 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 4.	111
Tabela 13 – Controladores PID implementados no AGV para comparação com os controladores fuzzy da proposta.	122
Tabela 14 – Controladores fuzzy implementados no AGV.	122
Tabela 15 – Variáveis medidas nos sistemas de controle PID e Fuzzy implementados.	123
Tabela 15 – Continuação.	124
Tabela 15 – Continuação.	125
Tabela 16 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV a vazio.	182
Tabela 17 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV com carga 1 <i>kg</i>	183
Tabela 18 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV com carga 2 <i>kg</i>	184

Tabela 19 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV com carga 3 <i>kg</i>	185
Tabela 20 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV com carga 4 <i>kg</i>	186
Tabela 21 – Intervalo de amostragem e taxa de quadros por segundo (FPS) de cada controlador embarcado e ensaiado no AGV.	187
Tabela 22 – Base de regras do sistema de inferência fuzzy 1 para os controladores Fuzzy2a e Fuzzy2b.	233
Tabela 23 – Base de regras do sistema de inferência fuzzy 1 para o controlador Fuzzy4.	268
Tabela 24 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 2 para o controlador Fuzzy4.	269
Tabela 25 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 3.	270

Lista de siglas

AGC *Automated Guided Cart*

AuGV *Automatic Guided Vehicle*

AGVs *Automated Guided Vehicles*

CLPs *Controladores Lógicos Programáveis*

FMS *Flexible Manufacturing Systems*

FIS *Fuzzy Inference System*

LGV *Laser-guided Vehicle*

LiDAR *Light Detection And Ranging*

MIMO *multiple-input multiple-output*

MPC *Model Predictive Control*

PD+ *Proporcional-Derivativo +*

PID Proporcional-Integral-Derivativo

PSO *Particle Swarm Optimization*

QR Code *Quick Response Code*

RFID *Radio Frequency Identification*

RSL Revisão Sistemática da Literatura

SGV *Self-guided Vehicle*

SISO *single-input single-output*

SPA *Sense-Plan-Act*

SOA *Service-oriented Architecture*

Lista de símbolos

δ	Distância, em mm, entre o centro geométrico do AGV e o centro da guia ou faixa
θ	Ângulo de orientação, em graus, do AGV em relação à guia
v_d	Velocidade tangencial da roda direita
v_e	Velocidade tangencial da roda esquerda
x_{agv}, y_{agv}, θ	Coordenadas de referência local do AGV
P	Centro geométrico do AGV
v	Velocidade linear do AGV no eixo x_{agv} em coordenadas locais do veículo
ω	Velocidade angular do AGV em relação ao ponto P , seu centro geométrico
r	Raio das rodas de tração do AGV
$\dot{\varphi}_d$	Velocidade angular da roda de tração direita
$\dot{\varphi}_e$	Velocidade angular da roda de tração esquerda
ℓ	Distância entre o ponto P e o centro de cada roda de tração
N	Relação de redução da caixa de redução do motor DC
$r(t)$	Referência de entrada de uma malha de controle fechada
$y(t)$	Saída de uma malha de controle fechada
$m_y(t)$	Medição do sensor de uma malha de controle fechada
$e(t)$	Valor de erro
$u(t)$	Sinal ou ação de controle
$X(t)$	Vetor de variáveis de entrada de uma planta multivariável

$Y(t)$	Vetor de variáveis de saída de uma planta multivariável
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integral
K_d	Ganho derivativo
T_i	Constante de tempo de integração
T_d	Constante de tempo da derivação
K_{cr}	Ganho proporcional crítico
P_{cr}	Período crítico
$\tilde{Y}(t)$	Vetor de variáveis de saída da planta
$M_y(t)$	Vetor de medições da saída a partir dos sensores do AGV
u_{ref}	Velocidade de referência para o AGV
$u_d(t), u_e(t)$	Sinal de controle para cada um dos motores DC
$\dot{\delta}$	Taxa de variação da distância do AGV em relação à guia
$\dot{\theta}$	Taxa de variação do ângulo de orientação, velocidade angular, do AGV em relação à guia

Sumário

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Contextualização	31
1.2	Motivação	33
1.3	Justificativa	34
1.4	Hipóteses do trabalho	36
1.5	Objetivos	37
1.6	Delimitações do trabalho	38
1.7	Método de pesquisa e desenvolvimento	39
1.8	Organização do trabalho	40
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	43
2.1	Considerações Iniciais	43
2.2	Definição do Problema	43
2.2.1	Definições Preliminares	44
2.2.2	O Problema de Controle de Posição de AGVs Seguidores de Linha	48
2.3	Sensores	52
2.4	Trabalhos Correlatos	53
2.5	Considerações Finais	60
3	PROPOSTA DO TRABALHO	61
3.1	Considerações Iniciais	61
3.2	Proposta	62
3.3	Considerações Finais	69
4	DESENVOLVIMENTO	71
4.1	Considerações Iniciais	71
4.2	AGV Diferencial AD02	71

4.2.1	Unidade de Controle: Hardware e Software	76
4.2.2	Sensores e Atuadores Embarcados	77
4.2.3	Arquitetura de Software e Padrão de Desenvolvimento	89
4.3	Projeto dos Sistemas de Controle do AGV	96
4.3.1	Comando dos Motores	97
4.3.2	Controle Fuzzy-Adaptativo em Cascata	97
4.3.3	Controle PID	111
4.4	Considerações Finais	114
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	117
5.1	Considerações Iniciais	117
5.2	Métodos	117
5.2.1	Indicadores de Desempenho	118
5.2.2	Descrição dos Experimentos	119
5.3	Resultados	125
5.3.1	Controladores PID	126
5.3.2	Controladores Fuzzy	144
5.3.3	Resultados Quantitativos	177
5.4	Discussão	187
5.5	Considerações Finais	190
Conclusões		193
REFERÊNCIAS		201
APÊNDICE A CONCEITOS DE SISTEMAS DE CONTROLE		213
A.1	Sistemas de Controle Fuzzy	216
A.2	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo	219
A.3	Pseudo-código do controlador PID Implementado	221
APÊNDICE B ESTRUTURA, SERVIÇOS E SOFTWARES MAJORI-		
TÁRIOS IMPLEMENTADOS		223
B.1	Eletrônica Embarcada	223
B.2	Software Majoritário de Odometria dos Encoders	224
B.3	Serviço de Correção do Movimento	228
APÊNDICE C SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY		233
C.1	Fuzzy2	233
C.1.1	Fuzzy2a - Outras variáveis medidas	235
C.1.2	Fuzzy2b - Outras variáveis medidas	239
C.2	Fuzzy3	249

C.2.1	Fuzzy3a - Outras variáveis medidas	249
C.2.2	Fuzzy3b - Outras variáveis medidas	255
C.3	Fuzzy4	267

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Veículos autoguiados, do inglês *Automated Guided Vehicles* (AGVs), são veículos automatizados usados desde meados da década de 1950 para transporte de materiais em linhas de produção (ULLRICH, 2015). Ao longo dos anos e com o desenvolvimento de novas tecnologias e novos sensores, surgiram sinônimos para o termo como *Self-guided Vehicle* (SGV), *Laser-guided Vehicle* (LGV), *Automated Guided Cart* (AGC) ou, ainda, *Automatic Guided Vehicle* (AuGV), para diferenciação da sigla de AGV. Porém, não há diferenças significativas entre as funções apesar dos diferentes nomes.

Na literatura, AGV também é chamado de robô móvel. Segundo Tzafestas (2013), um robô móvel é um robô sobre rodas que pode se mover entre dois pontos sem a assistência de um operador humano. De fato, a robótica móvel é um ramo de pesquisa abrangente que inclui diferentes aplicações e AGVs podem ser considerados uma categoria de robô móvel. A principal característica que os diferencia é a aplicação. Um robô móvel é um robô com propósito genérico, muito usado em pesquisas. Já um AGV tem sua aplicação bem delimitada, o transporte e manipulação de materiais em ambientes industriais, armazéns e portos, por exemplo (FELEDY, 2017; OYEKANLU *et al.*, 2020) e também têm migrado para outros ambientes como cozinhas industriais (TEBALDI *et al.*, 2021) e hospitais (SØRAA; FOSTERVOLD, 2021). Esse trabalho segue a definição da norma VDI 2510 para AGVs, como citado por Ullrich (2015): veículos de transporte autopropelidos e apoiados no solo que são controlados automaticamente e guiados por um sistema de orientação sem contato.

Como descrito na definição de um AGV, o sistema de orientação ou guias sem contato fazem parte da operação do veículo, independentemente do tipo de sensor usado. Por

isso, uma parte essencial do sistema de controle de um AGV é o controle de posição, de modo que o AGV não só siga a guia, mas o faça com exatidão e precisão, sem movimentos bruscos e com segurança para as máquinas e pessoas que podem estar no mesmo ambiente que o veículo. Este trabalho trata do problema de controle de posição em AGVs utilizando uma câmera e visão computacional como o sensor primário para identificação de uma guia passiva no chão, uma faixa de cor contrastante com o piso.

Sistemas de controle, de modo geral, possuem indicadores de desempenho como máximo sobressinal, tempo de subida, tempo de acomodação e erro em regime permanente (MARLIN, 2015). Um controle de posição mal ajustado, que tem um desempenho ruim e, por isso, resultados ruins nos indicadores citados reflete em uma operação ruim do veículo. Um valor alto de máximo sobressinal, ou *overshoot*, causa a oscilação do veículo, o que pode ser prejudicial para a carga e para o ambiente de operação do AGV. Com um valor alto de erro em regime permanente, o veículo pode provocar vibrações na carga, podendo impedir o transporte de cargas frágeis. Além disso, um controle bem ajustado e com um nível baixo de erro de tolerância de posição possibilita a aplicação do AGV em espaços mais estreitos ainda de forma segura.

Para melhorar o desempenho de um AGV dois fatores essenciais são o sistema de sensoriamento do veículo e a estratégia de controle. Sensores são a interface do veículo com o mundo real, porém, todos os sensores medem com um grau de incerteza. Dessa forma, diminuir a incerteza da medição, por exemplo, usando mais sensores medindo diferentes grandezas, resulta em interpretações mais corretas do ambiente e informações menos incertas para o sistema de controle. Entretanto, apenas receber entradas com menor incerteza não é suficiente para um aumentar o desempenho de um controlador. Em um sistema dinâmico complexo como de um AGV, o controlador deve ser capaz de atuar em um intervalo de operação não-linear.

Apesar das características não-lineares do sistema, modelos cinemáticos são encontrados em um grande número de trabalhos no domínio de problema (REIS; MORANDIN JUNIOR, 2021; REIS; COUTO; MORANDIN JUNIOR, 2022a). Modelos cinemáticos descrevem o movimento do veículo, considerando suas restrições de movimentos, em uma análise vetorial que não leve em conta a aceleração necessária e conseqüente para a variação do movimento. Dessa forma, controles puramente cinemáticos tem um desempenho ruim em situações de condição de carga e variação de velocidade diferentes do ponto de sintonia, por exemplo.

Por esse motivo é importante considerar a dinâmica do veículo no desenvolvimento do sistema de controle. Modelos dinâmicos são mais complexos que modelos puramente cinemáticos, pois a quantidade de fenômenos envolvidos aumenta substancialmente e o comportamento desses fenômenos nem sempre são conhecidos, além de ser difícil modelar a interação entre elementos do veículo. Entretanto, um controle dinâmico é capaz de atuar em condições que o modelo cinemático não o faz.

Em resumo, AGVs são sistemas dinâmicos não-lineares com característica multivariável, dado o número de elementos que compõem o sistema e o número de variáveis envolvidas no domínio do problema. Sua operação ocorre sob condições de variações dinâmicas da planta, seja por consequência de diferentes condições de carga, por variação de atrito com o piso, ou mudanças de velocidade. Por esses motivos, o controlador proposto para o problema deve ser capaz de lidar com o número de variáveis do sistema e ter características adaptativas para ser capaz de responder às variações das condições de operação do veículo.

1.2 Motivação

Apesar de serem equipamentos há muito usados na indústria, o problema do controle de posição de AGVs não é um tema exaurido e a pesquisa em AGVs tem um campo de aplicações e investigações em aberto. O avanço da tecnologia em sensores, atuadores e hardware de processamento de dados habilitam novas aplicações e redefinem tecnologias padrões aplicadas a AGVs (ULLRICH, 2015).

Para o atendimento dos requisitos do mercado e a aplicação em sistemas flexíveis de produção, *Flexible Manufacturing Systems* (FMS) (CUPEK *et al.*, 2020), o sensoriamento do AGV tem grande impacto no desempenho do sistema de produção, tanto no sentido de segurança da aplicação quanto no desempenho em relação à execução das tarefas (BOSTELMAN; HONG; EASTMAN, 2014; GONZÁLEZ *et al.*, 2017). E o controle de posição do AGV com exatidão e precisão contribui para ambos os fatores.

O sistema de sensoriamento de um AGV é uma parte do projeto que tem grande impacto no controle, mas pode significar um custo elevado. Além disso, a escolha do sensor deve observar o ambiente de aplicação e as tarefas a serem executadas pelo AGV (LYNCH *et al.*, 2018).

Segundo Ullrich (2015), existem soluções padronizadas cujo uso é comum e aceito, como sensores laser e magnéticos, mas ao mesmo tempo, sensores novos e de baixo-custo tem sido explorados. Nesse sentido, o estudo de técnicas e sensores adequados ao problema e ao ambiente de operação de um AGV se faz necessário, com o objetivo de aproximar ao máximos duas características que podem ser excludentes quanto se trata de sensores: a diminuição do custo e a melhora do desempenho do sistema de controle.

Com as características do sistema dinâmico e de sua operação regular discutidas na Seção 1.1, o controlador de posição aplicado ao problema deve ser capaz de responder às variações dinâmicas e não-lineares da planta, apontado para o uso de técnicas de controle inteligentes e adaptativas. Além disso, por se tratar de um sistema complexo, a medição de mais variáveis de saída do sistema significa maior conhecimento sobre seu comportamento e maior capacidade de atuação.

As características do problema já descritas motivam a pesquisa no sentido de construir

um controlador fuzzy-adaptativo em cascata com aplicação de múltiplos sensores de forma a aumentar a exatidão e/ou precisão de posição de um AGV seguidor de linha.

1.3 Justificativa

Como citado anteriormente, sistemas de AGVs estão em uso há mais de cinco décadas. Entretanto, as pesquisas na área ainda apresentam tendência de crescimento Reis, Couto e Morandin Junior (2022a).

Diferentes abordagens de controle são propostas na literatura para solução do problema. Qi e Wu (2020) utiliza um controlador preditivo baseado em modelo, do Inglês *Model Predictive Control* (MPC), assim como Wang *et al.* (2020a) que, porém, utiliza uma rede neural artificial para sintonia de parâmetros do controlador. O controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) clássico também é aplicado ao problema, como em Sun e Liang (2020), Liu, Wang e Liang (2020), assim como versões não lineares do controlador, como o controlador Proporcional-Derivativo + (PD+) (ANDREEV; PEREGUDOVA, 2020), PID de ordem fracionada (AMMAR; AZAR, 2019) e o PID não-linear proposto por Zangina *et al.* (2020).

A abordagem de projeto de controladores *Backstepping* também é muito empregada no problema, dada a característica de linearização, como em Liu *et al.* (2020), Fu *et al.* (2020), Hasan e Alwan (2020), Wu *et al.* (2019), Thi *et al.* (2019). Assim como o uso de controladores robustos por modo deslizante (CHEN *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2020; YILDIZ *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2019; HAN; CHENG; XU, 2019; ZHANG *et al.*, 2019; DÒRIA-CEREZO *et al.*, 2019; REN *et al.*, 2019).

A partir dos resultados de Reis, Couto e Morandin Junior (2022a), identificou-se a relevância da aplicação estratégias de controle inteligente no domínio do problema. Sistemas fuzzy são utilizados como controladores principais (KIM; KIM, 2020; YAN *et al.*, 2019; SEPTYAN; AGUSTINAH, 2019; USHIKOSHI *et al.*, 2018), ou adaptador de ganhos de controladores PID (LI *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020b; ZHOU; CHEN; ZHANG, 2019) e das leis de controle de controladores por modos deslizantes (LIN; YONGSHENG; JUN, 2018; HWANG; YANG; HUNG, 2018). Outras técnicas inteligentes empregadas no problema são o algoritmo de otimização por enxame de partículas, do Inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO), para adaptação dos ganhos de um controlador PID (ZHOU; ZHANG; CHEN, 2019) e o controlador adaptativo baseado em redes neurais artificiais proposto em Chen *et al.* (2020). O número de trabalhos relacionados, que foram publicados nos últimos dois anos e meio, mostram como a área de pesquisa é prolífica.

Apesar dos muitos trabalhos que apresentam controladores para o problema de posição do AGV, poucos discutem diretamente a diminuição na oscilação do veículo e, consequentemente, da carga, ou a necessidade do aumento da exatidão e precisão do veículo devido à corredores mais estreitos. Um controlador exato e/ou preciso aborda esses problemas,

mesmo que de forma indireta.

Para o primeiro caso, estudos que utilizam controladores por modos deslizantes abordam o problema de trepidação do veículo, chamado, em Inglês, de *chattering*, como em Liu *et al.* (2020), Yildiz *et al.* (2020), Han, Cheng e Xu (2019). É uma vibração de alta frequência no veículo causada pelo uso de modelos dinâmicos muito simplificados, ou pela negligência total do modelo dinâmico, e pelo uso de controladores digitais, que induzem o fenômeno por causa da frequência de amostragem (UTKIN; LEE, 2006).

No caso da aplicação de AGVs em espaços mais estreitos, Weckx *et al.* (2020) apresentam um controlador MPC com uma abordagem de ajuste dinâmico da velocidade máxima do veículo que adapta a velocidade do AGV de acordo com o ambiente detectado. O AGV empilhadeira utilizado no trabalho possui um sensor laser para localização no ambiente. Entretanto, os resultados apresentados são simulados e consideram apenas o modelo cinemático do veículo.

Observa-se que os dois casos anteriores têm um ponto em comum, a não consideração do modelo dinâmico do veículo. No primeiro caso, isso causa um comportamento adverso do controlador. Para o segundo, os resultados da simulação tem grande chance de não se reproduzirem em um ambiente real.

Na literatura, muitos trabalhos ainda desconsideram o modelo dinâmico para o projeto do sistema de controle do AGV. Poucos trabalhos discutem a importância do modelo, mas justificam o uso apenas do modelo cinemático. Por exemplo, Chen *et al.* (2019) justifica o uso de um controlador cinemático devido às limitações do atuador da planta. Apesar de apresentar a relevância do modelo dinâmico no problema, Jacobs *et al.* (2019) e Setiawan *et al.* (2016) citam a dificuldade de modelagem, o aumento da complexidade do controlador e a adição de não-linearidades no sistema para justificar o uso de um modelo cinemático.

Outros trabalhos implementam recursos para compensar o modelo dinâmico não modelado, como Kar *et al.* (2019) e Yin, Yang e Xiong (2014) que propõem uma rede neural artificial para estimar os estados dinâmicos do AGV e Abdelhakim e Abdelouahab (2019) que utiliza um sistema neuro-fuzzy para se adaptar às não-linearidades do sistema.

Por outro lado, os resultados de Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) mostram um aumento no número de trabalhos que consideram o modelo dinâmico do AGV nos últimos três anos, por exemplo, Liu *et al.* (2020), Ammar e Azar (2019), Fu *et al.* (2020), Zangina *et al.* (2020), Han, Cheng e Xu (2019), Wu *et al.* (2019), para citar apenas trabalhos que modelam a dinâmica de AGVs diferenciais. Bai *et al.* (2019a) apresenta a comparação entre um controlador MPC puramente cinemático e um controlador MPC dinâmico. Para a realização das simulações foi utilizado um software de dinâmica multi-corpo chamado ADAMS e diferentes percursos foram testados. Os resultados mostram que o controlador dinâmico obteve melhores resultados em todos os casos, sendo que em alguns percursos mais difíceis o AGV com controlador puramente cinemático tendeu à instabilidade, perdendo-se da guia.

Outro aspecto ligado à dinâmica do veículo e ao projeto e validação do controlador é a experimentação em diferentes condições de carga. A minoria dos trabalhos selecionados em Reis e Morandin Junior (2021) e Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) apresentam resultados do controlador proposto sob diferentes condições de carga, como Wu *et al.* (2019), Hwang, Yang e Hung (2018), Roy *et al.* (2017), Başçi e Derdiyok (2014). Assim, mesmo que o modelo dinâmico seja considerado, o controlador não foi testado em diferentes regiões de operação.

Em relação ao sistema de sensoriamento do AGV, Reis e Morandin Junior (2021) investigaram a relação dos sensores aplicados com a área de aplicação do AGV e a aplicação de técnicas de fusão de sensores no domínio do problema. Para o primeiro ponto, além de não identificar uma relação direta entre a área de aplicação do AGV e o sensor e técnicas de sensoriamento, como fusão de sensores, aplicadas, foi detectado que os trabalhos selecionados não consideram o ambiente de trabalho do AGV na escolha dos sensores. AGVs podem operar em ambientes diversos com diferentes níveis de ruído e sujeira, que afetam diretamente os sensores do veículo. Isso mostra a necessidade de avaliar os sensores aplicados no problema e, na medida do possível, considerar as condições ambientais próximas da aplicação fim do veículo.

Diante dos trabalhos citados e da análise da literatura, justifica-se a proposta da implementação de um controlador fuzzy-adaptativo em cascata utilizando múltiplos sensores para o problema de controle de posição de um AGV seguidor de linha. A variação dinâmica intrínseca à operação regular de um AGV implica na necessidade de um sistema de controle capaz de se adaptar à essas variações.

1.4 Hipóteses do trabalho

Baseando-se nos resultados de Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) e da revisão bibliográfica realizada, é possível identificar que: *(i)* a literatura trata, em grande parte, do problema de controle de posição de AGVs e robôs móveis como um problema multi-variável, *(ii)* técnicas de Controle Inteligente, mais especificamente controladores fuzzy, são amplamente aplicados ao problema, *(iii)* apesar de sistema fuzzy já apresentarem certo grau de adaptabilidade dada seu modelo descrito considerando incertezas, considerações de projeto e a seleção de variáveis de entrada podem colaborar para respostas mais adequadas do sistema de controle à variações nas condições de operação do sistema.

Dessa forma, a hipótese desse trabalho é que o uso de um controle fuzzy-adaptativo em cascata utilizando múltiplos sensores aumenta a exatidão e/ou precisão de posição de um AGV seguidor de linha e obtém resultados com maior exatidão e/ou precisão de posição do que controladores propostos no estado da arte da literatura e que o controlador PID proposto para comparação de desempenho.

Caso essa hipótese não seja satisfeita, espera-se obter resultados de exatidão e/ou pre-

cisão de posição similares aos de controladores propostos no estado da arte da literatura, e ainda obter melhores resultados do que o controlador PID para as diferentes condições de carga. Deve-se, também, discutir o impacto do uso dos sensores e comportamento do sistema embarcado, apresentando estratégias de projeto de sistemas de controle.

1.5 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é propor um controlador fuzzy-adaptativo em cascata utilizando múltiplos sensores que resulte no aumento da exatidão e/ou precisão na posição do AGV seguidor de linha em comparação com o estado da arte. Para que esse objetivo seja alcançado, foram definidos objetivos específicos que investigam elementos que compõe o sistema de controle proposto.

A literatura apresenta sistemas de controle de posição de AGVs com diversos tipos de sensores diferentes. Para o caso específico de AGVs seguidores de linha, o número de sensores possíveis diminui, pois nem todos os sensores são adequados para medir grandezas referentes à uma faixa no chão. Por outro lado, o uso de sensores pode ser complementar, dado que todo sensor possui um nível de incerteza de medição. Dois objetivos específicos do trabalho relacionado à essa questão são: (OE1) investigar, dentre os sensores propostos no projeto do AGV, quais sensores necessários e seus impactos para o domínio do problema e (OE2) examinar qual a relação desses sensores com a estratégia de controle proposta sob os pontos de vista da aplicação adequada ao problema e dos requisitos do sistema de controle.

O uso de um maior número de sensores no veículo permite medir ou estimar um número maior de variáveis do sistema. Para a plataforma proposta, existem quatro tipos de sensores disponíveis para o controlador. À primeira vista, imagina-se que quanto maior o número de variáveis medidas, melhor. Entretanto, a medição de um número maior de sensores envolve maior custo computacional, o que pode gerar um atraso na malha de controle que degrade o desempenho do controlador. Por isso, é também um objetivo específico (OE3) avaliar o uso de mais variáveis do AGV e a diversidade das grandezas consideradas no controle de posição, examinando seu impacto na exatidão e/ou precisão e no desempenho do sistema.

O uso de diferentes sensores no AGV possibilita a observação de comportamento do veículo que vão além da posição e ângulo de orientação. Nesse sentido, a partir da leitura das correntes dos motores, o objetivo específico OE4 é desenvolver um controlador fuzzy-adaptativo em cascata para diferentes condições de carga considerando variáveis dinâmicas do AGV.

A plataforma desenvolvida para testar as hipóteses do trabalho foi pensada como um objeto de estudos duradouro, que possa ser atualizada e modificada para continuar a pesquisa. Dessa forma, outro objetivo específico (OE5) é desenvolver uma arquitetura

de software que fique como legado para o laboratório, permitindo o fácil entendimento e reuso do software implementado.

1.6 Delimitações do trabalho

As delimitações do trabalho são divididas em delimitações do controle aplicado e condições exploradas e delimitações construtivas do AGV projetado para a pesquisa.

Dentre as delimitações do controle, pode-se citar:

- ❑ Os experimentos serão realizados com cargas estáticas deslocadas ou não do centro geométrico do AGV, distribuídas uniformemente ou não na plataforma do AGV.
- ❑ Os experimentos não englobam estudos com cargas fluidas.
- ❑ Os experimentos serão realizados apenas em pisos planos, não avaliando a ação do controlador em pisos inclinados.
- ❑ Os experimentos não serão realizados em diferentes tipos de piso para avaliar esse tipo de variação na ação de controle.
- ❑ O ambiente de ensaio não pretende reproduzir as condições do ambiente de operação fim do AGV.
- ❑ O trabalho não visa avaliar a utilização de outros modelos fuzzy no controlador proposto.
- ❑ Nesse trabalho não será utilizada técnica de aprendizagem de máquina para sintonia do controlador, mesmo tratando-se de uma base de regras extensa.
- ❑ O planejamento do percurso do AGV não faz parte da proposta desse trabalho, ou seja, não será tratado o problema de escolha do percurso entre estações de trabalho.
- ❑ O processo de estacionamento, ou *docking*, do AGV não será contemplado no controle proposto.

Quanto às delimitações construtivas do AGV, tem-se definidas até o momento:

- ❑ Sistema de suspensão por mola dos rodízios do veículo, não há de suspensão ativa.
- ❑ Capacidade de carga reduzida, dado o tamanho do veículo.
- ❑ Número de sensores embarcados reduzidos, devido ao custo e à capacidade de processamento do hardware de controle utilizado.
- ❑ O estágio atual do AGV projetado não contempla sensores de segurança, nem sistemas de intertravamento, por não ser o objetivo da pesquisa nesse momento. Serão tratados em implementações futuras.

1.7 Método de pesquisa e desenvolvimento

Quanto ao método de pesquisa, uma pesquisa pode ser classificada em termos da natureza da pesquisa, forma de abordagem do problema, sob a perspectiva dos objetivos e do ponto de vista dos procedimentos técnicos (WAZLAWICK, 2009; SILVA; MENEZES, 2001). A natureza da pesquisa do presente trabalho é classificada como Pesquisa Aplicada, pois tem o objetivo de gerar conhecimento para aplicações práticas e propor soluções para problemas específicos (SILVA; MENEZES, 2001), no caso, para sistemas de controle de posição de AGVs.

Do ponto de vista da abordagem do problema, o trabalho tem uma abordagem Quantitativa, considerando que dados observados podem ser quantificados. O uso do termo abordagem se justifica pois a abordagem quantitativa representa um conjunto de processos sequenciais e comprobatórios (SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2013), dentre eles a formulação do problema, a revisão da literatura, definição da hipótese, coleta de dados, análise sistemática dos dados e a interpretação dos dados conforme a hipótese inicial e o embasamento teórico. O presente texto apresenta os três primeiros itens e a proposta para coleta dos dados.

Do ponto de vista dos objetivos da pesquisa, o presente trabalho tem características Exploratórias e Explicativas em momentos diferentes da pesquisa. No período inicial, caracterizou-se por uma pesquisa exploratória, em que a hipótese ou objetivo ainda não era totalmente definido. Por isso, foram propostas revisões sistemáticas da literatura para o entendimento da área de aplicação e soluções apresentadas (SILVA; MENEZES, 2001). Após a definição da hipótese e dos objetivos do trabalho, a pesquisa se tornou explicativa, pois visa identificar os fatores que influenciam a exatidão e/ou precisão do sistema de controle de posição de AGVs por meio de investigação experimental.

Por fim e como consequência do viés explicativo da pesquisa, os procedimentos técnicos adotados para coleta dos dados e investigação dos fatores são classificados como Pesquisa Experimental (SILVA; MENEZES, 2001). Dessa forma, por meio de quasi-experimentos, pois nem todas as influências podem ser controladas, diferentes condições do AGV serão ensaiadas a fim de se interpretar e explicar seu funcionamento e comparar os resultados com a hipótese inicial (WAZLAWICK, 2009).

O desenvolvimento desse trabalho teve início na investigação da literatura com uma investigação focada no domínio de problema de que trata o trabalho. Para isso foram propostas duas revisões sistemáticas com enfoques diferentes. (REIS; MORANDIN JUNIOR, 2021) investigam o uso de sensores e técnicas de sensoriamento no problema do controle de posição do AGV e (REIS; COUTO; MORANDIN JUNIOR, 2022a) investigam as técnicas de controle aplicadas.

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é um método formal e científico para reconhecer, avaliar e interpretar os estudos primários disponíveis sobre um tópico de interesse (KITCHENHAM, 2004). Em oposição à revisão narrativa ou *ad hoc*, RSLs tem um tó-

pico de pesquisa restrito e um protocolo de pesquisa rigoroso, de forma que a pesquisa possa ser auditada, seus resultados possam ser reproduzidos e, após um período, possa ser atualizada. O protocolo das RSLs realizadas são apresentados em Reis e Morandin Junior (2021) e Reis, Couto e Morandin Junior (2022a).

Os resultados obtidos das RSLs orientaram as definições da hipótese desse trabalho e de projeto do sistema para testar a hipótese. As revisões mostram um crescente uso dos sensores embarcados no AGV e apontam para a relevância da aplicação de técnicas de Controle Inteligente no domínio do problema. Além disso, a análise dos resultados das RSLs permitiram a proposição de uma agenda de pesquisa para o domínio de problema.

Dentre os pontos propostos em Reis e Morandin Junior (2021) estão diretamente ligados à esse trabalho:

- *Incluir experimentos considerando toda capacidade de carga do veículo.* A condição de carga impacta na dinâmica do AGV e da perspectiva do controlador, a variação dinâmica degrada o desempenho pois os ajustes dos parâmetros podem não atender à nova condição. Como a operação regular de um AGV envolve o transporte e, conseqüentemente, a variação da carga, um sistema de controle de posição proposto para o veículo deve considerar o intervalo de operação do sistema.
- *Pesquisa em sensores de visão de máquina focada na padronização de soluções.* Como identificado por Ullrich (2015), o uso de sensores de visão de máquina ainda está em desenvolvimento. A pesquisa nesse sentido é indispensável para a criação de soluções que possam atingir padrões definidos por normas internacionais e que sejam aceitas no mercado.

O projeto e sintonia do controlador se dará pelo conhecimento de especialistas, análise dos dados dos experimentos e observação empírica no sentido de ser “guiado pela evidência obtida em pesquisa científica sistemática e controlada” (WAZLAWICK, 2009), ou seja, através da análise crítica dos experimentos realizados em ambiente controlado e previamente projetados de forma sistemática.

Para a validação da proposta será construído um controlador PID para a comparação entre o desempenho de um controlador da teoria clássica com o controlador fuzzy-adaptativo em cascata proposto. Os experimentos planejados serão realizados com ambos os controladores.

1.8 Organização do trabalho

O primeiro capítulo apresenta uma contextualização do domínio do problema, discutindo a motivação e a justificativa que norteiam essa pesquisa. Além disso, apresenta a hipótese do trabalho, seus objetivos, delimitações e métodos de pesquisa utilizados para atingir os objetivos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura para de forma a

embasar a pesquisa com os conceitos necessários e examinar como o problema tem sido tratado por outros pesquisadores. Para que o Capítulo 2 não fique muito extenso, a discussão de conceitos teóricos de sistemas de controle envolvidos na proposta do trabalho está disponível no Apêndice A. A proposta do trabalho é apresentada e detalhada no Capítulo 3, relacionando a proposta com os objetivos específicos do trabalho. O desenvolvimento da plataforma de testes e dos sistemas de controle implementados para o teste da hipótese da Tese é apresentado no Capítulo 4. No Capítulo 5 são apresentados os métodos experimentais utilizados, a descrição dos experimentos e seus resultados, seguindo de uma discussão e a análise dos resultados obtidos de acordo com os objetivos anteriormente definidos. Por fim, o Capítulo Conclusões apresenta uma síntese do trabalho, seguida das conclusões e as contribuições da pesquisa e uma discussão sobre os trabalhos futuros. Além disso, nos Apêndices são detalhadas implementações necessárias para a realização da pesquisa.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações Iniciais

Esse capítulo trata da revisão da literatura acerca do tema tratado. Primeiramente, a Seção 2.2 conceitos preliminares e essenciais para descrição do problema são discutidos e definidos, seguindo para a definição problema do qual trata este trabalho. A Seção 2.3 apresenta uma revisão dos sensores empregados no domínio do problema baseando-se, principalmente, nos resultados de duas revisões sistemáticas relacionadas à tese. Por fim, a Seção 2.4 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os temas tratados nesse trabalho focando em trabalhos no mesmo domínio de problema de controle de posição de AGVs e trabalhos que utilizam as mesmas técnicas propostas, mas de outros domínios do problema. Essa seção apresenta, ainda, uma revisão sobre os indicadores de desempenho utilizados na literatura para validar e apresentar os resultados dos controladores propostos.

2.2 Definição do Problema

Esta seção apresenta o problema tratado partindo da definição de termos importantes usados na descrição e definição do mesmo e localizando o domínio de problema na literatura, distinguindo-o bem de problemas similares mas com soluções diversas. O principal objetivo, nesse caso, é distinguir o conceito de navegação, muito utilizado em pesquisas em robôs móveis autônomos, do controle de posição de um AGV seguidor de linha. A partir das definições preliminares, o problema é descrito, ilustrado e restringido à proposta da tese.

2.2.1 Definições Preliminares

2.2.1.1 Percurso e Trajetória

Os termos comumente sinônimos carregam informações diferentes considerando o domínio de problema. O termo percurso, traduzido do Inglês *path*, define o caminho que o AGV deve seguir (SIEGWART; NOURBAKHSH; SCARAMUZZA, 2011; TZAFESTAS, 2013), e no caso específico desse trabalho é a faixa guia, ou seja, a faixa de cor contrastante colada no chão. Siegart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011) apontam que a principal diferença entre percurso e trajetória é que trajetória carrega mais uma dimensão, que é o tempo. Assim, para o domínio de problema do controle de posição do AGV, a trajetória é o resultado da locomoção do veículo ao seguir a guia.

Tzafestas (2013) diferencia, ainda, o rastreamento de percurso, do Inglês *path tracking*, do rastreamento de trajetória, do Inglês *trajectory tracking*. Dado um percurso plano, o rastreamento de percurso considera que o veículo deve segui-lo com uma velocidade longitudinal pré-estabelecida. Já no rastreamento de trajetória, o veículo, além de seguir o percursos, tem o objetivo de controlar a distância do veículo em relação à referência ao longo do percurso, ou seja, deve minimizar esse desvio.

2.2.1.2 Exatidão e Precisão

Os termos serão a seguir definidos de acordo com o VIM 2012 (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012) e contextualizados para o domínio de problema.

Exatidão de medição é definida como o “grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro” (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012) da grandeza que está sendo medida. Também pode ser entendida como o grau de concordância entre o valor medido e valores que são atribuídos à grandeza que se está medindo, na falta de uma medição “verdadeira”. Assim, uma medição mais exata é aquela que fornece um erro de medição menor. Anteriormente, o termo exatidão era traduzido do Inglês *accuracy* como acurácia, que agora está em desuso.

Precisão de medição é definida como “o grau de concordância entre valores medidos obtidos por medições repetidas no mesmo objeto” (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012). É comumente expressa numericamente por características como o desvio-padrão e a variância, ao contrário da exatidão, que não é uma grandeza e não é expressa por um valor numérico.

Com isso, o sistema de controle de posição do AGV é considerado mais exato do que outro controle com a diminuição do erro de medição da posição em relação à referência, ou seja, à guia. Da mesma forma, o sistema de controle é considerada mais preciso do que outro quando o valor de desvio-padrão ou variância do erro de posição em relação à um percurso fechado ou à trechos da percurso é o mais baixo.

2.2.1.3 Níveis de Controle, Navegação e Controle de Posição em AGVs

O controle de um AGV envolve diversas ações e decisões de acordo com a interação com o meio. Entre essas ações estão sua locomoção pela guia, intertravamento e rotinas de segurança, comunicação em rede e o planejamento de percurso, por exemplo. Dentre essas ações, nem todas precisam necessariamente ser realizadas pelo AGV, ou seja, seu processamento não precisa ser embarcado. Além disso, as ações podem ser executadas em diferentes escalas de tempo. O desvio de obstáculo ou a frenagem do veículo por segurança necessitam de um tempo de resposta muito menor do que um replanejamento de percurso.

Segundo Matarić (2014), as arquiteturas de controle apresentam diferentes maneiras de tratar três aspectos: tempo, modularidade e representação. O tempo, ou escala de tempo, refere-se à velocidade da resposta do robô dado um estímulo do ambiente. A modularidade trata de como a arquitetura é dividida em módulos, componentes de software do controle do robô, como eles se comunicam entre si e como se dá sua execução. E a representação é a forma com que a informação é armazenada no robô. Porém, Matarić (2014) afirma que essa representação é muito mais do que uma memória, mas sim dados que modelam o mundo ao redor do robô, seus estados internos, ações passadas, etc.

Assim, por arquitetura de controle entende-se os sistemas e outros componentes de software necessários ao controle do AGV e a comunicação entre estes sistemas (KORTENKAMP; SIMMONS; BRUGALI, 2016). As definições a seguir partirão dos mesmos princípios usados para robôs móveis, adequando para o domínio de problema de veículos autoguiados de aplicação industrial. As arquiteturas de controle de robôs móveis pode ser classificada em 4 tipos, segundo Matarić (2014): controle deliberativo, controle reativo, controle baseado em comportamentos e controle híbrido.

A principal característica do controle deliberativo é o planejamento. Essa abordagem também é chamada de *Sense-Plan-Act* (SPA), Sentir-Planejar-Agir, em tradução literal do Inglês (MATARIĆ, 2014). As ações de sentir o ambiente por meio dos sensores, planejar e agir são processadas e executadas nessa ordem. O planejamento é o processo de antecipar possíveis resultados de ações e decidir a próxima sequência de ações para atingir um objetivo. Segundo Arkin (1998), essa arquitetura requer do robô um modelo relativamente completo do ambiente para que o planejamento seja consistente e confiável. Ainda, o autor afirma que, para ambientes dinâmicos, a modelagem deve contemplar conhecimento prévio sobre o ambiente e também as medições instantâneas dos sensores para auxiliar a tomada de decisão.

De forma oposta, o controle reativo, como o próprio nome indica, reage ao estado atual dos sensores e atua no sistema sem usar representações do ambiente ou a antecipação de estados futuros (MATARIĆ, 2014). Se o controle deliberativo é marcado pelo planejamento, o controle reativo é marcado pela ação. Essa arquitetura de controle é composta por regras de reação. A partir da medida dos sensores, as regras são ativadas ou não,

e enviam seus respectivos sinais de comando aos atuadores. Apesar de nenhum modelo completo do ambiente ser necessário, o controle reativo depende de uma especificação prévia das regras de reação de acordo com o número de estados possíveis dos sensores e com os requisitos de desempenho do robô.

Comparativamente, em relação à escala tempo, enquanto o controle reativo responde “instantaneamente” ao estímulo, o controle deliberativo analisa os estados futuros e leva o tempo de processamento necessário para isso. Os módulos ou componentes de um controle reativo funcionam de forma paralela, recebendo os estímulos dos sensores e ativando as regras de reação pertinentes. Já no controle deliberativo, os módulos são executados sequencialmente, sendo a saída de um a entrada do próximo e a resposta de comando depende do processamento de toda a cadeia. Finalmente, do ponto de vista de representação, o controle reativo não necessita de grande variedade de representação de dados, dependendo, basicamente, dos sinais dos sensores. Por outro lado, a representação em controles deliberativos pode ser tão complexa quanto se queira, dado que é possível representar modelos do ambiente (mapas, grafos, etc), planos, eventos, tarefas, entre outros dados relacionados à finalidade do robô.

O controle baseado em comportamentos, do Inglês *behavior-based*, é um tipo de controle reativo. Apesar de ter diferentes possibilidades estruturas (MATARIĆ, 2014; NOVARES; MOURIOUX; POISSON, 2006; ARKIN, 1998), a arquitetura de subsunção é a arquitetura característica desse grupo. Proposta por Brooks (1986), essa arquitetura tem uma característica de desenvolvimento *bottom-up*, onde comportamento mais simples são integrados por comportamentos mais complexos, divididos em camadas. As camadas superiores podem inibir ou suprimir comportamentos inferiores de acordo com seu funcionamento. Quando um comportamento é inibido, apesar de receber o estímulo dos sensores e calcular sua atuação, esse sinal é inibido e não surte efeito no sistema. A supressão de um comportamento ocorre quando sua entrada de sensores é interrompida por uma camada superior. Assim, o comportamento suprimido não é capaz de calcular sua reação, pois não há sinais de entrada, e um sinal de supressão definido é projetado pela camada superior na saída. Alguns dos princípios dessa arquitetura são: comportamentos complexos não necessitam emergir de um sistema de controle complexo; o sistema deve ser construído de forma incremental, os robôs devem ser baratos e toda a computação ser embarcada (ARKIN, 1998).

Por fim, o controle híbrido congrega, ou busca congrega, as vantagens de arquiteturas deliberativas e reativas: o planejamento do controle deliberativo e a agilidade na resposta ao estímulo do controle reativo. Uma arquitetura híbrida é composta, usualmente, por três camadas (MATARIĆ, 2014): uma camada reativa, uma camada deliberativa ou de planejamento, e uma camada intermediária.

Para essa arquitetura de controle, a cama intermediária é primordial, embora exista aplicações em que apenas as camadas reativa e deliberativa sejam usadas, como em Ve-

logic, Lacevic e Perunicic (2006). Ela é responsável por integrar as decisões das outras camadas, que tem comportamentos e características distintos e, sob alguns aspectos, opostos. Como mostrado por Arkin (1998) e Matarić (2014), não há uma forma única de representar, definir as ações dessa camada intermediária e como ela se comunica com as camadas deliberativa e reativa. Exemplos de aplicação de controle híbrido em diferentes aplicações de robótica autônoma são Tramonte *et al.* (2019), Bascetta *et al.* (2009), Goldberg (2011), e Liendro e Zudaire (2020).

É possível representar e resolver um problema usando qualquer arquitetura de controle. Além de não haver uma arquitetura mais indicada para cada problema, não há uma arquitetura que resolva todos os problemas ou não tenha nenhuma desvantagem. A partir de agora vamos considerar os conceitos desenvolvidos acima para uma área mais genérica de robô móvel em um domínio de problema mais restrito, dos AGVs.

A partir dos conceitos apresentados, a seguir serão definidos e diferenciados os conceitos de navegação autônoma, localização e controles de posição ou posicionamento de AGVs.

O termo navegação aplica-se ao problema de transportar a estrutura do robô de forma ordenada para destinos diferentes (MATARIĆ, 2014). Para seu sucesso são necessários quadro módulos: percepção (sensoriamento), localização, cognição e controle de movimento (SIEGWART; NOURBAKSH; SCARAMUZZA, 2011). Por meio dos sensores, o AGV percebe o ambiente e se localiza, estimando sua posição atual. A etapa de cognição se refere ao planejamento, quais as ações serão executadas para atingir o objetivo. Por fim, com o plano elaborado, o controle de movimento traduz as ações de controle em movimentação do veículo. Fazendo um paralelo com as arquiteturas discutidas anteriormente, a navegação se enquadra como um controle deliberativo, pois as etapas dependem de uma execução sequencial. O movimento do AGV causa uma mudança no ambiente, novos valores são medidos e, assim, a localização é atualizada. Com isso, um novo planejamento de percurso pode ser realizado, para corrigir um erro, por exemplo, e novos comandos serão enviados para o controle de movimento. Assim, de modo genérico, técnicas de navegação dependem desse ciclo sentir-planejar-agir. Outra característica de um sistema de navegação é que o objetivo é de alto-nível. Uma localização específica, ou um conjunto de pontos intermediários, é informado ao AGV e com seu conhecimento do ambiente e as informações sensoriais, o trajeto é planejado. Portanto, a navegação envolve mais do que o controle de movimentação ou locomoção do AGV e, por isso, é um controle de alto-nível.

Um controle de movimentação ou locomoção de um AGV puramente reativo é um controle de baixo-nível. Aqui, engloba-se o controle de velocidade do veículo, controle de posição e controle de torque dos motores, por exemplo. Em oposição à técnica de navegação, o controle de baixo-nível tem uma resposta ao estímulo muito mais rápida, ocupando-se de manter o sistema com o menor erro possível dado o valor de referência. Entretanto, o conhecimento do ambiente disponível à esse tipo de controle vem apenas das

medidas atuais dos sensores. Um controle baixo-nível de posição de AGV, especificamente, tem como referência uma guia bem definida, como uma faixa guia colorida ou um fita magnética fixadas no chão, por exemplo, e seu objetivo é manter o veículo no traçado, atendendo à requisitos da teoria de controle, como erro em regime, máximo sobressinal e tempo de acomodação, por exemplo.

Porém, um dos módulos da navegação é o controle de movimentação do veículo e, como mostrado na seção anterior, arquiteturas híbridas reúnem controles de alto- e baixo-nível atuando em diferentes escalas de tempo e com diferentes objetivos. Assim, técnicas de navegação e de controle baixo-nível não são mutualmente exclusivas. A partir daqui, técnicas de navegação serão consideradas como controle de alto-nível e controle deliberativo. Já técnicas de controle provenientes da Teoria de Controle, controle em malha fechada, serão considerados controle de baixo-nível e controle reativo.

2.2.2 O Problema de Controle de Posição de AGVs Seguidores de Linha

O problema de controle de posição ou posicionamento de AGVs, também conhecido na literatura como o problema acompanhamento do percurso (em tradução livre do Inglês *path-following problem*) (KIM; KIM, 2020; SUN; LIANG, 2020; SEN *et al.*, 2019), rastreamento de trajetória (QI; WU, 2020; SEPTYAN; AGUSTINAH, 2019; JACOBS *et al.*, 2019) ou mesmo rastreamento de percurso (AMMAR; AZAR, 2019; YAN *et al.*, 2019; KAR *et al.*, 2019), pode ser dividido em quatro aspectos principais: o percurso de referência, as grandezas medidas, a atuação no sistema e as limitações do mesmo.

De maneira mais ampla, o percurso de referência pode ser dividido em referências físicas e virtuais. Referências físicas são aquelas guias que definem claramente o percurso do AGV no chão de fábrica, como faixas guia (WANG *et al.*, 2020b; KIM; KIM, 2020; KAR *et al.*, 2019) ou fitas magnéticas (LI *et al.*, 2020; CHEN; HAO; FEI, 2019; CHO *et al.*, 2017). Já referências virtuais não são facilmente identificáveis, a não ser pelo próprio AGV. No caso dessas referências, uma camada superior de controle define o percurso que deve ser seguido. Essas referências são baseadas em mapeamento do ambiente ou em referências discretas, como o uso de etiquetas (do Inglês *tags*) no chão, como *Quick Response Code* (QR Code) (LI *et al.*, 2019; ZHANG; HUO, 2017; PAZDERSKI; KOZŁOWSKI; GAWRON, 2015), totens refletores para laser (CHEN *et al.*, 2019; PRATAMA *et al.*, 2016) ou pinos magnéticos (YAN *et al.*, 2019; YIN; LI; DUAN, 2018). Para cada caso, os sensores específicos são empregados para a leitura das grandezas que definem o percurso. Por exemplo, no caso de fitas magnéticas, o sensor principal será um sensor magnético e no caso de sistemas baseados em mapeamento, rastreador laser ou *Light Detection And Ranging* (LiDAR).

Este trabalho tem o foco em sistemas de referência física usando como guia uma faixa colorida no chão. Além disso, a faixa guia se localiza sempre abaixo do veículo, sob seu centro geométrico. As grandezas medidas nesse caso são relativas à guia, sendo medidos a

distância do veículo em relação ao centro guia e o ângulo de desvio do veículo em relação ao ângulo do trecho de guia.

A atuação do sistema depende da configuração mecânica do veículo. A partir do erro medido, o controlador pode atuar na velocidade angular do motor ou no ângulo de esterçamento das rodas, ativas ou não, por exemplo. No caso desse trabalho, o AGV tem tração diferencial e a correção da posição é baseada na diferença de velocidade angular em cada motor, corrigindo a orientação do veículo.

Por fim, as limitações do sistema envolvem restrições cinemáticas e dinâmicas, restrições de desempenho e limitações do ambiente de trabalho do AGV. As restrições cinemáticas são caracterizadas por limitações de movimento do AGV devido à sua configuração, por exemplo holonômica e não-holonômica (ANDREEV; PEREGUDOVA, 2020; ROY *et al.*, 2017; DAS; KASEMSINSUP; WEILAND, 2017; SETIAWAN *et al.*, 2016). Já as restrições dinâmicas incluem limitações de carga máxima a ser transportada, torque de atuação (YU *et al.*, 2016; FATEH; ARAB, 2015) e interação das forças nas rodas do veículo (LIAO; CHEN; YAO, 2018; DAS; KASEMSINSUP; WEILAND, 2017) e avaliação da estabilidade do veículo dado certas condições de trabalho (WANG *et al.*, 2020b; ZHANG *et al.*, 2019).

As restrições de desempenho incluem os indicadores de desempenho do sistema (WU; YANG, 2020; LIN; YONGSHENG; JUN, 2018; YU *et al.*, 2016), limitações dos sensores, como o tamanho do campo de visão da câmera utilizada (BAI *et al.*, 2019b) ou o intervalo de amostragem (KAR *et al.*, 2019), e restrições de estados e das funções objetivo de problemas de otimização do sistema (QI; WU, 2020; BAI *et al.*, 2019b; KANJANAWANISHKUL; PHOOHUENGKAE0; KUMSON, 2015). Finalmente, as limitações do ambiente de trabalho do AGV envolvem limitação de velocidade (CHEN *et al.*, 2020; BAI *et al.*, 2019b; CHEN; HAO; FEI, 2019; LIN; YONGSHENG; JUN, 2018) tanto por desempenho quanto por segurança, por exemplo.

Considerando os aspectos citados, as Figuras 1 e 2 ilustram o problema considerando a exatidão e a precisão da trajetória de um sistema de controle de posição baseado em uma guia física fixa e passiva e um AGV diferencial. As demais restrições serão discutidas ao longo do texto. Além disso, este trabalho trata do controle de posição do AGV, como definido anteriormente, um controle baixo nível. Assim, uma camada de planejamento de percurso superior define quais curvas o AGV deve seguir para chegar ao ponto B partindo do ponto A.

A Figura 1 mostra um ambiente com a guia representada pelo percurso em preto e a faixa de tolerância ao erro de posição do AGV destacada em amarelo. Considerando o ponto A como o ponto de partida do AGV em direção ao ponto B de destino, o controle de posição deve garantir ao longo de todo o percurso que o erro de posição seja minimizado. Assim, não é apenas importante chegar ao ponto B com o mínimo erro de posição, independente da trajetória anterior.

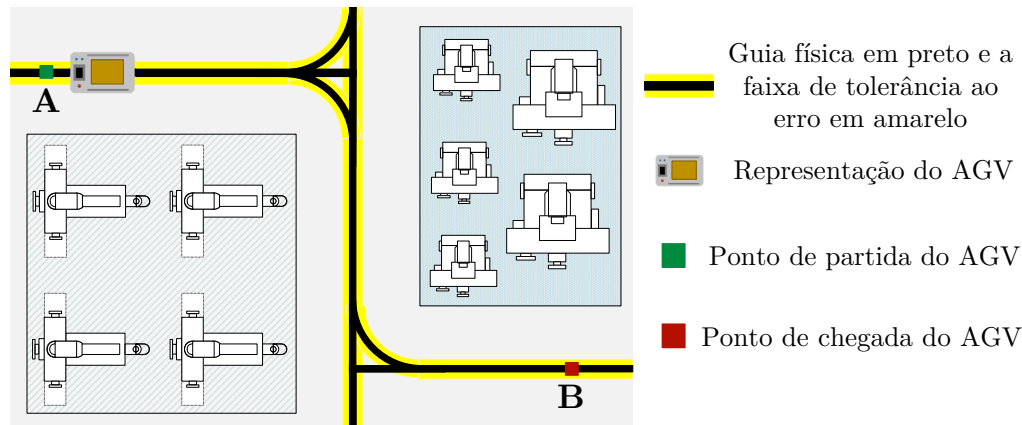


Figura 1 – Ilustração do problema de controle de posição de um AGV seguidor de linha. Em sua operação um AGV deve partir de um ponto A e seguir um percurso até o ponto B. Essa trajetória deve respeitar a faixa de tolerância ao erro ao longo de todo o percurso e não apenas corrigir o posicionamento do AGV no ponto de chegada.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 2 exemplifica quatro trajetórias de um AGV considerando os eixos precisão e exatidão. Uma trajetória não exata e não precisa apresenta valores de erro altos, ou seja, fora da faixa de tolerância, e medidas de posição com grande variabilidade. Já uma trajetória não exata e precisa tem valores de posição com baixa variabilidade e apresentam repetibilidade, entretanto, com alto valor de erro em relação à guia. De forma contrária, uma trajetória exata e não precisa apresenta valores de erro baixos, dentro da região de tolerância, porém, tem uma alta variabilidade nas medições de posição. Por fim, um controle de posição exato e preciso possui valores de erro baixos e baixa variabilidade nas medições de posição.

As variáveis principais do problema são mostradas na Figura 3. O sistema de controle é representado pela base do AGV diferencial cujos eixos dos motores estão alinhados ao eixo de simetria transversal e a câmera encontra-se no centro geométrico do veículo.

No detalhe da Figura 3 é mostrado o campo de visão da câmera, estando a guia em destaque para facilitar a visualização. A distância δ é medida a partir do centro geométrico até o centro da guia no ponto C perpendicular ao eixo transversal do AGV. Para medição do ângulo do veículo em relação à guia, dois pontos c_1 e c_2 são tomados e o ângulo θ é definido em relação ao eixo longitudinal do AGV. Na figura, uma reta paralela à reta que cruza os pontos c_1 e c_2 é traçada para facilitar a visualização do ângulo θ .

Também são mostrados na figura os vetores de velocidade das rodas direita e esquerda, respectivamente, v_d e v_e , e as velocidades linear v e angular ω resultantes. Os valores de referência, ou valores desejados, são $\delta_d = 0 \text{ mm}$ e $\theta_d = 0^\circ$. Assim, o problema consiste em manipular as velocidades de cada motor a fim de manipular as velocidades v e ω para que os valores de δ e θ tendam a zero, caracterizando-o como um problema de rastreamento de trajetória.

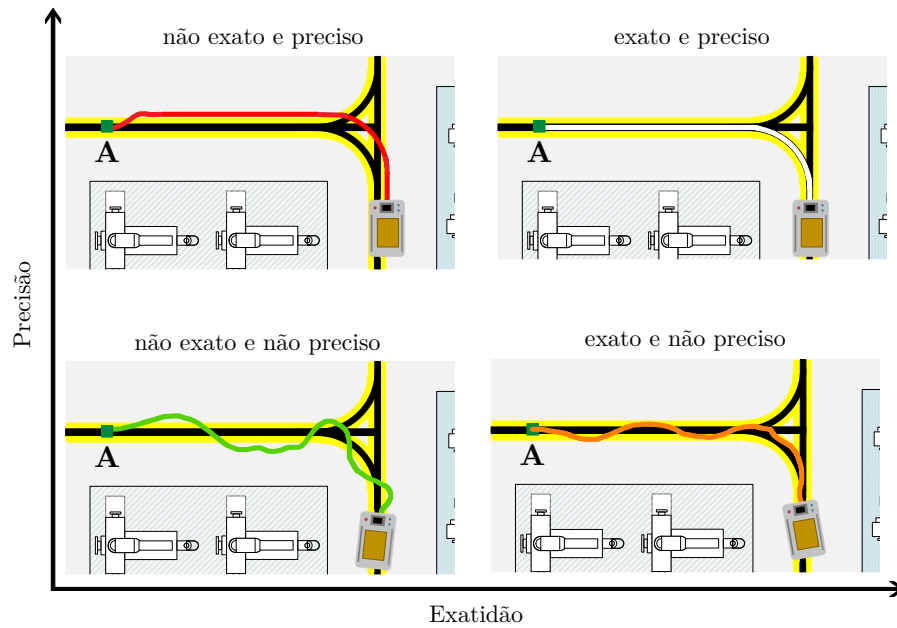


Figura 2 – Exemplos de trajetórias considerando a exatidão versus a precisão. O eixo horizontal indica um aumento na exatidão e o eixo vertical um aumento de precisão. As quatro condições da figura exemplificam o comportamento da trajetória para diferentes níveis de exatidão e precisão.

Fonte: Próprio autor.

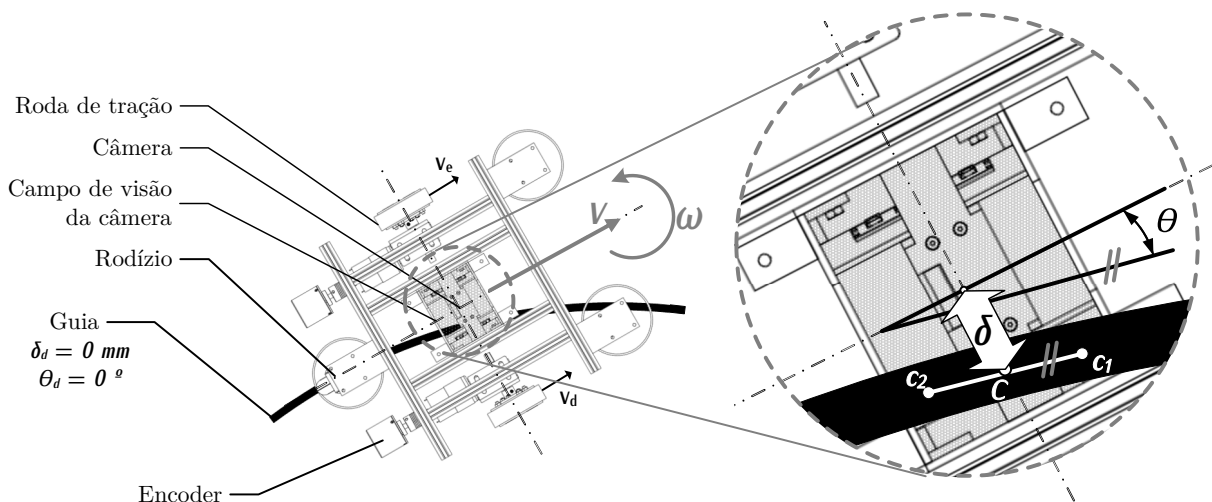


Figura 3 – Formulação do problema para o uso da câmera como sensor principal para medição de erro de distância e de ângulo de orientação do AGV em relação à guia. A figura mostra a base do AGV diferencial que será usado no trabalho.

Fonte: Próprio autor.

2.3 Sensores

Ullrich (2015) divide a história dos sistemas de AGV em quatro eras. Essa divisão é marcada pelo desenvolvimento tecnológico e apresenta uma divisão clara dos sensores usados nos veículos. Na primeira era, entre os anos 1950 e 1970, os AGVs baseavam-se em sistemas de guia por indução, com cabos alimentados instalados sob o piso e sensores de indução. Para segurança e proteção eram usados sinalização no piso, barras de proteção e sensores de pressão e táteis, como os bigodes de um gato, para evitar colisões. O controle de posição era realizado por circuitos de válvulas à vácuo, depois substituídas por circuitos a relés.

A segunda era tem lugar entre a década de 1970 e o início da década de 1990. Apesar da maioria dos sistemas de AGV continuar usando guias indutivas, a tecnologia já permitia a comunicação com os AGV através da indução. Além disso, também eram usadas transferências de dados por infravermelho e via sinais de rádio. Para o controle do AGV, circuitos eletrônicos e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) começam a ser usados. Assim, o AGV foi inserido no sistema de manufatura não apenas para transporte logístico, mas fazendo parte da linha de produção.

Durante a terceira era, de meados da década de 1990 até por volta de 2010, os padrões tecnológicos foram estabelecidos. Os sensores dessa época são eletrônicos e sem contato e o controle é executado por computadores de processo. As tecnologias do sistema de guia dominantes são a fita magnética e a navegação por laser e os veículos se conectam à rede sem fio para comunicação com a fábrica.

Os avanços no sensoriamento e na capacidade de processamento do controle possibilitaram AGVs operando em velocidades mais altas, formas alternativas de alimentação dos veículos, por exemplo, usando indução para transmissão de energia, e AGVs mais baratos e mais eficientes (ULLRICH, 2015). O autor classifica essas, entre outras, tecnologias usadas no período como o padrão para sistemas de AGVs. Desse ponto de vista, são tecnologias padronizadas pelo mercado e por normas internacionais.

Assim, a quarta era, de 2010 até os dias de hoje, é entendida por Ullrich (2015) como uma era de inovação, quando novas soluções estão sendo propostas para o problema, ainda que as soluções padrões ainda sejam largamente usadas. “As bases tecnológicas para as mudanças são novos sistemas sensoriais de baixo-custo e inteligentes, assim como desenvolvimentos de softwares que funcionam através da internet e analisam esses sistemas” (ULLRICH, 2015). Dentre os sensores que marcam a quarta era estão as câmeras, LiDARs, scanners laser, infravermelho e combinações dos mesmos. Entretanto, Ullrich (2015) destaca que, até a publicação, não é possível afirmar qual tecnologia irá prevalecer. Além disso, a aplicação de AGVs tem se expandido para outras áreas como a hospitalar e de serviços, como hotéis.

A fim de investigar o uso de sensores e técnicas de sensoriamento usadas para o controle de posição de AGVs e robôs móveis similares entre 2016 e 2020, Reis e Morandin Junior

(2021) propuseram uma revisão sistemática da literatura. Foram selecionados 31 estudos primários de um universo de 397 estudos identificados. Os resultados corroboram o perfil da quarta era traçado por Ullrich (2015).

Do ponto de vista da tecnologia do sensor principal empregado para o controle de posição, 15 trabalhos usam uma câmera, um usa um receptor de sinal *bluetooth*, um usa um sistema de medição óptica externa ao AGV, um usa sensor óptico baseado na reflexão da luz, sete utilizam sensores magnéticos e seis usam scanners laser, incluindo LiDAR. Outros sensores usados incluem encoders, giroscópio e centrais inerciais, bússola eletrônica e leitores de tags *Radio Frequency Identification* (RFID). Ou seja, mais de 50% dos trabalhos selecionados usam soluções da quarta era, os 17 primeiros trabalhos citados. Dentre os demais, apesar de usar sensores consagrados como sensor principal, alguns ainda utilizam a informação de outros sensores que se encaixam na classificação da quarta era. Dentre os estudos baseados em scanner laser, um usa uma bússola e outro o giroscópio para melhorar o posicionamento do AGV. E para os que usam sensores magnéticos, um usa informações o giroscópio, outro de uma IMU e um terceiro utiliza um leitor de tags RFID.

A revisão sistemática proposta em Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) também identifica os sensores utilizados nos estudos. Dentre os trabalhos experimentais, que são 43 de 92 trabalhos selecionados, 18 usam câmera como sensor, sendo que dois desses trabalhos utilizam câmeras externas ao veículo para medição da posição global e outros dois empregam câmeras com medição de profundidade (Microsoft Kinect), nove utilizam scanners laser, quatro empregam sensores magnéticos e os demais se dividem no uso de sensores ópticos, infravermelho, IMUs e giroscópios. O que mostra a relevância atual do uso de câmeras no problema de controle de posição de AGVs.

2.4 Trabalhos Correlatos

A revisão sistemática em Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) investiga, dentre as perguntas de pesquisa, a relação entre o sistema de controle proposto nos estudos e quatro aspectos específicos: a área de aplicação do AGV, por conta da influência do ambiente de operação na resposta e desempenho do controlador, o modelo matemático considerado no projeto do controlador, o sistema de sensores empregado e, por fim, as especificações de carga máxima do veículo e os experimentos realizados variando-se a carga.

Sobre os aspectos citados, os resultados mostram que o projeto do controlador, em geral:

- ainda é proposto independentemente do ambiente de aplicação do AGV: Ambientes fabris diferentes apresentam diferentes condições de operação para o AGV. Assim, determinada estratégia de controle pode ser mais adequada que outra, por exemplo,

considerando o nível de ruído, o desgaste do sistema físico do AGV e o erro de tolerância em corredores mais estreitos.

- ❑ muitas aplicações ainda consideram apenas o modelo cinemático do problema sem discutir as condições sob as quais o modelo dinâmico foi desconsiderado. Cada modelo precisa ser conhecido e examinado de acordo com suas características e limitações.
- ❑ apesar das influências que o ambiente de operação oferecem ao sistema de sensoriamento, muitos trabalhos ainda não as consideram no projeto do controlador. A partir dos trabalhos selecionados não é possível estabelecer uma relação entre os sensores utilizados e o ambiente de aplicação do veículo.
- ❑ não consideram a variação de carga durante a operação normal do AGV. Esse item tem uma relação estreita com os dois primeiros. A capacidade de carga e a variação da carga durante a operação tem relação direta com a área de aplicação do AGV e essa variação causa variação na dinâmica do sistema. Como o objetivo de um AGV em uma planta industrial é o transporte de carga, a revisão sistemática identificou que experimentos que consideram a variação de carga na validação do controlador proposto são a exceção dentre os estudos selecionados.

Além disso, examina quais são as tendências tecnológicas no domínio do problema sob o aspecto da consideração do sistema de controle como um sistema multivariável e do uso de técnicas de controle inteligente.

Em relação ao tipo de sistema de controle, mono ou multivariável, 70 entre 92 trabalhos empregam estratégias multivariável. A posição e o ângulo de orientação do AGV são as variáveis mais utilizadas nas propostas. Outras variáveis consideradas são as velocidades linear e angular do AGV, o ângulo de esterçamento da roda de tração, quando o sistema apresenta tal característica, e velocidade do esterçamento, aceleração, torque dos motores e corrente dos motores.

Dentre os 22 trabalhos que não utilizam um sistema de controle MIMO, metade emprega estratégias clássicas de controle, como o PID, e a outra metade se divide em técnicas de Controle Robusto (cinco Controles por Modos Deslizantes), Controle Inteligente (dois Controladores Fuzzy e um Controlador baseado em Redes Neurais Artificiais), Controle Moderno (Controlador baseado na Equação de Udwadia-Kalaba), Controle Adaptativo (Controlador Adaptativo hierárquico de tempo finito) e Controle Preditivo (MPC).

Comparada com as demais seis grandes áreas da Teoria de Controle definidas em Reis, Couto e Morandin Junior (2022a), dos 92 estudos selecionados, 34 aplicam alguma técnica de Controle Inteligente, mesmo que em conjunto com outra técnica de outra área. Além disso, o estudo aponta um aumento sustentado da aplicação nos últimos três anos do período estudado, período de 2018 a 2020. Desses trabalhos, oito empregam apenas técnicas de Controle Inteligente e os demais 26 apresentam alguma técnica inteligente

combinada com técnicas de outras grandes áreas da Teoria de Controle, exceto Controle Ótimo.

Dentre os trabalhos que empregam apenas técnicas de Controle Inteligente para o controle de posição, o controlador Fuzzy é o mais utilizado, sendo usado em sete trabalhos. O trabalho restante apresenta um controlador baseado em redes neurais artificiais.

Kim e Kim (2020) utilizam uma câmera com sensor de posição de um AGV do tipo empilhadeira seguidor de linha na configuração triciclo. O controlador fuzzy é o controlador de posição, tendo como entrada o erro de posição e o erro do ângulo de orientação do veículo e como saída a velocidade angular e o ângulo de esterçamento da roda de tração. Dois controladores PID são utilizados para o controle no nível do atuador para os motores de tração e de esterçamento do veículo. De forma análoga, Ushikoshi *et al.* (2018) propõe um controlador fuzzy com controladores PI no nível dos atuadores. O trabalho avalia o desempenho do controlador em manobras com movimentos em ambos os sentidos de rotação do motor, apresentando resultados simulados.

Yan *et al.* (2019) propõem um controlador fuzzy para um AGV diferencial que tem como guia pinos magnéticos. Os sensores utilizados são o sensor magnético comercial, um arranjo de sensores hall em linha, e um giroscópio para correção da posição entre os pinos magnéticos. As entradas do controlador são o erro de orientação, determinado pelo giroscópio e a distância em relação à linha imaginária entre dois pinos magnéticos, medida pelo sensor magnético. A saída é a velocidade de correção para os motores, positiva para um e negativa para o outro.

Septyan e Agustinah (2019) utiliza um controlador fuzzy baseado no modelo cinemático de um AGV diferencial, controlando a dinâmica do sistema no nível do atuador utilizando controladores PID para o controle de velocidade dos motores. O trabalho é simulado numericamente e não é abordada a aplicação de sensores. Da mesma forma, Feng e Jiao (2017) simula um controlador fuzzy a partir do modelo identificado a partir de dados de entrada e saída de um AGV.

Com resultados experimentais, Sakir *et al.* (2017) apresentam um controlador fuzzy para um AGV diferencial do tipo trator. O sistema usa sensores ópticos simples na parte frontal e traseira do veículo de forma a medir ângulo de orientação e distância da guia passiva. O trabalho apresenta resultados com a variação da carga puxada pelo AGV, porém as variáveis mostradas não permitem o leitor tirar boas conclusões da desempenho.

Bui (2016) desenvolvem controladores fuzzy com comportamento aproximado de controladores PD para o controle independente de três motores de um AGV omnidirecional. Os motores são posicionados de forma radial. A posição do AGV é medida por um scanner laser e não há guia física, mas uma trajetória planejada em uma camada superior do sistema de controle.

Wang *et al.* (2015) utiliza uma câmera para medir a distância e o ângulo de um AGV diferencial em relação à guia, entretanto, a guia se localiza fora da área sob o AGV. Assim

a câmera está localizada na lateral do veículo. O controlador fuzzy proposto tem como entradas os sinais de erro de posição e ângulo de orientação e tem como saída um sinal de correção de velocidade dos motores.

Kar *et al.* (2019) propõe um sistema fuzzy para identificação da posição do AGV a partir da imagem da linha e medição do desvio e um controlador neuro-fuzzy para o controle da posição do veículo. O trabalho ainda investiga o comportamento do sistema propondo um controlador central que comunica com o sistema por uma rede sem fio.

A interação entre as áreas de Controle Inteligente e Clássico podem ser classificadas como o uso de técnicas inteligentes para a sintonia dos parâmetros de controladores clássicos em sua maioria. A combinação das técnicas acrescenta adaptabilidade e não-linearidade aos controladores clássicos. Li *et al.* (2020) propõem um controlador fuzzy-proporcional e utiliza as I e D da forma convencional do controlador PID, sintonizando o ganho K_p a partir da velocidade de referência do veículo e do valor de erro de posição em relação à fita magnética, medido por um sensor magnético comercial.

Wang *et al.* (2020b) avalia a estabilidade de um AGV seguidor de linha tipo empilhadeira controlado por um controlador fuzzy-PID em que o sistema fuzzy sintoniza os ganhos do PID. O estudo examina o efeito do aumento da velocidade e da aceleração no erro da distância do centro do AGV em relação à guia, usando como sensor uma câmera. O erro é usado para atualização dos ganhos do controlador. Zhou, Chen e Zhang (2019) propõem um sistema de controle similar ao do trabalho anterior, aplicado à um AGV diferencial guiado por fita magnética. O erro de distância em relação à fita magnética e o desvio no ângulo de orientação do AGV, medidos por um sensor magnético comercial, são utilizados para ajustar os parâmetros do controlador PID. Ainda considerando controladores PID ajustados por sistemas fuzzy, Li *et al.* (2016) utiliza ainda o Filtro de Kalman para estimar a posição do AGV livre de ruídos usando a medição da velocidade do veículo.

O controlador PID proposto em Zhou, Zhang e Chen (2019) é otimizado usando PSO. O algoritmo considera a entrada de erro do controlador, o sinal de controle calculado e a saída da planta para ajustar os ganhos PID. Como o trabalho usa apenas simulação, o uso de sensores não é discutido.

Diferindo dos trabalhos anteriores, Abdelhakim e Abdelouahab (2019) propõem um controlador neuro-fuzzy PI+D. A proposta combina as ações de controle de um controlador fuzzy PI com uma rede neural dedicada às ações de controle de um controlador fuzzy D com sua rede neural também dedicada. As entradas dos controladores fuzzy são o erro e a taxa de variação do erro. O trabalho apresenta resultados simulados.

Apenas dois trabalhos apresentam a combinação de técnicas inteligentes com métodos adaptativos. Chen *et al.* (2020) apresentam resultados de experimentos e de simulações de um controle adaptativo baseado em redes neurais artificiais. O sistema é composto por um controlador usando redes neurais e um sistema de adaptação de parâmetros também

baseado em redes neurais. O sistema de adaptação é usado para aproximar o comportamento da dinâmica não modelada e garantir que o sistema de controle opere com o mínimo erro em relação ao percurso planejado. Usando um laser scanner como sensor principal, não há guia física para o AGV.

Başçi e Derdiyok (2014) aplicam um sistema fuzzy-adaptativo à um AGV diferencial tendo como mecanismo de adaptação um identificador fuzzy T-S, que visa prever os próximos valores de velocidade e ângulo de orientação do veículo, seguido de um adaptador de parâmetros baseado no método de mínimos quadrados recursivo para otimizar os parâmetros estimados pelo identificador. Os valores preditos são entrada do sistema fuzzy Mamdani de controle e influenciam a determinação da saída de controle. O artigo apresenta resultados experimentais comparando a proposta com um controlador PI e também variando a carga do veículo, com experimentos a vazio e com carga de 30 kg.

O número de trabalhos identificado mostra como a interseção entre Controle Moderno e Inteligente é relevante, tendo as técnicas inteligentes maior destaque quanto à sintonia e otimização de parâmetros (HASAN; ALWAN, 2020; DU; REN, 2020; GOSWAMI; PADHY, 2016) e estimação da dinâmica não modelada da planta usando redes neurais artificiais Zeng *et al.* (2016), Yin, Yang e Xiong (2014).

Rossomando e Soria (2014) combina técnicas de Controle Clássico, Adaptativo, Moderno e Inteligente em um robô móvel de aplicação similar à um AGV. Um controlador cinemático é projetado utilizando a descrição do modelo em equações de estado e o Método Direto de Lyapunov para encontrar a lei de controle. Em série com esse controlador, no ramo direto do sistema de controle por realimentação, é alocado um controlador dinâmico neuro-PID adaptativo. O controlador dinâmico é composto por um modelo neurodinâmico da planta, para estimação de estados, cuja saída é ajustada por uma lei de ajuste de parâmetros, que atualiza os ganhos PID discretizado. Os experimentos são realizados em um robô móvel Pioneer 2DX e os resultados mostram que o sistema proposto tem melhor desempenho do que um sistema de controle com PID clássico.

Três trabalhos combinam controladores preditivos com técnicas inteligentes. Como observado para sistemas de controle modernos, Wang *et al.* (2020a) e Li *et al.* (2015) utilizam redes neurais artificiais para otimizar os parâmetros do controlador preditivo MPC. Em oposição, Wu e Yang (2020) apresenta um sistema de controle chaveado. Quando os desvios de distância e ângulo de orientação passam de certo limiar, um controlador fuzzy assume o controle da planta. Para erros abaixo desse valor determinado, um controlador MPC de múltiplas etapas controla o AGV.

A interação entre Controle Inteligente e Controle Robusto também mostra sua relevância dado a quantidade de estudos selecionados que empregam essas técnicas. Os controladores propostos usam o controle por modos deslizantes combinado com alguma técnica inteligente. Nesse caso, sistemas fuzzy são usados para ajustar a lei de aproximação das superfícies do controlador robusto, sendo usado fuzzy tipo 1 (LIN; YONGSHENG;

JUN, 2018) ou fuzzy tipo 2 (DIAN *et al.*, 2019). De forma similar, Kar *et al.* (2016) utiliza algoritmo genético para otimizar os parâmetros do controlador robusto para melhorar o desempenho do sistema de controle em percursos de formatos diferentes. Hwang, Yang e Hung (2018) propõem um sistema fuzzy hierárquico para lidar com as incertezas do sistema, principalmente variações de carga, e compensar a saída do controlador por modos deslizantes.

Dois trabalhos integram técnicas de Controle Inteligente, Robusto e Moderno. Wu *et al.* (2019) combinam um controlador Backstepping baseado no modelo cinemático do AGV com um controlador por modos deslizantes ajustado por um sistema fuzzy para compensar as variações dinâmicas da planta. Já Boukens, Boukabou e Chadli (2017) utiliza o método H_∞ para projetar um controlador que é ajustado por uma rede neural artificial que é ajustada segundo o Teorema da Estabilidade de Lyapunov.

Zhang *et al.* (2019) propõem um sistema de controle baseado em estratégias clássica, robusta e inteligente que é dividido em dois níveis de controle. No nível superior, um controlador por modos deslizantes controla a posição do AGV tendo, também, como entrada o erro de velocidade do veículo, a partir do valor planejado por um sistema de planejamento de trajetória. A saída desse controlador é o ângulo de esterçamento das rodas. No nível inferior, um controlado PID otimizado utilizando o algoritmo da colônia artificial de abelhas controla o torque nos motores. Finalmente, Peng e Shi (2018) combina Controle Robusto com Controle Inteligente e Adaptativo, propondo um controlador por modos deslizantes, um observador fuzzy para estimar a dinâmica não modelada da planta e um adaptador de parâmetros baseado em aproximações ótimas para ajustar os parâmetros do controlador robusto de acordo com as variações dinâmicas.

Além dos trabalhos identificados na revisão sistemática, cabe destacar outros trabalhos encontrados na literatura que têm relação com a proposta desse trabalho. Liu *et al.* (2022) apresentam um controle hierárquico para um AGV, considerando a condição de variação do centroide do veículo devido à posição das cargas. O protótipo de AGV utilizado tem quatro rodas de tração e esterçamento e utiliza dados de uma central inercial para estimar posição e ângulo de orientação do AGV, assim como o ângulo de desvio do centro de massa do veículo. O controlador proposto é dividido em duas camadas hierárquicas. Considerando o modelo dinâmico do veículo, primeiramente, um MPC estima os valores de ângulo de orientação e desvio do centro de massa de acordo com os valores de referência de velocidade e ângulo de esterçamento do veículo. A camada superior é responsável pelo controle do ângulo de orientação e combina um controlador Fuzzy com um controlador por modos deslizantes. A saída do controlador é o momento adicional compensatório em relação ao desvio do centro de massa. Assim, a camada inferior é responsável por traduzir a saída do controlador superior em valores de torque para as roda do veículo. O trabalho apresenta resultados de simulações numéricas e experimentos com o AGV, comprovando o comportamento do controlador proposto em ambos os ambientes.

Utilizando um AGV híbrido, com características do tipo triciclo e do tipo diferencial, Sierra-Garcia e Santos (2022) implementam um controlador que combina um controle por Reforço de Aprendizagem com um controlador PI sintonizado por um Algoritmo Genético. O objetivo é que a combinação dos controladores trate dois problemas acoplados de controle do AGV: o controle da velocidade do AGV e o controle de posição do AGV. O primeiro problema está relacionado ao cumprimento de prazos de coleta e entrega de cargas feitas pelo AGV e o segundo, à exatidão do AGV em relação à guia. O AGV em questão utiliza um sensor magnético para seguir uma guia magnética. Os resultados apresentados derivam de simulações numéricas do AGV, considerando o modelo cinemático e dinâmico do veículo, e o controlador proposto obteve erros dentro da faixa de 2 cm , nas diversas pistas simuladas.

Zhang *et al.* (2022) estudam a identificação da faixa guia de um AGV em um ambiente com variação de luminosidade. A câmera é fixada na parte frontal do veículo, sofrendo mais com regiões de sombra e iluminação saturada. Por isso, um algoritmo de otimização é proposto para detecção da faixa. Um controlador de modos deslizantes adaptado por um sistema de inferência fuzzy, *Fuzzy Inference System* (FIS), é utilizado para corrigir o desvio lateral do AGV. O sistema proposto atingiu um erro de $\pm 3\text{ mm}$ de distância da faixa.

Para finalizar essa seção será brevemente discutido outro ponto investigado em Reis, Couto e Morandin Junior (2022a), os indicadores de desempenho e as formas de validação dos controladores propostos utilizados para o domínio de problema. O desempenho de controladores pode ser medido de várias formas diferentes, sendo que alguns indicadores são mais comuns e estudados em livros didáticos, como os valores medidos durante o transiente de um sistema (tempo de subida, máximo sobressinal, tempo de acomodação, etc), a integral do erro (integral do erro absoluto, integral do erro quadrático, etc), resposta à entradas unitárias (degrau unitário, impulso, rampa unitária), além do uso de estatística descritiva, como a média e o desvio padrão das variáveis de interesse (OGATA, 2010; MARLIN, 2015). Esses indicadores podem também ser usados no projeto e sintonia de controladores.

Os resultados de Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) mostram que a maioria dos trabalhos selecionados utiliza apenas análise gráfica para para verificação do desempenho do controlador proposto e não comparam a proposta com outro controlador. A análise gráfica da resposta de um controlador é uma ferramenta importante, mas é possível argumentar que a operação normal de um AGV vai além da janela de tempo comumente mostrada nos gráficos, além estar sujeito à distúrbios e ruído que não são considerados em entradas unitárias, por exemplo.

Dos 92 trabalhos selecionados, 16 utilizam indicadores quantitativos para avaliação e comparação do desempenho do controlador (LIU *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020a; AMMAR; AZAR, 2019; CHEN *et al.*, 2020; WU; YANG, 2020; KAR *et al.*, 2019; LIAO;

CHEN; YAO, 2018; ZHANG *et al.*, 2019; WU *et al.*, 2019; REN *et al.*, 2019; BAI *et al.*, 2019a; CHUN-FU *et al.*, 2017; ALAKSHENDRA; CHIDDARWAR, 2016; GOSWAMI; PADHY, 2016; ARMESTO *et al.*, 2015), sendo usados a integral do erro quadrático, a integral do erro absoluto, integral do erro quadrático pelo tempo, a integral do erro absoluto pelo tempo, erro absoluto, tempo de acomodação, máximo erro absoluto, máximo intervalo do erro e tempo de convergência do erro. O uso desses indicadores será considerado para, dentro do possível, comparar os resultados desse trabalho com os resultados da literatura.

2.5 Considerações Finais

Esse capítulo apresentou o domínio de problema do controle de posição do AGV seguidor de linha definindo, primeiramente, o problema que será tratado ao longo do trabalho. O uso da modelagem matemática do veículo no projeto do controlador foi discutida apresentando uma panorama do consideração dos modelos cinemático e dinâmico nos controladores propostos na literatura.

Uma breve revisão sobre o uso de sensores foi realizada na Seção 2.3. Por fim, a Seção 2.4 apresenta uma revisão mais ampla da literatura focando em aplicações de controle inteligente para o sistema de controle de posição do AGV e o uso de sistemas adaptativos similares ao da proposta desse trabalho, que será apresentada no próximo capítulo. Os trabalhos de Reis e Morandin Junior (2021) e Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) podem ser consultados para outras análises referentes aos estudos selecionados nas revisões.

Capítulo 3

Proposta do Trabalho

3.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo apresenta a proposta, discutindo as características e o funcionamento de cada bloco do sistema de controle proposto. A Seção 3.2 apresenta a proposta a partir de sua visão macro, a partir dos resultados da revisão da literatura sobre o problema. Nessa seção são definidos os requisitos de operação do AGV e apresentado brevemente o ambiente de operação a que se destina o AGV projetado, mostrando a interseção entre esses aspectos e como serão abordados na proposta. As contribuições da proposta são:

- ❑ O discussão sobre o aumento da exatidão da posição do AGV usando o controlador proposto em comparação com um controlador PID e os fatores envolvidos no desempenho do sistema de controle;
- ❑ A definição da contribuição dos sensores propostos para o desempenho do controlador, assim como o número de entradas consideradas e seu impacto na exatidão e/ou precisão do sistema de controle;
- ❑ A sistematização da implementação de sistemas de controle embarcado baseado em na arquitetura inspirada em Arquiteturas Orientadas a Serviços, do inglês *Service-oriented Architecture* (SOA), utilizando o padrão fachada de desenvolvimento de software.

3.2 Proposta

A proposta do presente trabalho é a implementação de um controlador baseado em Inteligência Artificial adaptativo e em cascata usando múltiplos sensores para o problema do controle de posição de um AGV seguidor de linha de forma a aumentar a exatidão e/ou precisão de posição do veículo. O controlador proposto é baseado em controladores Fuzzy em cascata, de forma a agregar as medições de diferentes sensores a fim de melhorar o desempenho do AGV em relação à sua posição, ou seja, sua distância para a faixa guia, e seu ângulo de orientação em relação à faixa guia. Um aumento na exatidão do AGV em relação à posição possibilita o veículo trafegar por corredores mais estreitos e aumenta a segurança durante a operação do veículo. Já o aumento na exatidão do ângulo do veículo diminui as possíveis oscilações na carga, além de contribuir para os pontos citados anteriormente.

Uma visão macro da proposta de investigação do presente trabalho é mostrada na Figura 4. A pesquisa sobre o tema revelou que parte considerável dos trabalhos ainda consideram apenas o comportamento cinemático no controle de posição de AGVs. Entretanto, veículos de carga apresentam variações dinâmicas durante sua operação, mesmo que a relação peso transportado versus potência dos motores propulsores seja alta, aproximando o veículo de um comportamento cinemático. Diferentes condições de carga, alterações no piso e variações da velocidade influenciam o desempenho do AGV. Uma justificativa para não consideração da dinâmica do veículo é a dificuldade em se obter esse modelo. Porém, há formas de considerar os comportamentos dinâmicos mesmo que o modelo do veículo não seja obtido.

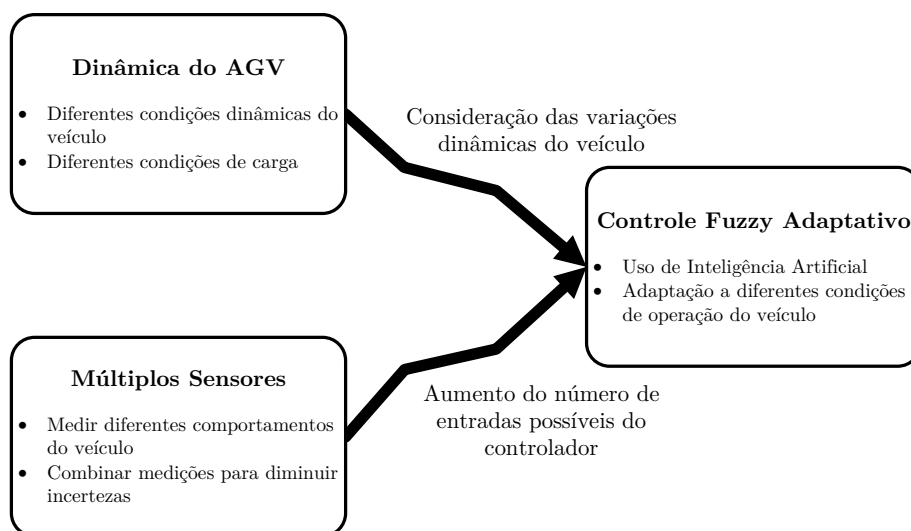


Figura 4 – Visão macro da proposta do trabalho.

Um dos fatores que dificultam a obtenção do modelo dinâmico do AGV é que o problema do AGV seguidor de linha é multivariável. Além dos resultados em Reis e Morandin

Junior (2021), Reis, Couto e Morandin Junior (2022a), os resultados experimentais de Rodrigues Junior (2017) para os controladores PID e fuzzy de uma entrada e de Oliveira, Reis e Morandin Junior (2019) para o controlador PID, e os resultados simulados de Oliveira (2018a) para os controladores PID e fuzzy mostram que a consideração de apenas uma das variáveis entre distância e ângulo como entrada do controlador pode aumentar a variação da outra.

Dessa forma, a proposta investiga em que nível o uso de mais sensores aumenta a exatidão e/ou precisão de posição do veículo, medindo diferentes comportamentos do AGV. A medição de vários sensores e a combinação desses valores também diminui as incertezas sobre o comportamento do veículo. Serão considerados como principais variáveis investigadas nesse trabalho, a distância entre o AGV e a faixa guia, o ângulo do veículo em relação à mesma e suas variações e a aceleração lateral do veículo medida por diferentes sensores. Além disso, será realizada a medição da corrente dos motores de forma a adaptar o controle de posição para diferentes cargas que o veículo pode transportar. A consideração de outras variáveis do sistema possibilita o controlador atuar na planta para corrigir outros estados, mesmo que, no caso do AGV, a atuação ocorra apenas na tensão de armadura dos motores DC.

Além disso, apesar de não ser o foco desse trabalho, um maior número de medições da planta e a disponibilização desses dados aponta para a Indústria 4.0, no sentido de aplicar os dados não apenas no controle local, mas também em aprendizagem de máquina e processamento na nuvem, identificação de padrões de comportamento, identificação de problemas e necessidades de manutenção, entre outras aplicações possíveis.

A Figura 5 mostra a versão simplificada da malha de controle da proposta, em que algumas variáveis de saída do AGV, $Y(t)$, serão medidas por sensores, criando um vetor de medições $M_y(t)$ que será realimentado no controlador fuzzy-adaptativo em cascata. A ação de controle calculada $u(t)$ será, então, aplicada aos atuadores por meio do conversor de potência, alimentado externamente pela fonte S , gerando a ação de controle aplicada ao AGV $K_{cp} \cdot u(t)$ que pode sofrer com distúrbios, representados pelo sinal d .

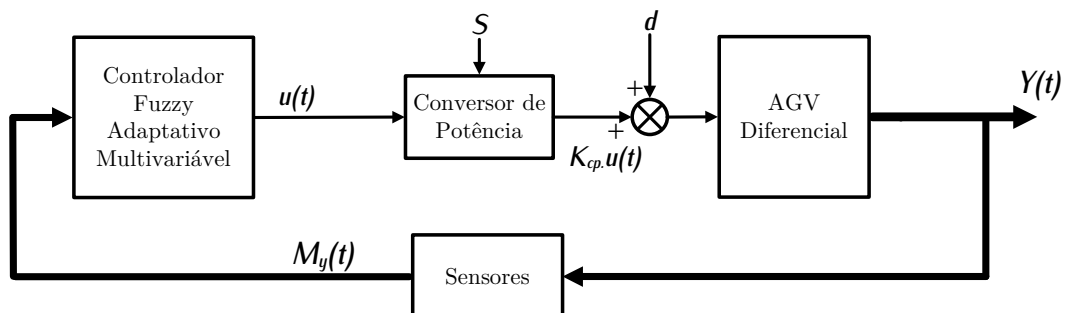


Figura 5 – Representação do sistema de controle fuzzy-adaptativo em cascata proposto neste trabalho. Conectores mais espessos entre os blocos significam múltiplas variáveis.

A câmera é o sensor principal do AGV, tendo sido definida de acordo com a determinação do tipo do AGV a ser projetado pelo laboratório TEAR e o tipo de indústria que o veículo visa atender. Os resultados de Reis e Morandin Junior (2021) e Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) mostram o número de trabalhos que empregam a câmera e técnicas de visão computacional no domínio do problema com bom desempenho de medições e controle do sistema. Soma-se, ainda, os resultados em Oliveira, Reis e Morandin Junior (2019) que examinam e comprovam que o sensor pode ser usado da malha de controle se considerados os parâmetros do sensor e as limitações do tempo de execução da malha de controle por realimentação.

A aplicação de IMUs e encoders foi definido de acordo com a revisão da literatura e a observação do número de trabalhos que empregam esses sensores. Além de aumentarem o número de medições e de variáveis medidas no sistema, o uso no AGV desse trabalho permite uma comparação com os resultados da literatura. Outro ponto importante é que as medições desses sensores podem ser usadas como dados para um sistema supervisor a fim de acompanhar o deslocamento do veículo, mesmo que não seja necessária uma resolução alta da informação.

Como esse trabalho investiga a operação do AGV sob variação de carga, a corrente nos motores é uma variável que será diretamente afetada e está diretamente ligada ao torque produzido pelos motores. Por isso, foi definido o uso de sensores de corrente nos motores. A Tabela 1 elenca as variáveis medidas diretamente por eles e algumas grandezas que podem ser estimadas das medições dos sensores por cálculos simples, como a integral e a derivada, por exemplo.

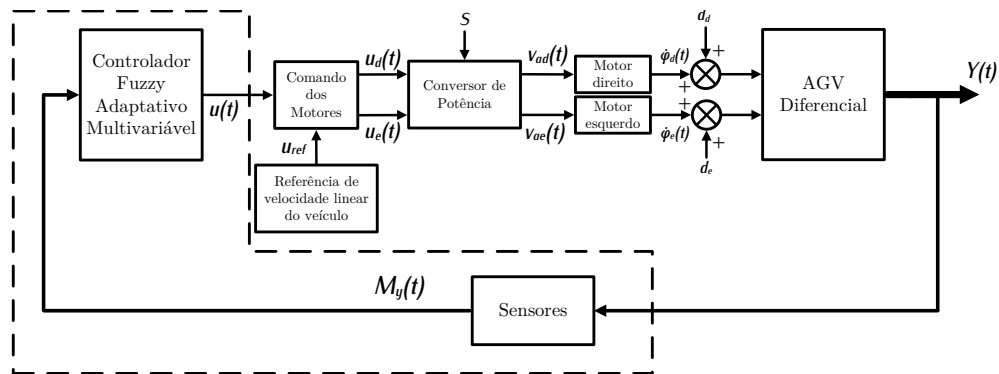
Tabela 1 – Identificação das grandezas medidas pelos sensores embarcados no AGV e identificação de algumas grandezas que podem ser estimadas por meio de algoritmos.

Sensor	Grandezas Medidas	Grandezas Estimadas
Câmera	Distância δ em relação à guia; Ângulo de orientação θ do veículo em relação á guia	Varição distância $\dot{\delta}$; Varição do ângulo de orientação $\dot{\theta}$
Sensor de Corrente	Corrente do motor i_a	-
IMU	Aceleração nos eixos x , y e z ; Velocidade angular nos eixos x , y e z	Velocidade com a integração da aceleração; Deslocamento com a integração da velocidade; Deslocamento angular com a integração da velocidade angular
Encoder Incremental	Velocidade do motor; Sentido do giro do motor	Deslocamento pela integração da velocidade, considerando o diâmetro das rodas; Velocidade do veículo, considerando o modelo cinemático

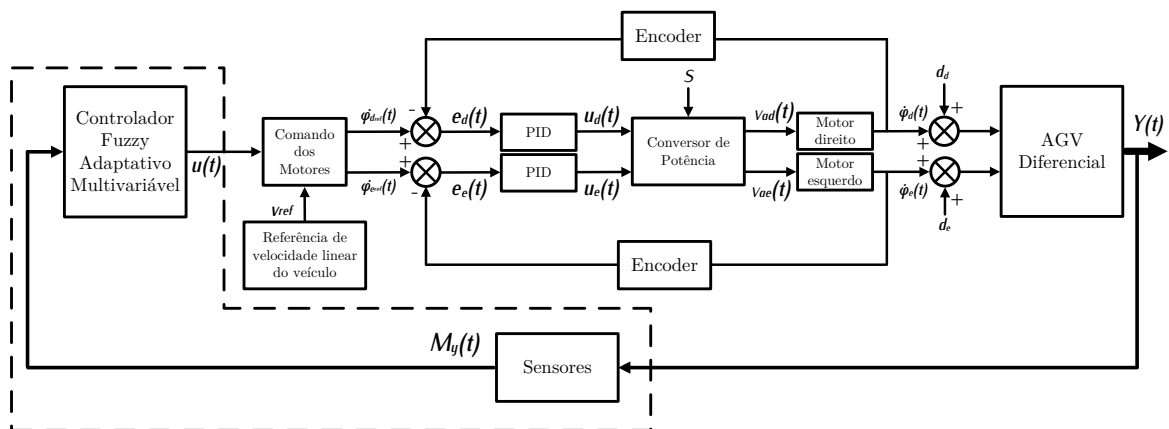
Outro ponto de destaque na revisão da literatura foi a indicação do crescente uso de técnicas de Inteligência Artificial no problema, com muitas aplicações de sistemas fuzzy. Um dos fatores para sua aplicação é a capacidade de controladores Fuzzy de lidar com

o controle sistemas sem a necessidade do modelo matemático dos mesmos, mesmo no caso de sistemas não-lineares complexos e de difícil modelagem (MOHAMMADZADEH *et al.*, 2023). Além disso, sistemas de inferência fuzzy são inerentemente multivariáveis. Assim, o controlador proposto tem o objetivo de combinar as características de trabalhar com múltiplas variáveis, adaptabilidade e flexibilidade de sistemas de controle fuzzy para que o sistema de controle se adapte e tenha melhores respostas em relação à variação da dinâmica do AGV, representada principalmente pela variação de carga, diminuindo, assim, a necessidade de interferência do operador ou do engenheiro de controle no ajuste dos parâmetros do sistema. A proposta utiliza a configuração em cascata de sistemas de inferência fuzzy para diminuir o número de variáveis dos sistemas de inferência a serem sintonizadas.

Nas Figuras 6(a) e 6(b) são mostrados os dois tipos de malha de controle implementadas, detalhando mais a malha da Figura 5. Com a implementação apenas do controlador fuzzy-adaptativo, a Figura 6(a) explicita como ocorre a atuação do sistema.



(a) Malha de controle detalhada do controlador fuzzy-adaptativo em cascata.



(b) Malha de controle detalhada do controlador fuzzy-adaptativo em cascata com controle PID de velocidade dos motores.

Figura 6 – Detalhamento da malha de controle da proposta nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.

A ação de controle definida pelo controlador é a entrada de um bloco de comando dos motores que, a partir de um valor de referência da velocidade linear u_{ref} , valor em porcentagem da escala PWM do conversor de potência, que o veículo deve seguir, determina o valor do sinal de controle que deve ser aplicado nos motores direito e esquerdo, $u_d(t)$ e $u_e(t)$, respectivamente. O conversor de potência transforma esse sinal na tensão aplicada à armadura de cada um dos motores, $v_{a_d}(t)$ e $v_{a_e}(t)$, alterando as velocidades $\dot{\varphi}_d$ e $\dot{\varphi}_e$ nas rodas de tração do AGV. Os valores de possíveis distúrbios em cada roda são representados por d_d e d_e .

A malha mostrada na Figura 6(b) mostra a implementação do controle de velocidade dos motores do AGV, além do controlador de posição principal. Com a realimentação da velocidade medida pelos encoders, as malhas de controle de velocidade comandam os motores de acordo com os valores de velocidade de referência $\dot{\varphi}_{d,ref}$ e $\dot{\varphi}_{e,ref}$. O valor da referência de velocidade linear do veículo é agora especificado em termos de velocidade linear do veículo a partir da medição realizada pelos encoders. O bloco de comando dos motores converte, então, a ação de controle para um valor de incremento de velocidade, gerando a referência de velocidade para cada motor.

Por fim, deve-se detalhar o controlador fuzzy-adaptativo em cascata proposto. A implementação do controlador será realizada por etapas, com a implementação de cada FIS utilizando poucas entradas e os associando em cascata de forma a melhorar o desempenho de exatidão e/ou precisão no controle de posição do AGV. A região destacada pela linha tracejada na Figura 6 é detalhada na Figura 7.

No Capítulo 4 serão mostrados os controladores implementados a partir da associação gradual dos sistemas de inferência da Figura 7. Ou seja, primeiramente, apenas o Sistema de Inferência Fuzzy 1 será implementado para o controle de posição do AGV, em malhas de controle sem e com o controle de velocidade dos motores, Figura 6.

O Sistema de Inferência Fuzzy 2 utiliza as variações no tempo das medições do ângulo de orientação do veículo e da distância do mesmo em relação à faixa guia de forma a considerar a tendência de comportamento do veículo na correção do movimento. O Sistema de Inferência Fuzzy 3 utiliza os valores da velocidade angular do veículo no eixo z na IMU frontal, $\dot{\Theta}_{IMU_{frontal}}$, e na IMU traseira, $\dot{\Theta}_{IMU_{traseira}}$, de forma a medir com redundância a velocidade angular do veículo. Por fim, o Sistema de Inferência Fuzzy 4 considera os valores das correntes nos motores direito e esquerdo, i_{a_d} e i_{a_e} , respectivamente, para compensar diferentes condições de transporte carga do veículo.

O sistema de controle proposto foi desenvolvido para a aplicação em um AGV para aplicação em fábricas de montagens de eletrônicos, operando, por exemplo, no transporte de peças do supermercado para as estações de trabalho. Como características, esse ambiente possui baixo nível de ruído eletromagnético e variações de iluminação que possam afetar os sensores, também possui baixo nível de sujeira no chão, que possa dificultar a identificação da faixa guia. A guia pode estar degradada pelo trânsito regular de pessoas

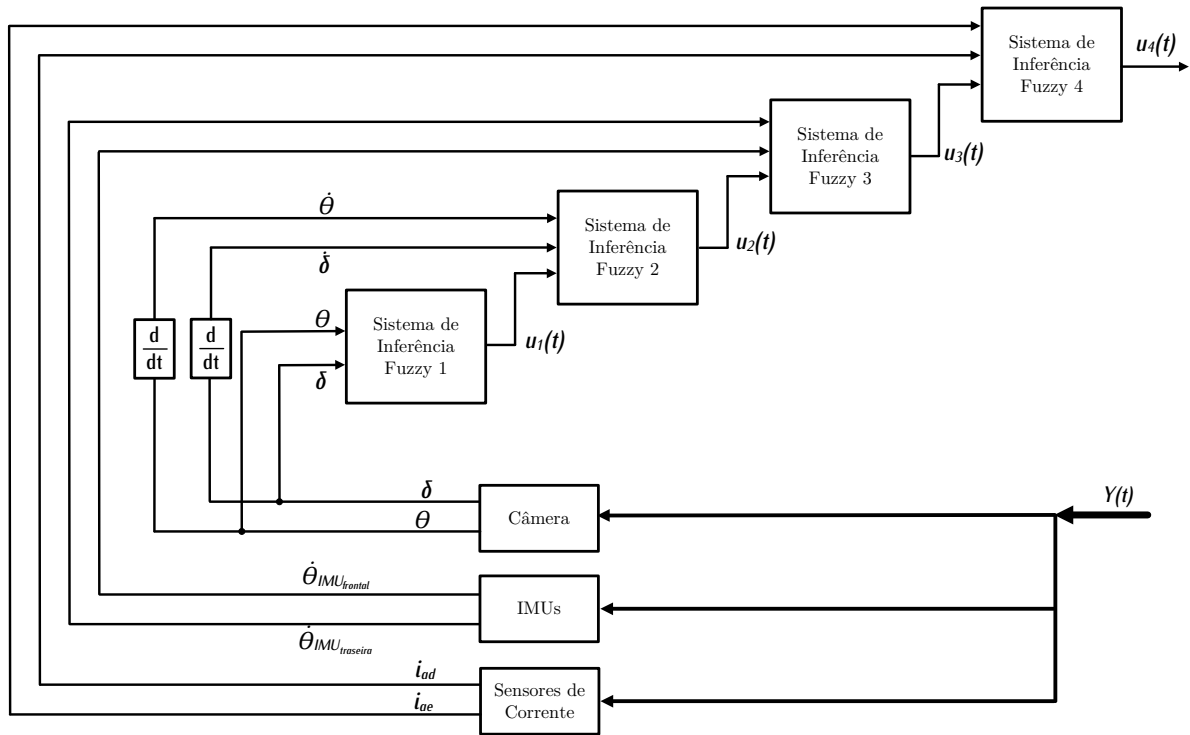


Figura 7 – Detalhe do controlador fuzzy-adaptativo em cascata associado em cascata a partir da implementação dos sistemas de inferência para os diferentes sensores.

e equipamentos. Solá (2020) descreve um ambiente similar para um AGV que utiliza características do piso para elaboração de um mapa e posterior localização no ambiente. Com a proposta do aumento da exatidão do controle de posição do AGV, o objetivo é que o veículo possa transitar por corredores mais estreitos, contribuindo para uma possível otimização do espaço de supermercados de componentes eletrônicos e armazéns.

O AGV construído para validação da proposta tem a capacidade de carga máxima de 5 kg , a velocidade linear máxima limitada a $1,4\text{ m/s}$ e velocidade linear de operação entre $0,14\text{ m/s}$ e $0,20\text{ m/s}$. O projeto tem como objetivos um erro de distância em regime permanente de no máximo $\pm 10\text{ mm}$, com um máximo sobressinal de $\pm 30\text{ mm}$ em regime transitório, um desvio no ângulo de orientação de $\pm 2^\circ$ em regime permanente e um máximo sobressinal de $\pm 15^\circ$, independentemente da carga transportada. Cada AGV e seu respectivo sistema de controle propostos na literatura têm suas especificidades, como seus sensores e hardware de processamento e controle. Por isso, não há um padrão de comparação em relação aos requisitos de erro. Entretanto, os valores definidos são similares e comparativos aos valores de Liu *et al.* (2020), Chen *et al.* (2020) e dos valores citados por Wu e Yang (2020), que apresenta trabalhos que têm erro absoluto de posição entre 2 mm e 40 mm para AGVs de diferentes configurações e com diferentes estratégias de controle.

A implementação da proposta se baseia em uma arquitetura de software inspirada na Arquitetura Orientada a Serviços utilizando o Padrão Fachada de desenvolvimento de

software.

A orientação a serviços significa que os recursos são claramente particionados e representados de forma consistente (ERL, 2009). Esses recursos de software, chamados de serviços, são unidades lógicas individuais, que podem existir de forma independente e realizar tarefas específicas. Porém, vários serviços podem se relacionar para executar um conjunto de tarefas, sendo cada serviço responsável por uma parte específica da execução. Segundo Erl (2009), para que o serviço mantenha sua independência, sua lógica deve ser encapsulada em um contexto determinado, que será determinado pela tarefa que deve ser executada.

As aplicações mais comuns de SOA incluem sistemas de software distribuídos e conectados em rede, que proveem serviços para usuários finais ou para outros serviços (PAPAZOGLOU *et al.*, 2008), utilizando, principalmente, *web services* como principal tecnologia de implementação (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Como a implementação da proposta está embarcada no AGV e não faz uso de nenhum serviço distribuído, a arquitetura implementada é inspirada nos princípios da SOA. Por simplicidade e guardadas as particularidades, o termo SOA será utilizado daqui em diante.

As principais vantagens que justificam a utilização da SOA no presente trabalho são o aumento na facilidade de reuso, manutenção e atualização de softwares devido a alta coesão e ao baixo acoplamento dos serviços, o aumento da modularidade e flexibilidade que favorecem a escalabilidade do sistema embarcado, e possibilidade continuidade do projeto de pesquisa tanto com o reuso de serviços quanto com a facilidade de criação de novos serviços para a mesma arquitetura (PAPAZOGLOU *et al.*, 2008; OLIVEIRA, 2015). Além disso, o desenvolvimento de serviços na SOA foi realizado seguindo uma documentação rígida e individual, contribuindo para as vantagens citadas anteriormente.

O desenvolvimento dos serviços na segue o padrão Fachada, um padrão estrutural de desenvolvimento que permite o agrupamento de subsistemas por meio de uma interface que permite um método central de acesso a esse subsistema (LASATER *et al.*, 2006). Assim, uma interface unificada é criada para um sistema mais complexo, que fica em uma camada escondida (UZAYR, 2023), da mesma forma que o interior de uma construção é escondido por sua fachada. Dessa forma, o usuário do subsistema, que descreve um serviço da SOA nesse trabalho, tem acesso apenas aos métodos necessários à execução do serviço.

As vantagens do padrão Fachada aplicadas ao desenvolvimento do sistema embarcado do AGV são a possibilidade de isolar códigos e serviços complexos de outros serviços, resultando na diminuição do acoplamento entre serviços (UZAYR, 2023) e a simplificação no uso dos serviços pelos outros componentes da SOA. Uzayr (2023) cita a desvantagem de que modificações nos métodos abaixo da camada de Fachada podem impactar na própria estrutura da Fachada. Entretanto, unindo a descrição, documentação e estruturação rígida dos serviços na SOA é possível minimizar esse impacto na implementação do padrão.

3.3 Considerações Finais

O capítulo apresentou a proposta do trabalho, aprofundando a discussão na aplicação dos conceitos do Capítulo 2. A análise da resposta dinâmica do sistema e o estudo dos sensores têm impacto direto no projeto do controlador. O primeiro fator auxiliará na compreensão do comportamento do sistema sob variação de carga e, conseqüentemente, na sintonia do controlador, quando o comportamento será descrito por variáveis linguísticas. O estudo dos sensores, que envolve a aquisição e análise dos sinais, é uma etapa importante para reconhecer quais sensores oferecem mais informações sobre a dinâmica do sistema, podendo contribuir, assim, para a melhora de exatidão do sistema de controle. Os sensores embarcados e as grandezas que podem ser medidas do sistema foram apresentados e mais detalhes sobre os mesmos e sobre a implementação no AGV serão discutidos no Capítulo 4, que também apresentará a implementação dos controladores usados no AGV. Os resultados dos experimentos com o AGV realizados para examinar a combinação de sensores tendo como foco melhorar a medição para resultar em um impacto positivo no desempenho do controlador são apresentados no Capítulo 5.

Capítulo 4

Desenvolvimento

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta a estrutura mecânica e eletrônica do AGV desenvolvido e montado para o teste das hipóteses, apresentando os sensores, atuadores e unidade de processamento utilizados, definindo o sistema embarcado utilizado para os experimentos que serão apresentados no Capítulo 5. Além disso, o capítulo discute a implementação dos controladores baseados em sistemas de inferência fuzzy e os controladores PID embarcados e testados no AGV. Na apresentação do projeto dos sistemas de controle, as especificidades e comportamentos dos sensores utilizados serão também abordados.

4.2 AGV Diferencial AD02

O AGV Diferencial AD02 foi desenvolvido como plataforma de experimentos para o teste das hipóteses do presente trabalho. O veículo tem 300 mm de largura por 410 mm de comprimento com, aproximadamente, $2,7\text{ kg}$ e é composto por duas rodas de tração com seus eixos alinhados ao seu centro geométrico e ao centro da câmera, principal sensor do AGV. Além das rodas de tração, o AGV conta com três rodízios, somando cinco pontos de apoio. A estrutura da base do veículo é mostrada na Figura 8. A estrutura de suporte é composta por perfis de alumínio de $\times 15\text{ mm}$. Nessa base são acoplados os motores e os três conjuntos mola-rodízios. As molas dos rodízios tem o objetivo de manter os rodízios em contato com o chão, mesmo sob variação de carga e de eventuais desníveis no piso. As molas são feitas de chapas de acrílico de espessura 3 mm .

A Figura 9 apresenta a representação de um AGV em uma referência global de posição e os eixos x_{agv} e y_{agv} do próprio veículo, que serão considerados como referência os

sensores. As rodas de tração têm raio $r = 75 \text{ mm}$, velocidades angulares de $\dot{\varphi}_d$ e $\dot{\varphi}_e$, para os motores direito e esquerdo, respectivamente, e a distância de cada roda ao ponto P (centro geométrico do AGV) é de $\ell = 15 \text{ cm}$.

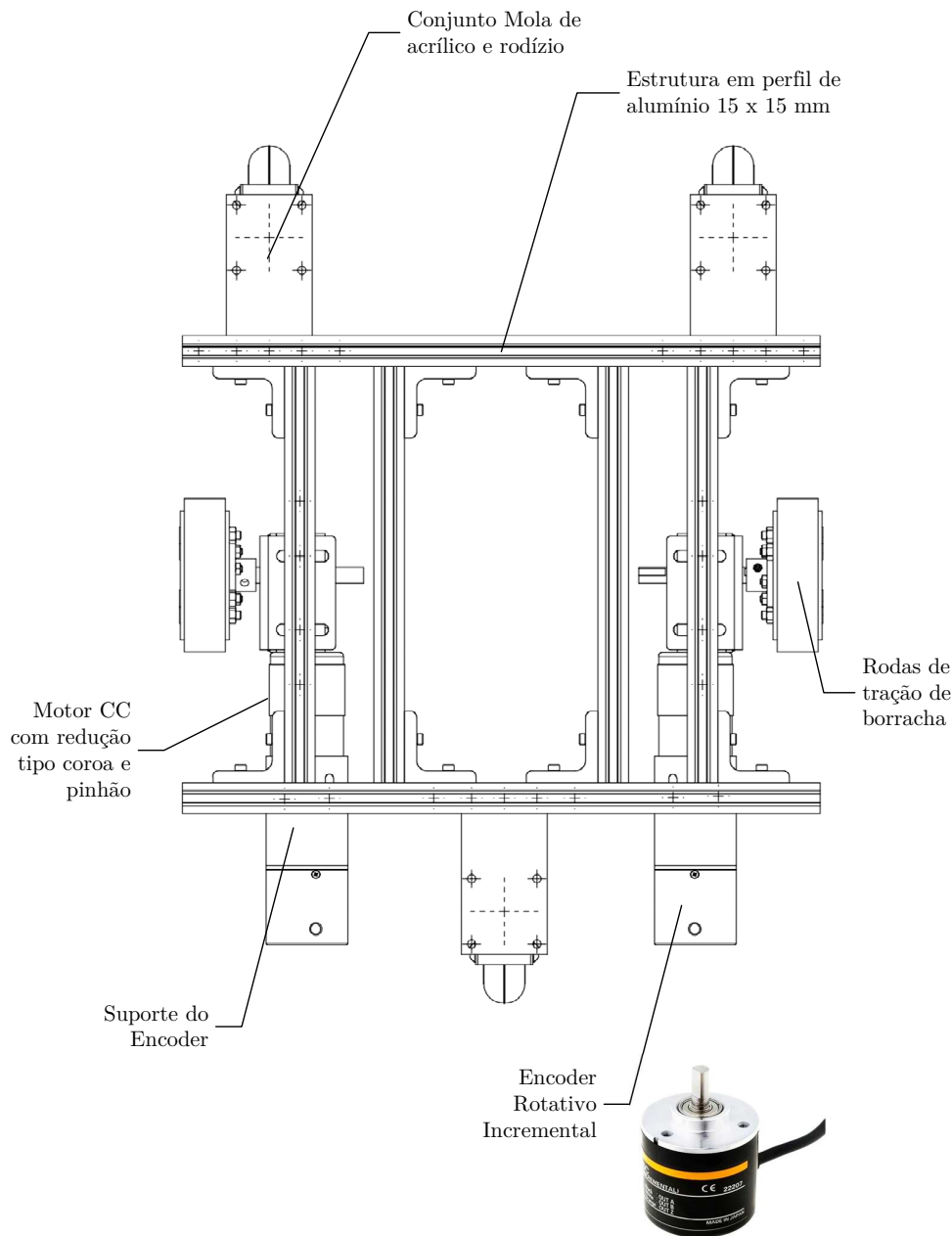


Figura 8 – Chassis base do AGV montado em estrutura de perfil de alumínio. Os conjuntos das rodas de tração, motorreductor e encoder e os conjunto de mola e rodízio também são mostrados na imagem.

A Figura 10 mostra a estrutura de controle e eletrônica do AGV. Os sensores e dispositivos eletrônicos que compõem o sistema são indicados. A câmera é fixada à essa estrutura na parte inferior, com o suporte que é mostrado nas vistas em perspectiva e lateral mostrada na Figura 11. Por fim, a Figura 12 mostra a montagem final do AGV em perspectiva e em vista lateral.

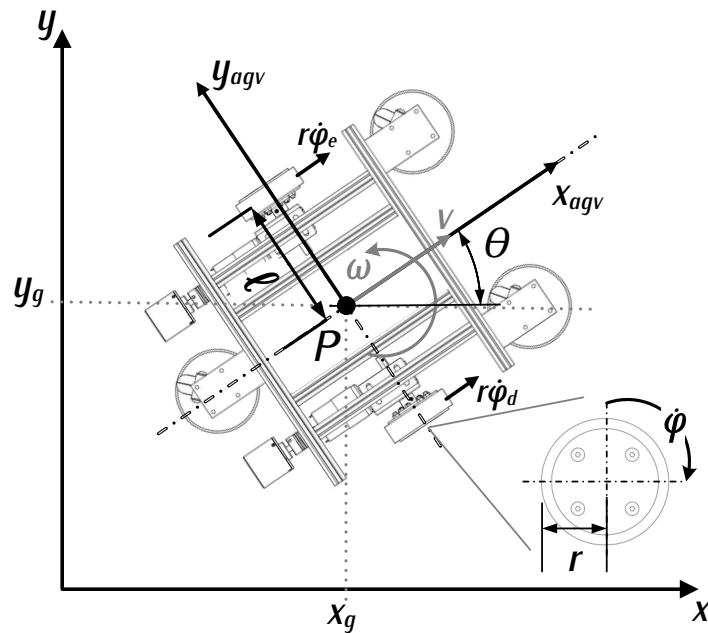


Figura 9 – Representação das coordenadas de referência global e dos parâmetros e vetores de movimento envolvidos no sistema para a elaboração do modelo cinemático do AGV.

Fonte: Próprio autor.

Em termos das conexões dos dispositivos eletrônicos no AGV, a Figura 13 mostra as camadas de controle, sensores e atuadores do veículo. As conexões indicam o tipo de dado trocado, tipo de sinal recebido ou o protocolo utilizado, enquanto as setas indicam o sentido das informações. Na parte inferior da Figura 13 há uma legenda indicando a classificação da conexão.

Na camada de controle, incluem-se a unidade de controle, a Raspberry Pi, o conversor analógico-digital, que se comunica com a unidade de controle utilizando protocolo I2C, e o contador rápido de pulsos dos encoders, que se comunica com a unidade de controle utilizando o protocolo SPI.

Na camada de sensores, são mostrados a câmera, as unidades de medição inercial, os encoders e os sensores de corrente. A câmera é conectada à unidade de controle pelo conector *Camera Serial Interface* (CSI), dedicado para conexão e troca de dados com o módulo de câmera. A leitura dos dados das IMUs se dá utilizando protocolo I2C. Os encoders são acoplados mecanicamente aos eixos do AGV e o contador rápido realiza a contagem e armazenamento dos pulsos gerados. Os sensores de corrente são conectados em série com a alimentação dos motores e geram um sinal analógica 0 – 5 V proporcional à corrente. O valor dos sensores é lido pelo conversor analógico digital externo à unidade de controle.

Finalmente, a camada de atuadores engloba o módulo de acionamento dos motores CC, um módulo Ponte H, e os próprios motores. A unidade de controle configura os estados dos motores e a velocidade dos mesmos com pinos de saída de sinal por Modulação de

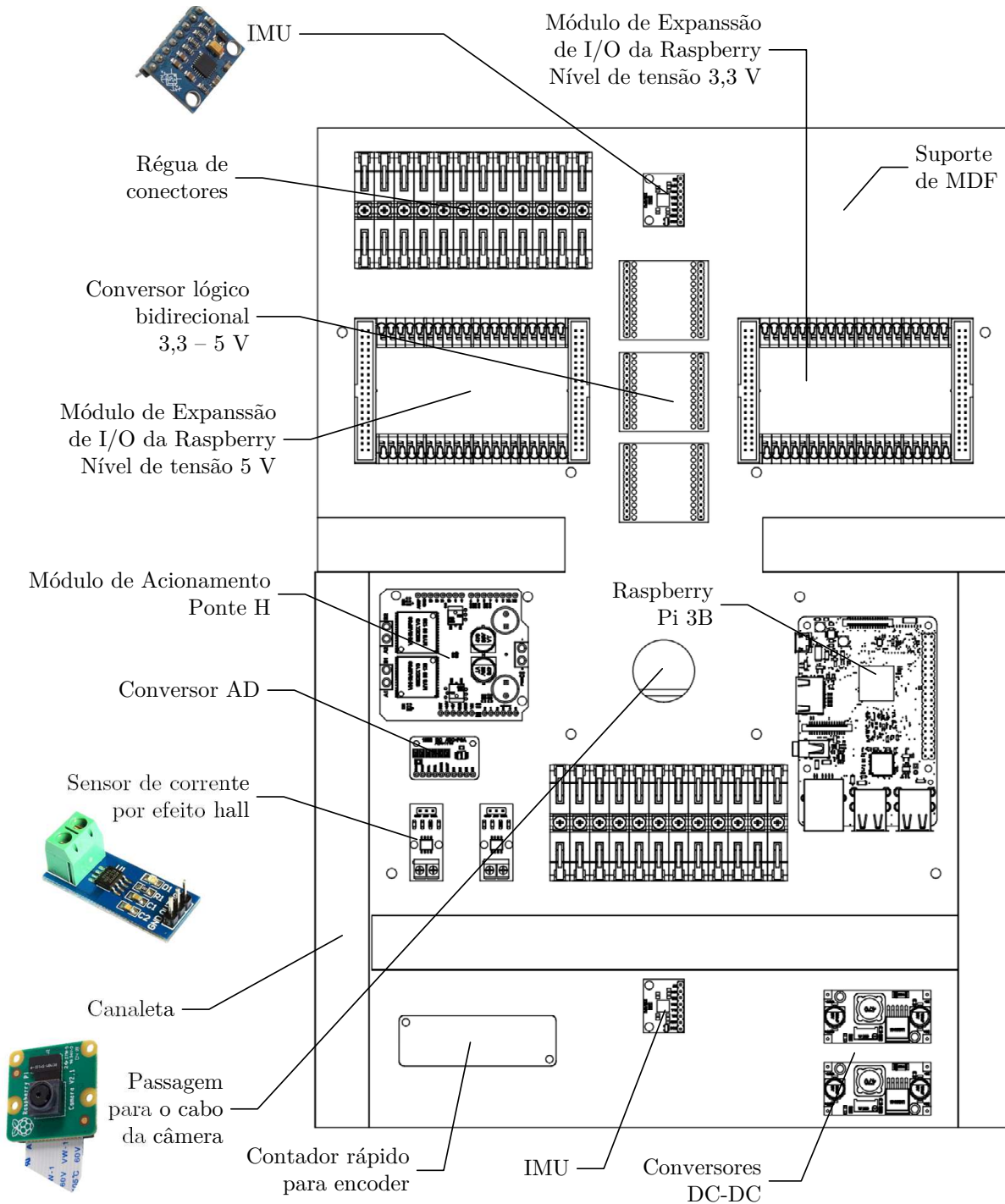


Figura 10 – Base eletrônica do AGV em que são fixados os sensores e a unidade de controle do veículo.

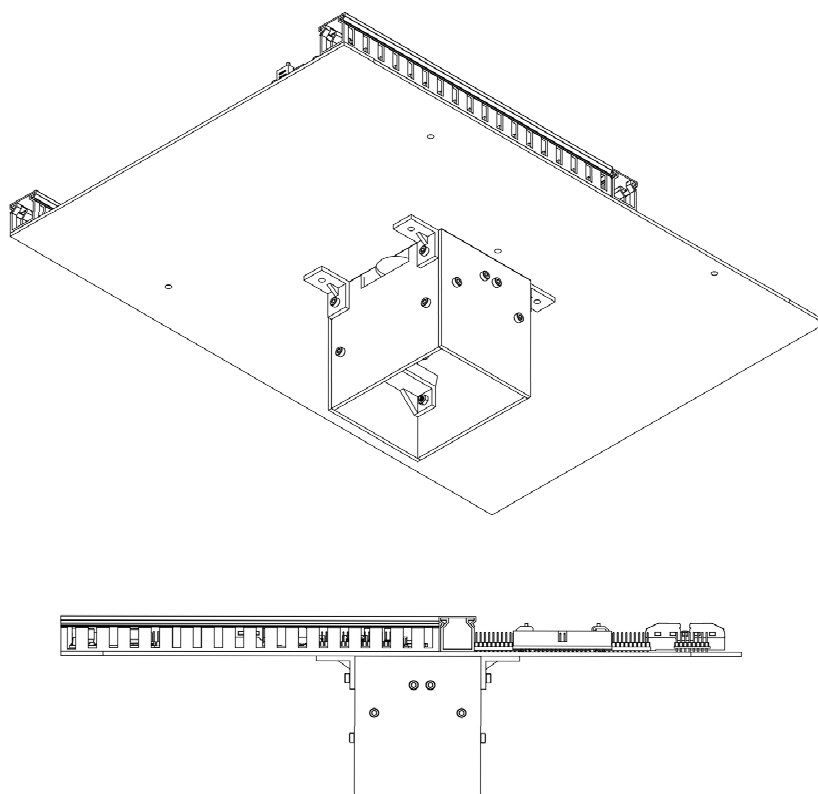


Figura 11 – Visão em perspectiva e lateral da base eletrônica do veículo com o detalhe da estrutura da câmera fixada na parte inferior da mesma.

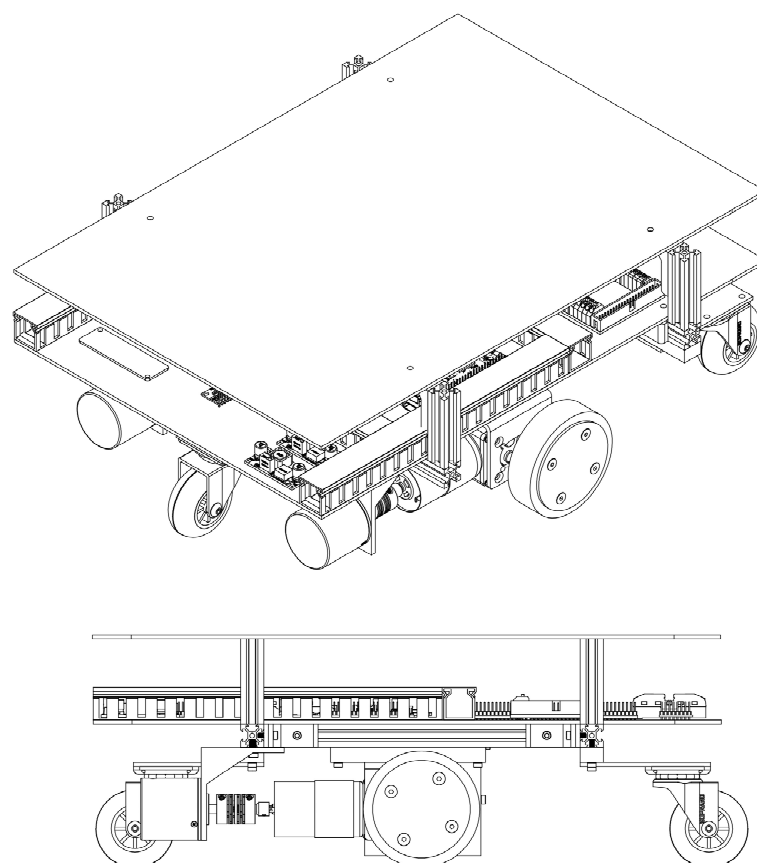


Figura 12 – Visão em perspectiva e lateral da montagem final do AGV.

Largura de Pulso, ou *Pulse Width Modulation* (PWM), implementados por hardware na Raspberry Pi. As próximas seções detalham os dispositivos utilizados no veículo.

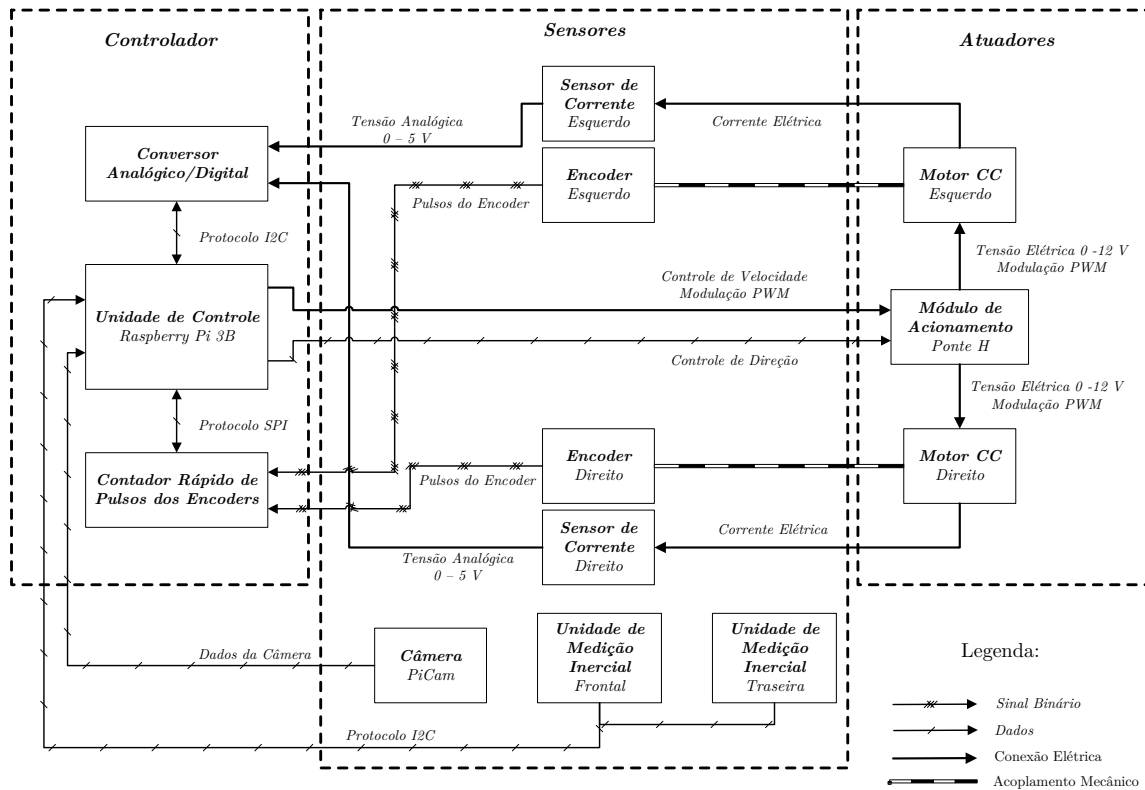
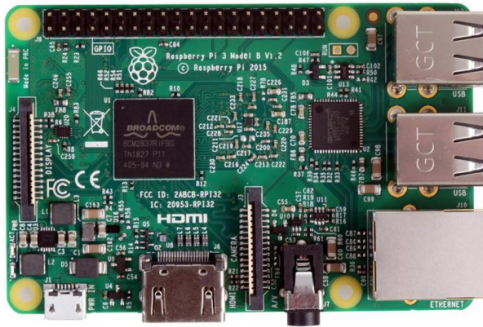


Figura 13 – Estrutura de hardware embarcada no AGV, com detalhamento das conexões entre os sensores e atuadores e a Unidade de Controle.

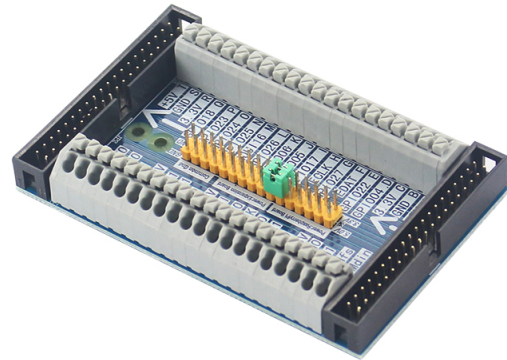
4.2.1 Unidade de Controle: Hardware e Software

O hardware da unidade de controle embarcada no AGV é uma Raspberry Pi 3B, Figura 14(a), com processador de quatro núcleos Broadcom BCM2837 de *clock* 1.2 GHz e 64 bits, unidade de processamento gráfico, ou *Graphics Processing Unit* (GPU), de 400 Mhz, 1 GB de memória RAM compartilhada entre processador e GPU e 40 pinos de entradas e saídas de uso geral, do Inglês *General Purpose Input/Output* (GPIO).

A conexão dos sensores e atuadores com a Raspberry Pi se dará pelo uso das GPIO. Para a conexão física, são utilizados dois módulos de expansão como o mostrado na Figura 14(b). Esse é um módulo cascata, pois possibilita a ligação de vários módulos de expansão em cascata, utilizando a barra de pinos dupla. Os 40 pinos da Raspberry Pi estão disponíveis nos módulos. Serão usados dois módulos para separar os níveis de tensão utilizados. A GPIO da Raspberry Pi trabalha com, no máximo, 3,3 V e alguns sensores utilizam 5 V. Por isso, os módulos de expansão serão isolados por conversores de nível lógico, separando as tensões de 3,3 V e 5 V. O esquemático eletrônico completo pode ser consultado no Apêndice B.



(a) Placa Raspberry Pi 3B.



(b) Módulo de expansão de GPIO do tipo cascata.

Figura 14 – Hardware da unidade de controle, Raspberry Pi 3B, e módulo de expansão utilizado para conexão dos sensores.

A versão do sistema operacional (SO) embarcado no AGV é *Raspberry Pi OS (Legacy)* 32-bit, versão do *Kernel* 5.10, versão do Debian 10 (Buster), versão com interface *desktop*. Para o processamento de imagem é utilizada a biblioteca OpenCV (BRADSKI, 2000), na versão 3.4.3. O controle da GPIO é realizado por meio da biblioteca WiringPi (STRICKLAND, 2018), nativa na versão do SO utilizada. A implementação do software de controle embarcado no AGV utilizou a linguagem C++. A arquitetura e o padrão de desenvolvimento do software serão apresentados na Seção 4.2.3.

4.2.2 Sensores e Atuadores Embarcados

A seguir serão descritos o elementos embarcados no AGV. Mais informações sobre a estrutura e alguns dos módulos de software desenvolvidos podem ser consultados no Apêndice B.

4.2.2.1 Câmera

O projeto utiliza um módulo de câmera da Raspberry Pi chamado RaspiCam ou PiCam v1.3. A tabela 2 apresenta as principais características da câmera e a Figura 15 mostra uma imagem do módulo e a indicação do conector utilizado para conecta-lo à Raspberry Pi 3B.

Segundo Oliveira (2018b), se o valor real, em metros, da diagonal da superfície capturada na imagem, h_{real} , e seu valor em pixels na imagem, h_{diag} , fossem conhecidos, então o valor em metros que cada pixel representa, d_p , poderia ser facilmente conhecido. Como esse valor não pode ser determinado facilmente, a Equação 1 mostra uma aproximação do valor de d_p .



Figura 15 – Módulo de câmera utilizado e indicação de conexão com a Raspberry Pi.

Tabela 2 – Características da câmera empregada no AGV.

Características	Módulo de Câmera Raspberry Pi v1.3
Tamanho do módulo	25 × 24 × 9 mm
Peso	3 g
Resolução	5 Megapixels
Modos de vídeo	1080p30, 720p60, 640 × 480p60/90
Integração Linux	Driver V4L2 disponível
Sensor	OmniVision OV5647
Resolução do Sensor	2592 × 1944 pixels
Área da imagem no sensor	3,76 × 2,74 mm
Tamanho do pixel	1,4 × 1,4 μm
Tamanho óptico	1/4"
Campo de visão vertical, α	41,41 ± 0,11°
Campo de visão horizontal, β	53,5 ± 0,13°
Distância Focal	3,60 mm

$$d_p = \frac{h_{real}}{h_{diag}} \approx \frac{2d \tan(\frac{\gamma}{2})}{\sqrt{L^2 + A^2}} \quad (1)$$

A aproximação é obtida através da relação entre a diagonal da área capturada e a diagonal do sensor da câmera como mostrado no esquema da Figura 16. A imagem é representada pela área definida pela altura A' e pela largura L' , que estão relacionadas à altura A e largura L , em pixels, da imagem capturada pelo sensor. A lente da câmera está localizada à altura $d = 8,6$ cm e está paralela ao solo. A distância entre o sensor e a lente é representado por d_{sensor} . O ângulo γ representa o ângulo do campo de visão diagonal da câmera.

A Tabela 2 apresenta o ângulo de visão horizontal e vertical da Raspicam. O valor do ângulo de visão diagonal pode ser encontrado usando a Equação 2. O valor da diagonal D é definido a partir do tamanho da imagem, $3,76 \times 2,74$ mm, e f denota a distância focal, de 3,60 mm.

$$\gamma = 2 * \arctan \left(\frac{D}{2f} \right) = 2 * \arctan \left(\frac{\sqrt{3,76^2 + 2,74^2}}{2 * 3,60} \right) \approx 65,74^\circ \quad (2)$$

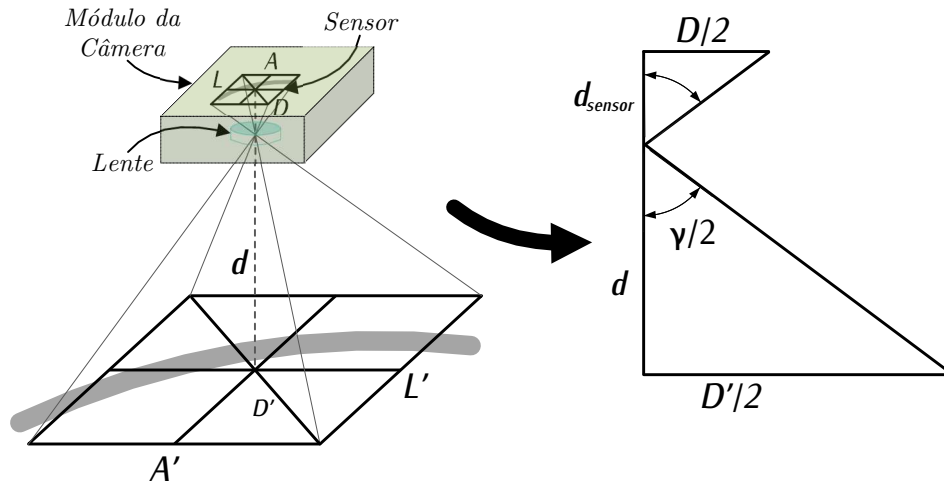


Figura 16 – Representação da câmera e da área capturada: por meio das distâncias e ângulo de campo de visão conhecidos, é possível aproximar o valor do pixel, em metros, na imagem.

Com essas informações, pode-se estimar o valor da diagonal real, representada por D' , usando relações trigonométricas, pois os demais valores são conhecidos e, assim, pode-se definir o valor aproximado de d_p :

$$d_p \approx \frac{2 \cdot 0,086 \cdot \tan\left(\frac{65,74^\circ}{2}\right)}{\sqrt{160^2 + 120^2}} = 0,556 \text{ mm} \quad (3)$$

A Tabela 3 resume os parâmetros da câmera e da imagem que será utilizada para a medição de ângulo e distância do AGV em relação à faixa guia. A resolução de ângulo por pixel é o menor valor de variação de ângulo captada para as configurações utilizadas.

Tabela 3 – Variáveis da imagem e do sensor da câmera e equivalências de tamanho do pixel.

Descrição	Valor
Distância do sensor até o chão, d	8,6 cm
Largura x Altura, $L \times A$	160 × 120 pixels
Campo de visão diagonal, γ	65,74°
Resolução de distância por pixel, d_p	aprox. 0,556 mm/pixel
Resolução de ângulo por pixel, γ_p	aprox. 0,603°/pixel

As etapas de processamento de imagem utilizadas no projeto seguem o que foi descrito em (OLIVEIRA; REIS; MORANDIN JUNIOR, 2019). As etapas de processamento, após a aquisição da imagem são: um filtro de medianas, conversão da imagem para escala de cinza, operação morfológica de abertura com um elemento estruturante retangular de tamanho predefinido e a binarização invertida da imagem.

O filtro de medianas é utilizado para homogeneizar a imagem e retirar ou amenizar possíveis ruídos do tipo sal e pimenta. O valor de cada pixel é substituído pelo valor

da mediana dos pixels à sua volta, de acordo com a forma e o número de pixels de um elemento estruturante predefinido. Quanto maior o elemento estruturante, maior o efeito de suavização na imagem. O elemento estruturante utilizado é um quadrado de lado 7 pixels.

Após a suavização da imagem, ela é convertida para escala de cinza. Antes da binarização da imagem, a operação morfológica de abertura é aplicada na imagem em escala de cinza para eliminar ruídos que afetam áreas maiores da imagem, como cruzamentos entre faixas guia ou reflexo da iluminação forçada.

Por fim, é aplicada a binarização inversa na imagem, ou seja, a partir de um determinado valor de limiar, pixels de cor mais próxima da cor branca são transformados em pixels pretos e os pixels de cor mais próxima da cor preta são transformados em pixels brancos. Isso transforma a pista que tem fundo preto e faixa guia branca em um fundo branco com a faixa guia preta. Com isso, o quadro está preparado para que o algoritmo possa calcular o ângulo e a distância do AGV em relação à faixa guia. Os algoritmos de cada filtro e avaliações mais profundas sobre o impacto do tamanho do elemento estruturante aplicado podem ser encontrados em Oliveira, Reis e Morandin Junior (2019).

A Figura 17 mostra, para duas situações distintas, da esquerda para a direita, os resultados do filtro de medianas aplicado à imagem na escala RGB, da conversão em escala de cinza, da aplicação da operação morfológica e da binarização final. A última imagem é a imagem de teste, com as marcações de centro, em azul, e de faixa guia no centro, duas linhas em verde, e os valores de ângulo e distância instantâneos e médios, como será discutido na próxima seção, e o valor da taxa de FPS do processamento.

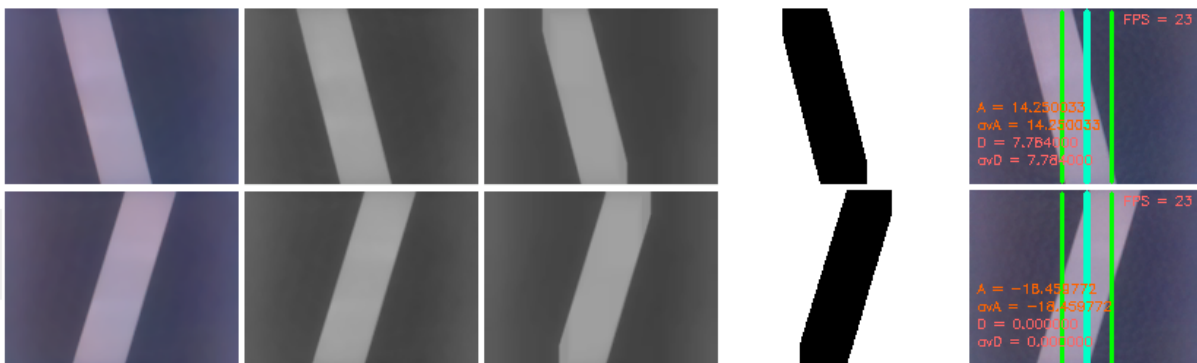


Figura 17 – Exemplos das etapas de processamento de imagem executadas no serviço de processamento de imagem.

Cálculo do ângulo e da distância da faixa guia

Após a aplicação dos filtros, a imagem binarizada é utilizada para o cálculo do ângulo e da distância do AGV em relação à faixa guia. O eixo de referência dos valores de ângulo e distância é mostrado na Figura 18. O eixo (x_{agv}, y_{agv}) é o eixo de referência do veículo, com origem em seu centro geométrico, que coincide com o centro da imagem da câmera.

Valores de ângulo e distância que tendem para o direito do AGV são negativos e valores que tendem para o lado esquerdo do AGV são positivos.

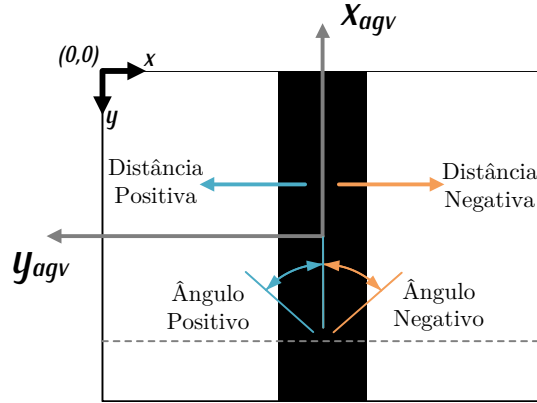


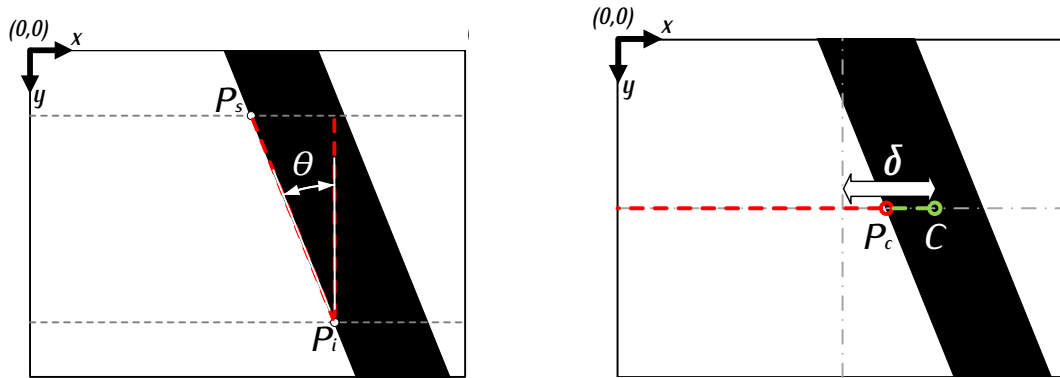
Figura 18 – Eixos de referência do AGV e de referência da imagem e valores de ângulo e distância de acordo com o eixo de referência do AGV.

A Figura 19(a) mostra os pontos necessários para determinação do ângulo da faixa guia em relação ao eixo vertical da imagem. Para isso, são fixadas duas linhas horizontais no quadro, a linha superior e a linha inferior. O algoritmo busca a partir do lado esquerdo, em cada linha, o primeiro pixel preto, encontrando, respectivamente, o ponto superior $P_s = (x_s, y_s)$ e o ponto inferior $P_i = (x_i, y_i)$. Como as linhas são fixadas, a distância no eixo vertical da imagem, o eixo y , é conhecida e constante. O valor em x dos pontos P_s e P_i varia de acordo com a posição da faixa guia. As distâncias entre os pontos em cada eixo formam um triângulo retângulo. Assim, usando a relação trigonométrica da tangente, é possível calcular o ângulo θ entre o eixo vertical e a borda esquerda da faixa guia capturada na imagem, que se considera o mesmo ângulo do centro da faixa. A Equação 4 define o valor de θ , em graus.

$$\theta = \arctan \left(\frac{x_i - x_s}{y_i - y_s} \right) \cdot \frac{360}{\pi} \quad (4)$$

A distância é calculada a partir de uma linha horizontal central na imagem. Da mesma forma, o primeiro pixel preto é buscado, da esquerda para a direita, definindo um ponto $P_c = (x_c, y_c)$. Entretanto, esse pixel representa a borda da faixa. Para determinar a distância δ entre o centro do AGV e o centro C da faixa, o valor é compensado com a distância entre a borda esquerda e o centro da faixa, destacado de verde na Figura 19(b). Dessa forma, a distância é calculada de acordo com a Equação 5, sendo $Ref_{esquerda}$ o valor, em pixels, da localização da borda esquerda da faixa quando o centro da faixa guia coincide com o centro do AGV. Como o valor d_p multiplica a diferença, então δ representa a distância em milímetros.

$$\delta = (Ref_{esquerda} - x_c) \cdot d_p \quad (5)$$



(a) Determinação do ângulo da faixa guia.

(b) Determinação da distância até o centro da faixa guia.

Figura 19 – Descrição gráfica do método para cálculo do ângulo e da distância do AGV em relação à faixa guia.

A Figura 20 apresenta alguns exemplos de cálculo de ângulos e distâncias positivos e negativos. Nas Figuras 20(a) e (b), que representam a medição de ângulo e distância em uma mesma posição do AGV, a distância é negativa, pois a faixa se encontra do lado direito do eixo de referência do AGV, porém o ângulo é positivo, pois a faixa guia está inclinada para a esquerda.

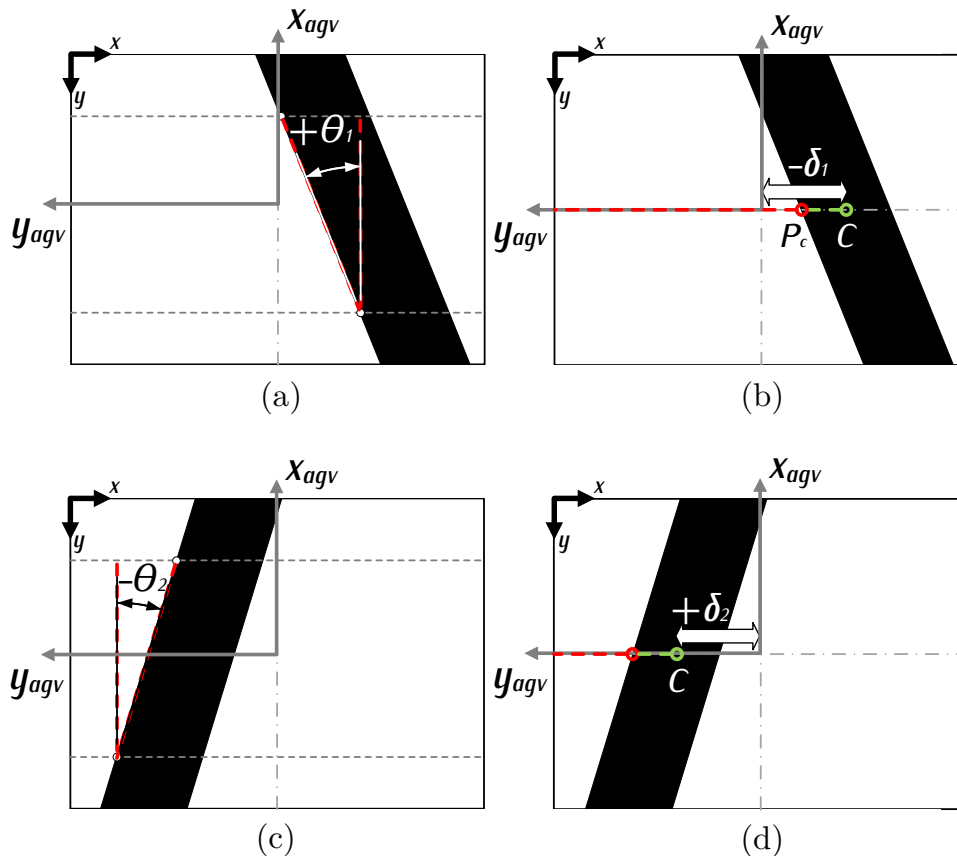


Figura 20 – Exemplos de valores de ângulo e da distância do AGV em relação à faixa guia de acordo com o eixo de referência.

Já nas Figuras 20(c) e (d), a distância é positiva pois o centro da faixa guia está do lado esquerdo do eixo do AGV e o ângulo é negativo, pois a faixa está inclinada para a direita. Essas são duas situações exemplo, é possível que o ângulo e a distância sejam positivas e negativas ao mesmo tempo.

4.2.2.2 Unidades de Medição Inercial

Uma unidade de medição inercial, central de medição inercial ou sistema inercial de navegação, do Inglês *Inertial Measurement Unit* (IMU), é um dispositivo que utiliza, comumente, informações de um giroscópio e um acelerômetro para estimar a posição relativa, velocidade e aceleração de um móvel (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011).

Com o acelerômetro e o giroscópio, uma IMU tem seis graus de liberdade e mede a postura do veículo, ou seja, sua posição (x, y, z) e sua orientação (rolagem, arfagem, guinada). Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011) propõe uma sequência de funcionamento de uma IMU para estimação de aceleração, velocidade e posição de um veículo.

Os dados brutos do giroscópio são integrados para estimar a orientação e os dados brutos do acelerômetro são utilizados para estimar a aceleração instantânea do veículo. Usando a estimativa de orientação, a aceleração é transformada para a referência local de navegação, a referência do próprio veículo. Nesse estado, é possível subtrair o vetor da aceleração da gravidade e a aceleração resultante é integrada para se obter a velocidade. Uma integração subsequente gera uma estimativa de posição. Para a estimativa de velocidade e posição, os valores iniciais devem ser conhecidos, ou tomados como zero, considerando que o veículo partiu do repouso.

Duas características intrínsecas de sensores inerciais são o ruído de medição e o erro de deriva. Principalmente no caso do acelerômetro, as medições são bastante ruidosas dada a sensibilidade do sensor. O erro de deriva é causado, principalmente, pelas integrações sucessivas necessárias para extração das informações. O erro de medição aumenta em uma taxa quadrática em relação à distância percorrida (BRÄUNL, 2022; LEWIS; GE, 2018; SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011).

No AGV estão embarcados dois módulos GY-521, utilizando CIs IMU MPU6050 que integra um acelerômetro e um giroscópio MEMS *Micro-Electro-Mechanical Systems* de três eixos, contando com um processador digital de movimento (*Digital Motion Processor*, DMP) e comunicação I2C. Além disso, o CI utiliza seis conversores A/D de 16 bits para digitalizar cada uma das saídas do acelerômetro e do giroscópio. Há, ainda, um sensor de temperatura embarcado.

A Figura 21 mostra o módulo GY-521 e os eixos e sentidos de giro da MPU6050 e do módulo. A Tabela 4 apresenta as principais características do sensor.

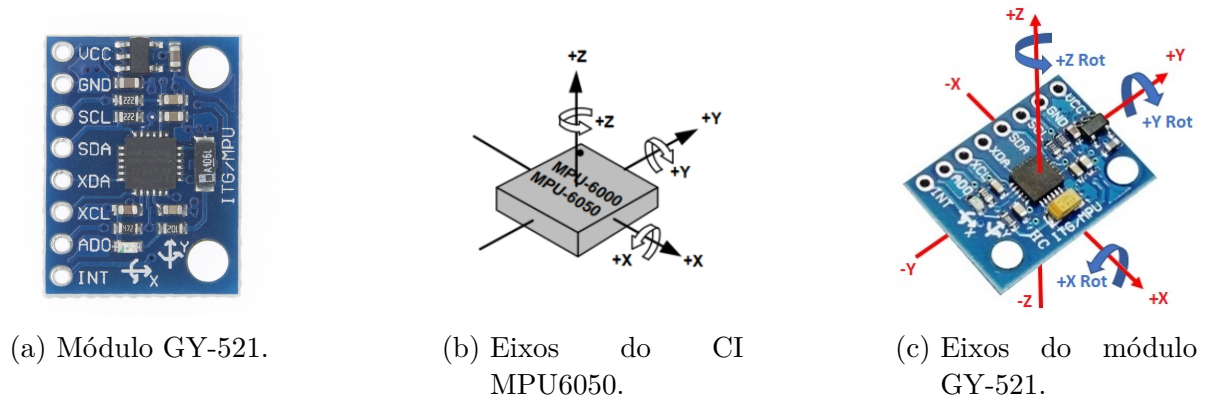


Figura 21 – Módulo GY-521 com CI MPU6050 e eixos e sentidos de giro do sensor.

Tabela 4 – Principais especificações do módulo GY-521 e IMU MPU6050.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de alimentação	5	V
Consumo de corrente (máx)	3,9	mA
Taxa de amostragem do Giroscópio	1 ~ 8	kHz
Taxa de amostragem do Acelerômetro	1	kHz
Escala programáveis do Giroscópio	±250	°/sec
	±500	
	±1000	
	±2000	
Escala programáveis do Acelerômetro	±2	g
	±4	
	±8	
Máxima frequência da comunicação I2C	±16	
	400	kHz

Fonte: Adaptado de (INVENSENSE INC., 2013).

4.2.2.3 Encoders e Módulo de Contador Rápido

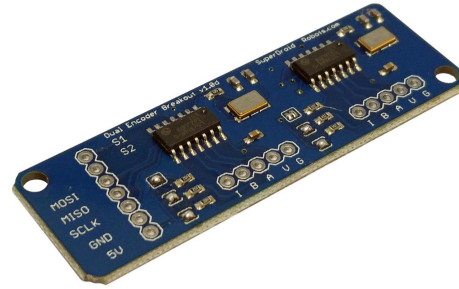
Para medição da velocidade e sentido de giro dos motores, são utilizados encoders incrementais rotativos OMRON E6B2-CWZ6C com resolução de 1800 pulsos por revolução (PPR) (OMRON, 2017). A figura 22(a) mostra o dispositivo e suas principais especificações técnicas são mostradas na Tabela 5.

O encoder gera pulsos conforme a rotação do motor. No AGV AD02, o encoder está acoplado ao eixo do motor, por isso, tem velocidade de rotação superior à do eixo da redução. Para medição da velocidade do motor, a partir da contagem de pulsos em um intervalo de tempo pré-definido é possível calcular a velocidade do motor. O sentido de giro se dá pela diferença de fase entre os pulsos das saídas A e B do encoder, consultar o manual do dispositivo em OMRON (2017) para maiores detalhes.

A Equação 6 mostra o cálculo da velocidade do motor, sendo V a velocidade de rotação em rotações por minuto (RPM), $N = 1/17$ é a taxa de redução da caixa de redução do motor, $Pulsos(n)$ é a contagem atual de pulsos do encoder, $Pulsos(n - 1)$ é a última contagem de pulsos, anterior à iteração atual, PPR é o número de pulsos por revolução



(a) Encoder incremental rotativo.



(b) Módulo com dois contadores rápidos de pulsos do encoder de quadratura.

Figura 22 – Encoder incremental rotativo e módulo usado para leitura dos pulsos dos encoders.

Tabela 5 – Especificações do encoder E6B2-CWZ6C.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de alimentação	5 ~ 24	V
Consumo de corrente	80	mA
Resolução	1800	PPR
Saídas	A, B, Z	-
Diferença de fase entre as saídas	90° ± 45° entre A e B	-
Configuração de saída	Saída NPN em coletor aberto	-
Máxima resposta em frequência	100	kHz
Máxima velocidade permitida	6000	RPM

do encoder utilizado, Δt é o intervalo de amostragem definido, ou seja, o intervalo de tempo em que as contagens de pulsos serão comparadas e $60 \text{ s}/1 \text{ min}$ é a constante para conversão de unidades. Uma velocidade positiva significa uma rotação no sentido horário. Mais detalhes sobre a implementação da leitura dos encoders podem ser consultados no Apêndice B.

$$V = N \frac{[Pulsos(n) - Pulsos(n-1)]}{PPR} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \quad (6)$$

Contador Rápido

A contagem de pulsos é realizada por um circuito dedicado, chamado de contador rápido de pulsos do encoder de quadratura. Esse dispositivo é responsável por contar os pulsos do encoder, armazenar a contagem em seus registradores e enviar para a Raspberry Pi, quando solicitado, utilizando o protocolo de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*).

O módulo utilizado é baseado em dois CIs LS7366R, um contador de quadratura de 32 bits com interface serial, e é mostrado na Figura 22(b). O CI LS7366R tem tensão de alimentação entre 3 e 5,5 V, entretanto, o valor aplicado afeta a frequência de operação. Para 3 V o CI opera em 20 MHz, já com 5 V a frequência é de 40 MHz. O CI conta com registradores de 32 bits para armazenar a contagem de pulsos, que pode ser feita em modo simples ou modo quadratura.

4.2.2.4 Sensor de Corrente

Para medição da corrente dos motores, são empregados sensores de efeito Hall baseados no CI ACS712ELECTR-30A-T, mostrado na Figura 23. O dispositivo é capaz de medir correntes contínuas e alternadas na faixa de $-30 A$ a $30 A$ e consiste em um circuito sensor Hall linear preciso, de baixo desvio (*offset*). A corrente aplicada gera um campo magnético que é detectado pelo sensor Hall integrado e é convertida em uma tensão proporcional (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2020). Dessa forma, é necessário que o sensor esteja em série com o dispositivo cuja corrente se deseja medir. Algumas características elétricas do sensor são mostradas na Tabela 6.

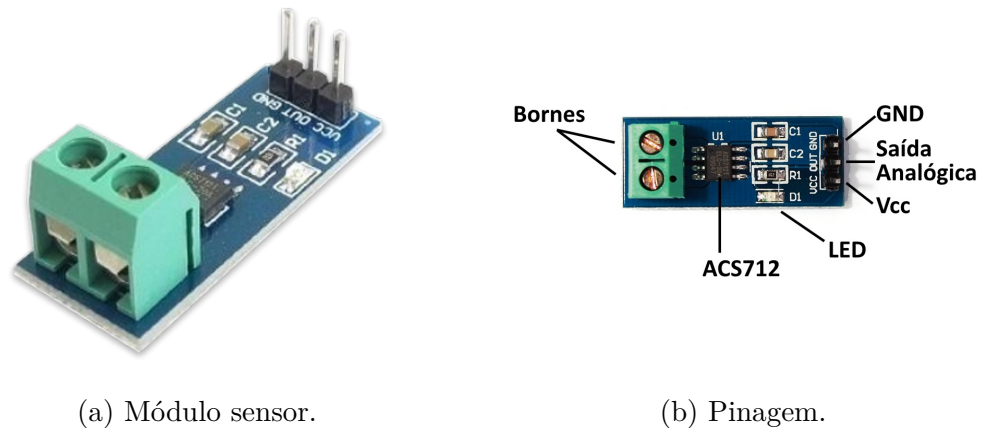
Os pinos do módulo sensor, como mostrado na Figura 23(b), são apenas aqueles para alimentação (VCC e GND), a conexão para medição de corrente (IP+ e IP-), usando um borne com parafusos, e o pino OUT é a saída analógica com a tensão proporcional à corrente medida. Além disso, o módulo dispõe de um LED de indicação do estado ligado ou desligado.

Como o dispositivo mede uma faixa de corrente entre $-30 A$ a $30 A$ e sua tensão de saída varia entre $0 - 5 V$, então, quando não há corrente fluindo pelo circuito medido, o valor da tensão no pino OUT flutua em torno de $2,5 V$. Assim, se a corrente medida é positiva, o valor de tensão de saída aumenta a partir de $2,5 V$. De forma contrária, se a corrente é negativa, a tensão decresce proporcionalmente a partir de $2,5 V$. À medida que a corrente tende a $30 V$, a tensão de saída tende para $5 V$ e à medida que a corrente tende para $-30 V$, a tensão de saída tende para $0 V$. A Equação 7 mostra o cálculo da corrente I equivalente à tensão V do sensor, de acordo com a sensibilidade S do sensor.

$$I = \frac{V - 2,5}{S} \quad (7)$$

O emprego do sensor traz a vantagem de se isolar o circuito que está sendo medido do circuito de controle, no caso específico do AGV AD02, a Raspberry Pi. Entretanto, seu uso torna necessária a utilização de um circuito conversor de sinal analógico para digital (conversor A/D), já que a Raspberry Pi não dispõe de entradas analógicas.

Para a interface entre os sensores de corrente analógicos e a Raspberry Pi é utilizado o conversor A/D ADS1115 de 16 bits de resolução e que trabalha com protocolo de comunicação I2C, mostrado na Figura 24. O conversor dispõe de 4 entradas de tensão analógica multiplexadas, possibilitando a medição de um única entrada (*single-ended*) ou



(a) Módulo sensor.

(b) Pinagem.

Figura 23 – Sensor de corrente por efeito Hall baseado no CI ACS712ELECTR-30A-T.

Tabela 6 – Principais parâmetros do sensor de corrente por efeito Hall ACS712.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de alimentação	5	V
Corrente em operação	13	mA
Faixa de medição de corrente	± 30	A
Sensibilidade	66	mV/A
Não-linearidade (na faixa de ± 30 A)	1,5	%

Fonte: Adaptado de (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2020).

de duas entradas em modo diferencial (TEXAS INSTRUMENTS, 2018). O dispositivo permite uma taxa de conversões por segundo (SPS - *samples per second*) de até 860 e dispõe de um amplificador de ganho programado (PGA - *programmable gain amplifier*) que permite medições de tensão na faixa de ± 256 mV até $\pm 6,144$ V, apesar de não ser indicado que um valor maior do que $V_{CC} + 0,3$ V seja aplicado às entradas. O valor da faixa de medição está relacionado à resolução resultante do ganho definido no PGA, assim, a escala máxima do dispositivo é de $\pm 6,144$ V, com uma resolução de $187,5$ μ V para o bit menos significativo (LSB - *less significant bit*). A comunicação com a Raspberry Pi se dá pelo protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*).

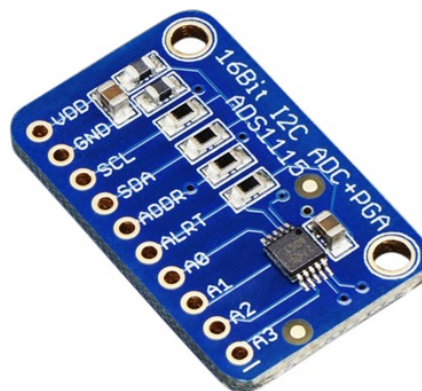


Figura 24 – Conversor analógico-digital 16 bits ADS1115.

4.2.2.5 Motores DC e Módulo de Acionamento

Os atuadores do AGV em questão são dois motores DC com caixa de redução do tipo de roda de coroa e sem fim, mostrados na Figura 25. Os parâmetros do motor são apresentados na Tabela 7. O modelo de motor foi escolhido devido aos parâmetros de torque e velocidade combinados com o do tipo de caixa de redução. Devido à posição da câmera e dos eixos motores centralizados no AGV, o uso das caixas de redução de coroa e sem fim manteve o AGV dentro da proporção de tamanho do projeto.



Figura 25 – Motores DC utilizados como atuadores do AGV AD02.

Tabela 7 – Especificações dos Motores DC utilizados no AGV AD02.

Parâmetro	Valor	Unidade
Razão de Redução	17	-
Tensão de Alimentação Nominal	12	V
Tensão de Alimentação	6 ~ 12	V
Velocidade (Sem carga)	470	RPM
Corrente (Sem carga)	0,3	A
Velocidade (Com carga nominal)	400	RPM
Corrente (Com carga nominal)	1,6	A
Torque Nominal	5	kgf · cm
Potência	20	W
Torque Máximo (Em travamento)	17	kgf.cm
Corrente (Em travamento)	5	A

O módulo de potência para acionamento do motor, ou *driver* de potência, utilizado no projeto é o SparkFun Monster Moto Shield, mostrado na Figura 26. É um módulo baseado no circuito integrado VNH2SP30, que é uma ponte-H para uso automotivo (ST MICROELECTRONICS, 2013). Como é um módulo de acionamento para dois motores, dispõe de dois CIs VNH2SP30 independentes.

As principais características elétricas do módulo são mostradas na Tabela 8. Observe os valores de tensão e corrente da entrada PWM. São valores adequados para o acionamento direto do *driver* pela Raspberry Pi.

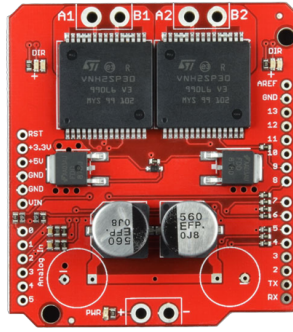


Figura 26 – Módulo de acionamento dos motores DC: SparkFun Monster Moto Shield.

Tabela 8 – Principais parâmetros do Módulo e dos CIs VN12SP30.

	Parâmetro	Valor	Unidade
Monster Moto Shield	Tensão máxima de alimentação	16	V
	Máxima corrente de saída em modo contínuo	14	A
	Máxima corrente de saída	30	A
VN12SP30	Máxima frequência PWM	10	kHz
	Máxima corrente de entrada dos pinos PWM	±10	mA
	Máxima corrente de entrada dos pinos de habilitação das saídas	±10	mA
	Máxima corrente de entrada dos pinos de controle do estado da ponte H	±10	mA
	Tensão de nível baixo dos pinos PWM	1,5	V
	Corrente dos pinos PWM em nível baixo	1	µA
	Tensão de nível alto dos pinos PWM	3,25	V
	Corrente dos pinos PWM em nível alto	10	µA

Fonte: Adaptado de (ST MICROELECTRONICS, 2013).

4.2.3 Arquitetura de Software e Padrão de Desenvolvimento

Segundo Oliveira (2015), as interações entre unidades de software em SOA tem dois conceitos principais: serviço provedor e serviço consumidor. O serviço provedor é aquele que implementa uma funcionalidade que será utilizada por outros sistemas e o serviço consumidor aquele que reusa essas funcionalidades, consumindo um serviço provedor (JOSUTTIS, 2007; OLIVEIRA, 2015).

A partir dessas definições básicas, define-se a nomenclatura utilizada na arquitetura inspirada em SOA implementada no AGV. A unidade mais básica de software será chamada *serviço* e segue o conceito de serviço provedor. De forma a manter sua independência de qualquer outro serviço, a implementação deve estar contida em um mesmo contexto, ter baixo acoplamento e abstrair parte de sua lógica a escondendo dos demais componentes da arquitetura (ERL, 2009). O tamanho do código do serviço e quantas tarefas ele executa depende de seu contexto, porém, é importante que tenha alta coesão e

seja uma descrição de seu contexto específico, não podendo ser dividido em mais serviços, por exemplo.

O conceito de serviço consumidor será representado pelos *softwares consumidores* ou *majoritários*. Softwares majoritários consomem um ou mais serviços, agregando-os de forma a executar tarefas mais complexas e que envolvem diferentes contextos. Na arquitetura proposta, serviços não se comunicam entre si, assim como softwares majoritários também não se comunicam entre si. A interface entre serviços é realizada por um software majoritário. A troca de dados entre softwares majoritários deve ser intermediada por um serviço. Há, ainda, a figura do software coordenador, que é responsável por orquestrar ou escalar a execução dos softwares majoritários (OLIVEIRA, 2015). A camada de coordenação instancia os softwares majoritários e serviços utilizados e controla a execução e o fluxo de dados entre eles.

Essa relação é exemplificada na Figura 27, que mostra as camadas de serviços, de softwares majoritários e o software coordenador. As linhas que ligam os softwares majoritários aos serviços indicam quais serviços cada software consome.

Os serviços implementados na arquitetura proposta são:

Comunicação I2C: implementa o protocolo I2C para comunicação entre os dispositivos I2C e a unidade de controle.

Comunicação SPI: implementa o protocolo SPI para comunicação entre os dispositivos SPI e a unidade de controle.

Armazenamento de Medições: serviço responsável por centralizar a troca de dados entre os softwares majoritários, armazenando as medições dos sensores que podem ser usadas por diferentes softwares majoritários.

Medição de Ângulo e Distância da Faixa: implementa os métodos de processamento de imagem responsáveis por identificar a faixa guia e medir, a cada quadro, o valor do ângulo do AGV em relação à faixa e a distância do centro do AGV em relação ao centro da faixa.

Controle PID: implementa o algoritmo de controle PID de uma variável.

Controle Adaptativo Fuzzy: implementa diferentes os Sistemas de Inferência Fuzzy utilizados no trabalho.

Acionamento do Driver do Motor CC: implementa os métodos de controle do motor CC, habilitando as saídas do driver e controlando o sentido de giro dos motores, e o método de acionamento do motor a partir de uma entrada PWM.

Correção de Movimento: realiza o cálculo de correção da velocidade dos motores de acordo com a entrada de controle e a configuração diferencial do AGV.

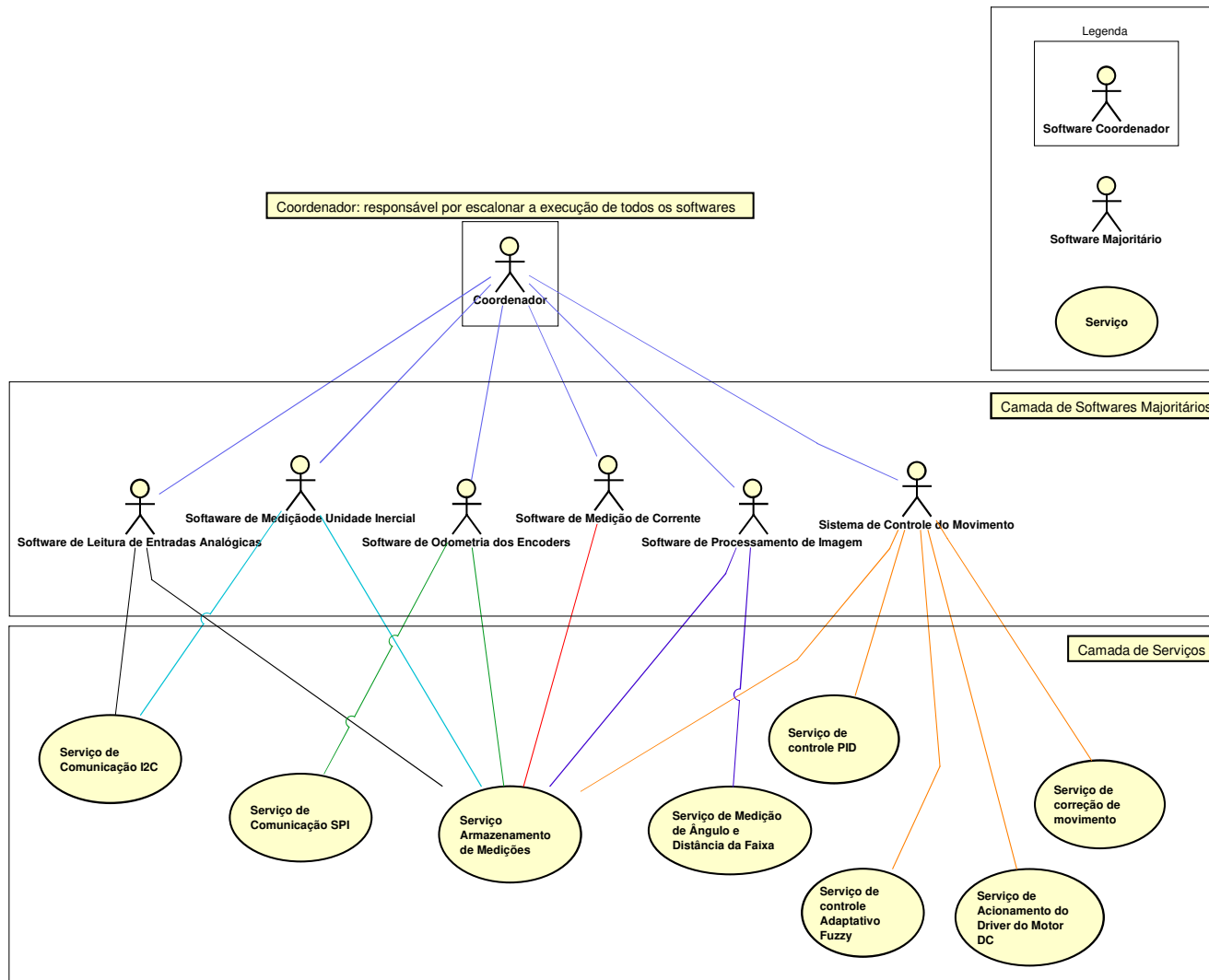


Figura 27 – Arquitetura inspirada em SOA embarcada no AGV mostrando os serviços, softwares majoritários, ou consumidores, e o software coordenador. As linhas indicam a relação entre eles.

Os softwares majoritários da arquitetura são:

Leitura das Entradas Analógicas: comunica-se com o conversor analógico-digital por meio do protocolo I2C e realiza as medições das portas analógicas que medem a tensão gerada pelo sensor de corrente, armazenando-as no serviço de Armazenamento de Medições.

Medição de Unidade Inercial: comunica-se com as IMUs por meio do protocolo I2C e realiza a leitura dos registradores das medições do giroscópio e do acelerômetro de cada dispositivo, armazenando os valores no serviço de Armazenamento de Medições.

Odometria dos Encoders: comunica-se com os dispositivos SPI de contagem rápida dos pulsos do encoder, lendo a contagem armazenada relativa a cada encoder do AGV. Calcula as velocidades dos motores, velocidades tangenciais das rodas, as velocidades linear e angular do AGV e a postura do AGV, ou seja, posição e ângulo de orientação. Os valores calculados são armazenados no serviço de Armazenamento de Medições.

Medição de Corrente: converte os valores de tensão medidos pelo software de Leitura das Entradas Analógicas em valores de corrente. Lê os valores de tensão medidos no serviço de Armazenamento de Medições e, posteriormente à conversão, armazena os valores de corrente convertidos.

Processamento de Imagem: responsável por gerenciar a medição de distância e ângulo e armazenar os valores no serviço de Armazenamento de Medições.

Controle de Movimento: responsável por calcular o valor da ação de controle a partir das medições dos sensores utilizando os serviços de controladores e determinar a correção na velocidade dos motores de forma a atuar no erro do veículo.

Para a implementação dos serviços e softwares majoritários foi utilizado o padrão Fachada. A principal razão da utilização desse padrão na presente proposta é garantir a alta coesão e o baixo acoplamento dos módulos de software implementados, de forma a permitir o reuso em diferentes plataformas compatíveis e facilitar a manutenção e a atualização dos softwares e algoritmos, evitando o retrabalho. Além disso, com esse padrão de implementação os serviços implementados serão modulares, ou seja, para diferentes aplicações, diferentes serviços poderão ser usados em conjunto para executar uma tarefa específica.

Segundo Lasater *et al.* (2006), o componente principal da implementação utilizando o padrão é uma fachada, ou seja, uma interface única que é o único acesso aos subsistemas que compõe o pacote de software. A fachada é uma forma de controlar o acesso aos subsistemas. Também pode ser utilizada para simplificar a utilização de módulo de software,

organizando a chamada de funções específicas, controlando dados e ordem de execução. Dessa forma, o usuário dos serviços não precisa entender a implementação completa de um serviço específico, apenas utilizar os métodos disponíveis na fachada do serviço. Além disso, caso seja necessária a modificação de um método de um determinado serviço, como a mudança de um algoritmo, por exemplo, se as entradas e saídas se mantiverem as mesmas e do mesmo tipo, as implementações que utilizam esse serviço não precisam ser revistas, pois a fachada é a responsável por esse encapsulamento do serviço.

As Figuras 28 e 29 mostram as representações da implementação do padrão Fachada para os serviços e softwares majoritários embarcados no AGV. Na Figura 28, o software consumidor ou majoritário é o usuário do serviço e o acessa por meio da fachada. A fachada do serviço, por sua vez, organiza os métodos, ou até mesmo várias classes, que são necessários para a execução da tarefa específica do serviço. Os métodos podem se relacionar ou depender de outros métodos, o que é representado pelas setas tracejadas. Porém, a fachada limita e controla o acesso do software majoritário, disponibilizando acesso aos métodos estritamente necessários para a execução do serviço, o que é representado pelas setas de linhas sólidas.

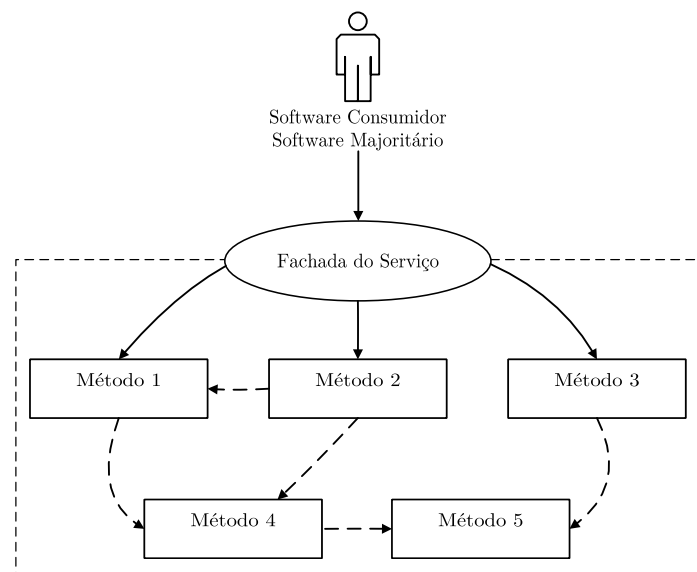


Figura 28 – Ilustração da implementação do padrão Fachada nos módulos de software desenvolvidos para o AGV: representação de um serviço utilizando o padrão Fachada.

Para o caso da fachada de softwares majoritários, mostrado na Figura 29, o consumidor é o software coordenador, de acordo com a SOA. Também de acordo com a arquitetura de software utilizada, a troca de dados entre serviços deve ser, necessariamente, intermediada por um software. Dessa forma, a fachada do software majoritário é responsável por instanciar e ordenar a execução dos serviços utilizados. Assim, do ponto de vista do software coordenador, poucos métodos estão disponíveis, embora diversos serviços estejam sendo orquestrados pelo software majoritário.

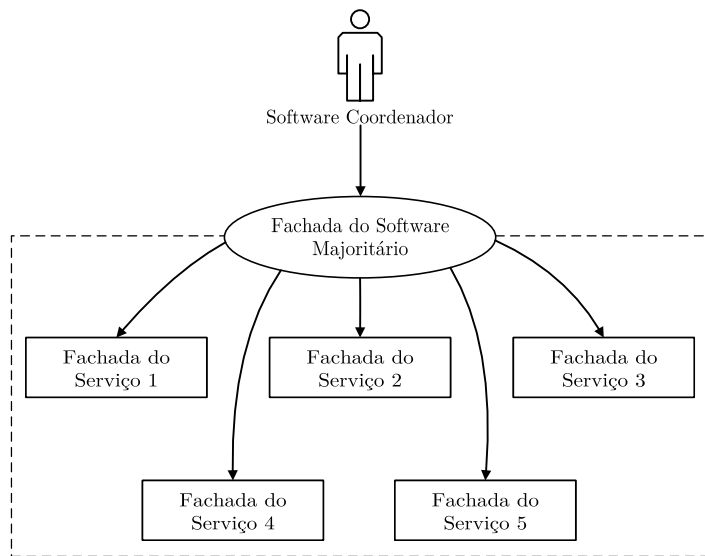


Figura 29 – Ilustração da implementação do padrão Fachada nos módulos de software desenvolvidos para o AGV: representação de um software majoritário utilizando o padrão Fachada.

Como exemplo de implementação, a Figura 30 mostra o diagrama UML de casos de uso do software majoritário de leitura das entradas analógicas. Esse software utiliza dois serviços, de comunicação I2C e de armazenamento de medições, para realizar a leitura das portas analógicas de um conversor A/D externo à Raspberry Pi. O serviço de comunicação I2C é utilizado para habilitar o barramento de comunicação no hardware da Raspberry Pi e conectar e trocar dados com o dispositivo, como mostrados nos casos de uso específicos do serviço.

O software de leitura das entradas analógicas precisa, além disso, informar o endereço do dispositivo a que se deseja conectar, configurar o conversor A/D e ler o valor analógico de uma das entradas. Por fim, o valor de tensão lido é armazenado no serviço de armazenamento de medições, para que possa ser disponibilizado para outros softwares que possam fazer uso dessa informação. O software majoritário em questão acessa métodos dos serviços necessários e necessita de métodos próprios para executar sua função. Por exemplo, a configuração do conversor A/D é importante tanto para o funcionamento do dispositivo quanto para a conversão do dado binário lido para um valor de tensão analógica correspondente.

O diagrama UML de classes mostrado na Figura 31 mostra as classes implementadas do software majoritário. Para realizar as leituras, o software utiliza os serviços, acessando os métodos por meio das suas respectivas fachadas, identificadas como:

❑ `Facade_I2C_Communication_Service; e`

❑ `Facade_Measurements_Storage_Service.`

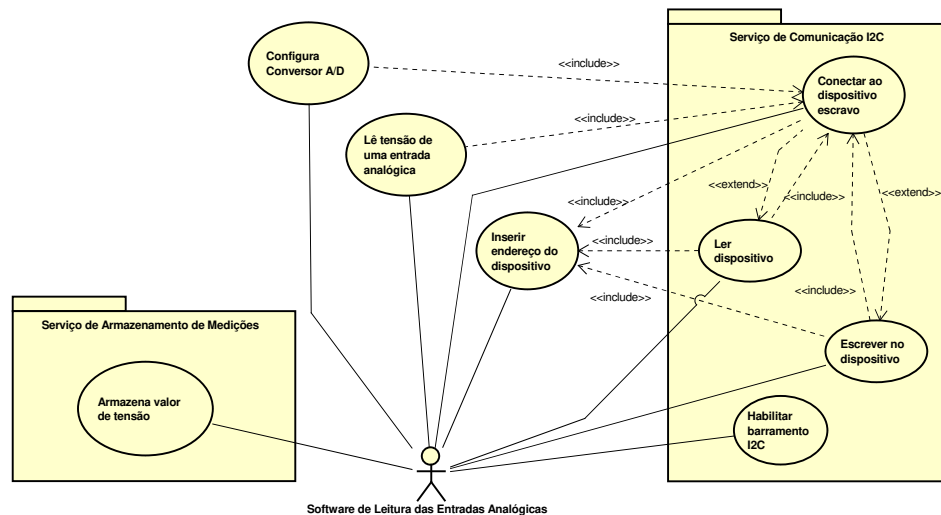


Figura 30 – Diagrama UML de casos de uso do software majoritário de leitura das entradas analógicas.

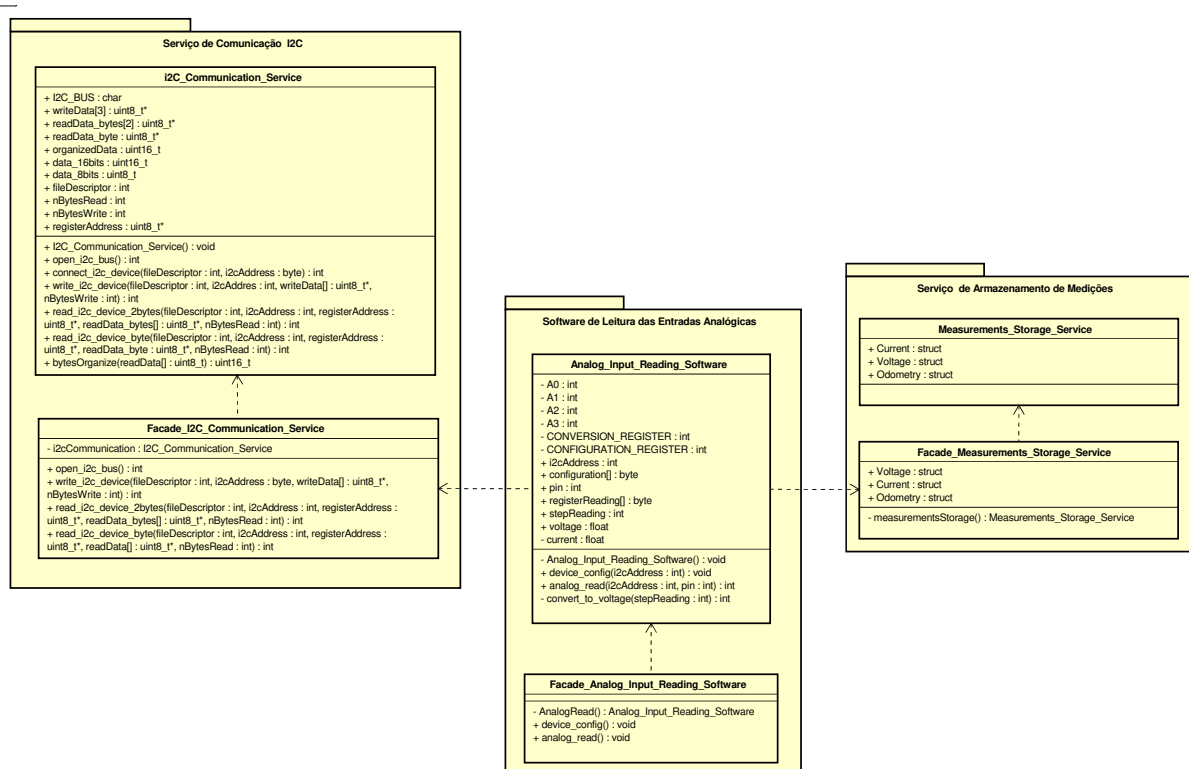


Figura 31 – Diagrama UML de classes do software majoritário de leitura das entradas analógicas.

Observa-se que os métodos na fachada não são necessariamente os mesmos do serviço. O software coordenador, que irá instanciar e ordenar a execução de uma leitura de uma porta analógica, acessará apenas a fachada do software, identificada como `Facade_Analog_Input_Reading_Software`, que simplifica o processo de aquisição de tensão analógica, pois não envolve explicitamente os demais serviços.

A escolha de projeto por SOA e padrão fachada visam a escalabilidade do projeto, o

reaproveitamento e fácil atualização e manutenção do código. Os módulos implementados nesse trabalho englobam apenas o aspecto do controle de posição do AGV, conforme o objetivo de aumento da exatidão na posição do veículo. Entretanto, outros serviços e softwares majoritários são necessários ao funcionamento do veículo e serão implementados em trabalhos futuros, como, por exemplo, o software responsável pela segurança do veículo e do ambiente ao seu redor, um sistema de interface homem-máquina (IHM) e um sistema de comunicação com o ambiente externo, para controle, telemetria e despacho do veículo.

4.3 Projeto dos Sistemas de Controle do AGV

A implementação do sistema de controle foi gradual. Após a implementação dos serviços e softwares majoritários para leitura dos sensores e controle do AGV, foram realizados testes que identificaram um tempo de ciclo de 80 ms, gerando uma aquisição de quadros da câmera à uma taxa entre 11 e 12 FPS.

Esse tempo de ciclo envolve a leitura e o processamento da imagem da câmera, leitura dos contadores rápidos dos pulsos de encoder e cálculos da odometria, leitura das tensões analógicas dos sensores de corrente e a conversão do valor de tensão lido em um valor de corrente relacionado e a leitura das IMUs. Ainda seguindo essa estrutura e com esse tempo de ciclo, os primeiros controladores PID foram testados, identificando a dificuldade na sintonia dos ganhos para estabilizar o sistema. Nesse momento também foi identificado que a velocidade do veículo necessitaria ser baixa para possibilitar o controle.

Esse tempo de ciclo mostrou que o tempo de processamento é um gargalo do sistema de controle embarcado com o hardware definido. Assim, o projeto seguiu com três diretrizes: o uso de processamento em paralelo, ou *multithreading*, a implementação gradual dos sistemas, ou seja, apenas comprometendo o processamento com um sensor quando este estiver efetivamente envolvido na malha de controle, e a utilização básica dos dados dos sensores, ou seja, com o processamento mais simples possível, se for necessário algum.

O hardware utilizado dispõe de quatro núcleos. Dessa forma, o processamento dos sensores foi alocado a cada um dos núcleos. Para isso, foi utilizada a biblioteca `thread.h`. Porém, devido à característica de troca de dados da SOA e dos protocolos de comunicação dos sensores, nem todos os serviços e softwares majoritários podem ser executados em paralelo. De forma a garantir a consistência dos dados, o processamento de imagem e a leitura das IMUs operam em núcleos separados, porém o processamento de cada um dos softwares majoritários trava a execução de outras tarefas pelo processador até o fim de seu processamento.

Os softwares de leitura das entradas analógicas para medição da corrente dos motores e leitura dos contadores de pulsos dos encoder são executados em paralelo, em núcleos distintos, conforme a disponibilidade. Por fim, o software coordenador é o responsável por escalar a leitura dos sensores disparando a execução das threads em um intervalo de

tempo determinado. Os compromisso específico com cada um dos sensores será discutido na implementação de cada controlador fuzzy.

Com isso, os sistemas de controle implementados operaram com tempo de ciclo entre 20 ms e 50 ms, sendo o menor tempo para os sistemas contendo apenas a câmera como sensor e o maior tempo com todos os sensores embarcados sendo utilizados. No Capítulo 5, os valores de operação serão detalhados para cada configuração dos controladores ensaiados.

4.3.1 Comando dos Motores

Na malha de controle da proposta, apresentada na Figura 6, há um bloco chamado comando dos motores, responsável por, a partir da ação de controle $u(t)$ definir as tensões, Figura 6(a), ou velocidades, Figura 6(b), aplicadas a cada motor de tração do AGV diferencial.

Esse bloco tem como entradas a velocidade linear de referência, ou seja, a velocidade que o AGV deve se locomover em seu eixo x , e a ação de controle. A partir desses valores, o bloco define o comando dos motores usando a Equação 8 para valores de comando PWM da ponte H, para ilustração. Nessa equação, a velocidade linear de referência, representada por u_{ref} , é a velocidade base do AGV e será a mesma para os dois motores se a ação de controle $u(t)$ for nula. Para valores da ação de controle diferentes de zero, haverá diferença na atuação dos motores, fazendo com que o AGV faça curvas para corrigir sua posição. Caso $u_d > u_e$, o AGV fará uma curva para a esquerda e, caso $u_d < u_e$, uma curva para direita.

$$\begin{cases} u_d = u_{ref} - u(t) \\ u_e = u_{ref} + u(t) \end{cases} \quad (8)$$

O Algoritmo 3 no Apêndice B mostra o pseudo-código do serviço implementado na SOA para realizar esse cálculo.

4.3.2 Controle Fuzzy-Adaptativo em Cascata

O desenvolvimento de cada um dos sistemas de inferência fuzzy teve duas etapas. A primeira etapa foi o desenvolvimento do sistema de inferência utilizando a *toolbox Fuzzy Logic Designer* do MATLAB. Nessa ferramenta foram elaboradas as funções de pertinência das entradas e da saída e a base de regras, ainda com valores e parâmetros não ajustados, seguindo apenas o conhecimento do especialista e o comportamento esperado do controle.

A segunda etapa foi a conversão do sistema de inferência do MATLAB para um serviço em C/C++ a ser embarcado no AGV. Utilizando uma ferramenta online para conversão, os arquivos `.fis` foram convertidos para linguagem C. Então, os sistemas de inferência

fuzzy foram compilados como bibliotecas estáticas de forma que o serviço de controle adaptativo fuzzy possa utilizar cada sistema de inferência como um método para calcular a ação de controle. Entretanto, para se definir a versão final dessas bibliotecas estáticas foram necessários ensaios e testes para a sintonia dos parâmetros dos FIS. Do mesmo modo, para cada novo sistema de controle implementado, ou seja, a combinação gradual de diferentes FIS, foram realizados ensaios para sintonia dos parâmetros, quando necessário.

Todos os sistemas de inferência desenvolvidos são do tipo Mamdani, a agregação das regras pelo operador binário E é do tipo mínimo, a composição das regras para a saída é do tipo máximo e a defuzzificação utiliza o método do centroide. Todas as regras criadas utilizam apenas o operador E. As funções de pertinência utilizadas são triangulares ou trapezoidais. Optou-se pela associação em cascata dos sistemas de inferência de forma a reduzir o número de parâmetros para sintonia, uma vez que se todas as variáveis entradas propostas fossem usadas em apenas um sistema de inferência, o número de regras e funções de pertinência a serem ajustados seria muito maior, com crescimento exponencial.

4.3.2.1 Sistema de Inferência Fuzzy 1 - FIS1

O primeiro sistema de inferência, FIS 1, tem como entradas a distância medida em relação à faixa guia, δ , e o ângulo de orientação Θ do AGV, também medido em relação à linha. Observe que são os valores efetivamente medidos e não os valores de erro, o que mudaria o sinal das medidas, pois a referência é zero tanto para distância quanto para ângulo. A Figura 32 mostra as funções de pertinência de entradas e saída do sistema.

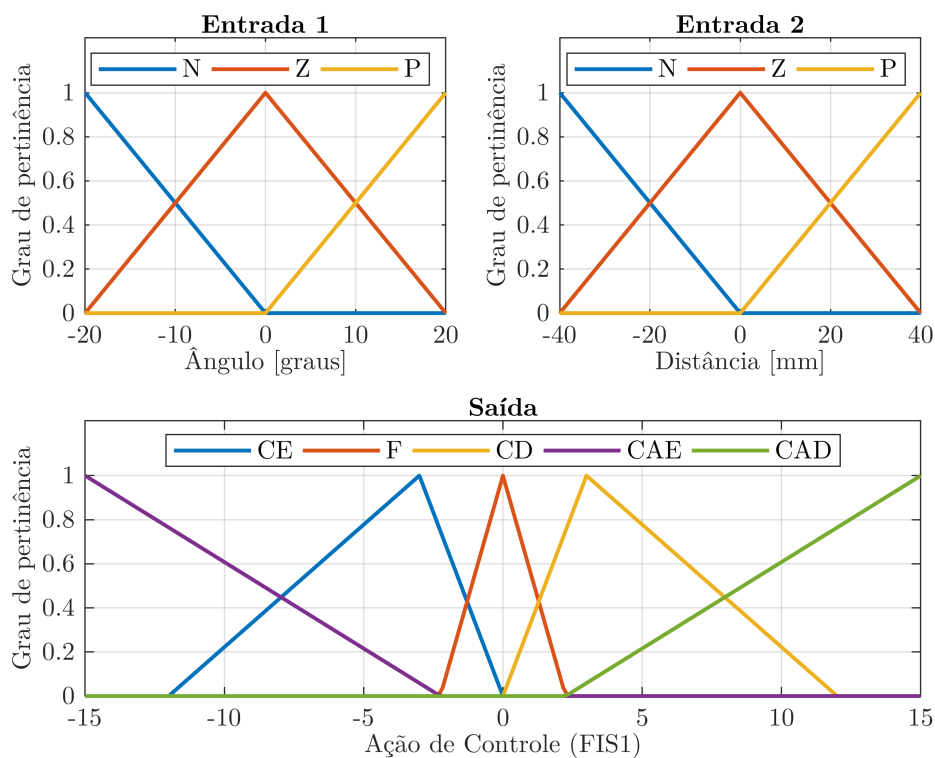


Figura 32 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 1.

As funções de pertinência das entradas têm granularidade três, representando valores negativos (N), nulos (Z) e positivos (P). O universo de discurso para o ângulo θ é fixado em -20 a $+20$ graus. Para a distância δ o universo é de -40 a $+40$ mm. Como saída, o FIS1 possui a ação de controle, com granularidade 5 e com as funções de pertinência representando curva acentuada para esquerda (CAE), curva para esquerda (CE), frente (F), curva para direita (CD) e curva acentuada para direita (CAD). O universo de discurso da saída é de -15 a $+15$. A Figura 33 mostra a superfície de controle do sistema.

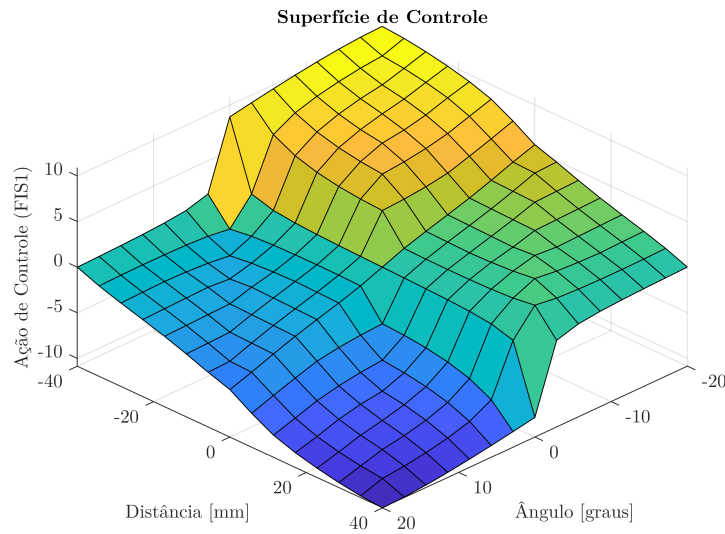


Figura 33 – Superfície de controle do sistema de inferência fuzzy 1.

A base de regras do sistema de inferência é mostrada na Tabela 9. A partir do sinal das medições como mostrado na Figura 18, a base de regras traduz o comportamento esperado do AGV, que deve corrigir seu posicionamento de acordo com os valores medidos.

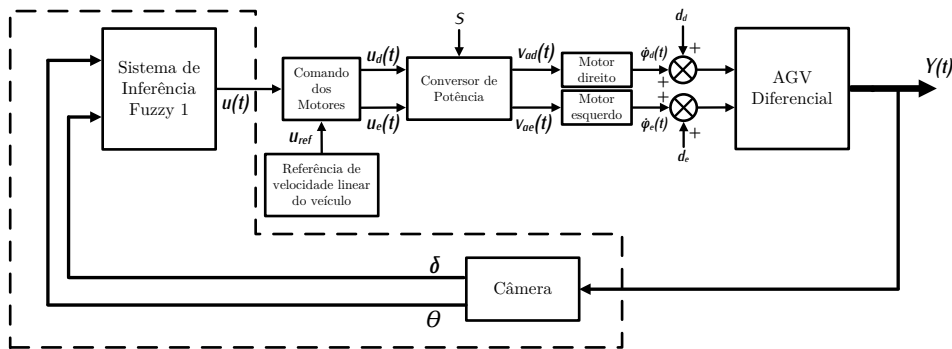
Tabela 9 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 1.

Regra	Antecedentes		Consequente	Peso
	Ângulo	Distância	Saída de Controle	
1	N	N	CAD	1
2	N	Z	CD	0,25
3	N	P	F	1
4	Z	N	CAD	0,01
5	Z	Z	F	1
6	Z	P	CAE	0,01
7	P	N	F	,
8	P	Z	CE	0,25
9	P	P	CAE	1

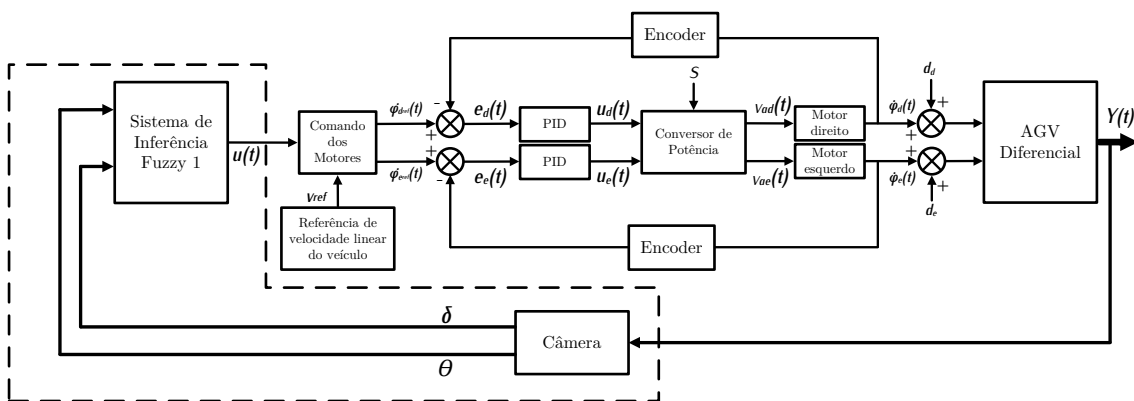
Se o AGV mede um valor de distância negativo, isso significa que ele está à esquerda da faixa guia, devendo corrigir seu posicionamento fazendo uma curva para direita. Em caso oposto, com a distância positiva, o AGV está à direita da faixa e deve corrigir o posicionamento com uma curva para a esquerda.

Para o ângulo, se o AGV mede um valor negativo, isso significa que a frente do veículo tende a apontar para o lado esquerdo da faixa guia. Nesse caso, a correção da posição é realizada por uma curva para direita. Analogamente, um valor de ângulo positivo medido indica uma orientação para a esquerda e a correção do movimento será efetuada por uma curva à direita. Os valores finais das funções de pertinência, das regras e dos pesos do consequente foram definidos após ensaios com o AGV sem e com carga e representam o melhor resultado encontrado utilizando-se a sintonia empírica. O mesmo vale para os sistemas de inferência posteriores.

O FIS1 foi aplicado ao sistema de controle sem e com a malha de controle de velocidade dos motores usando os encoders, gerando, respectivamente, as malhas de controle das Figuras 34(a) e 34(b). O Apêndice C mostra as variações de sintonia dos FIS implementados para cada conjunto de ensaios e combinações de sensores.



(a) Malha de controle de posição e ângulo com FIS1.



(b) Malha de controle de posição e ângulo com FIS1 e controle PID de velocidade dos motores.

Figura 34 – Detalhamento das malhas de controle fuzzy implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.

4.3.2.2 Sistema de Inferência Fuzzy 2 - FIS2

De forma a considerar a tendência de variação das grandezas de entrada do FIS1, o segundo sistema de inferência, FIS2, têm como entradas a ação de controle do FIS1 e as derivadas do ângulo Θ , ou seja, a velocidade angular $\dot{\Theta}$, e da distância δ . O objetivo desse sistema é identificar a tendência de variação das variáveis e agir para diminuir essa variação.

As funções de pertinência das entradas e da saída são mostradas na Figura 35. Para esse caso, o AGV ainda utiliza apenas a câmera como sensor dos sistemas de inferência fuzzy. As granularidades de entrada e saída se mantêm as mesmas, assim como a representação em linguagem natural das funções de pertinência. O universo de discurso das entradas é de -15 a $+15$ para a ação de controle do FIS1, de $\pm 100^{circ}/s$ para a velocidade angular $\dot{\Theta}$ e de -100 a $+100$ mm/s para taxa de variação da distância δ . A saída de controle do FIS2 pode assumir valores entre -35 e $+35$.

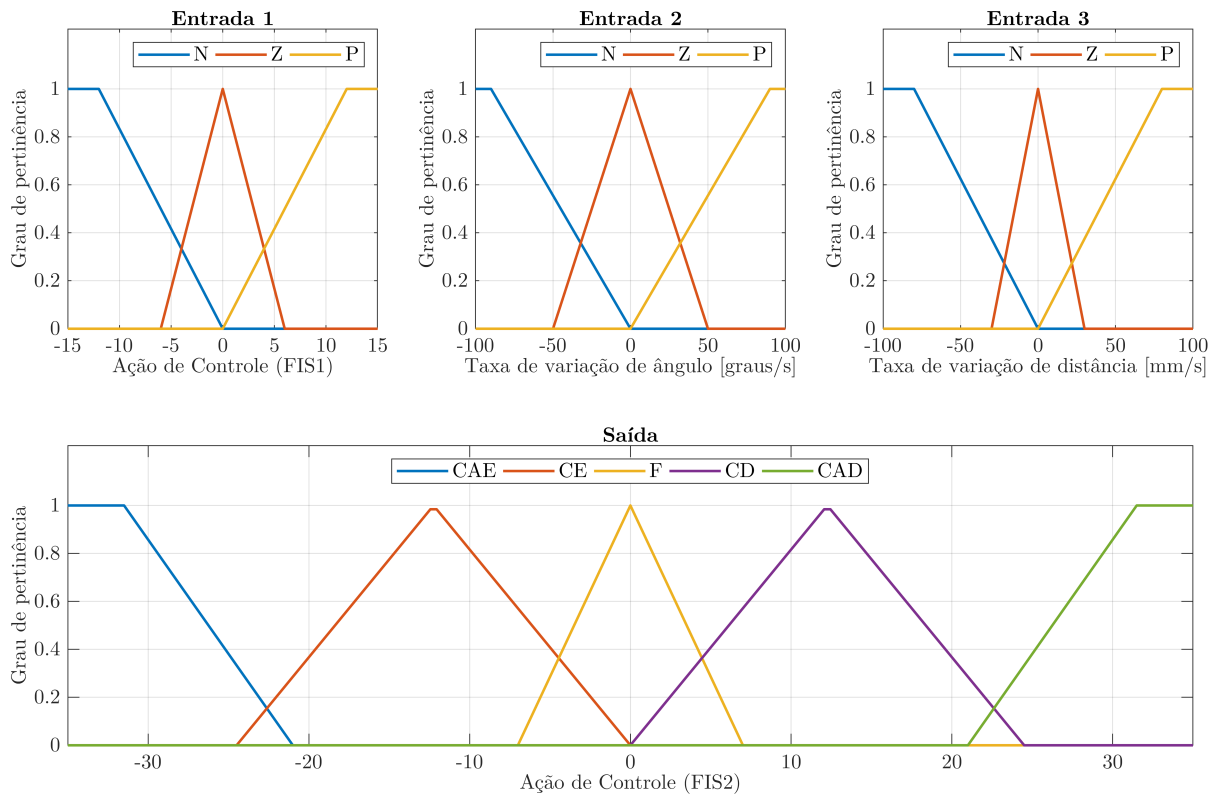


Figura 35 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 2.

A medição do ângulo e da distância utilizando processamento de imagem pode gerar ruídos de medição com erros aleatórios devido à ruídos na imagem, como o *motion blur*. Assim, a taxa de variação da medição direta das variáveis pode ser bastante ruidosa e apresentar variações grandes que não traduzem o comportamento do veículo, mas sim medições errôneas do sensor com um intervalo de tempo curto. O serviço de medição de ângulo e distância da faixa conta com um método de média móvel dos valores medidos de forma que o efeito da medição de valores discrepantes por erro do sensor sejam mitigados.

Assim, a cada nova medição da câmera, o serviço atualiza o serviço de armazenamento de medições com os valores de ângulo e distância medidos e a média móvel das últimas nove amostras. Esses valores filtrados são usados nas entradas do FIS2, de forma a evitar variações bruscas causadas por erros de medição.

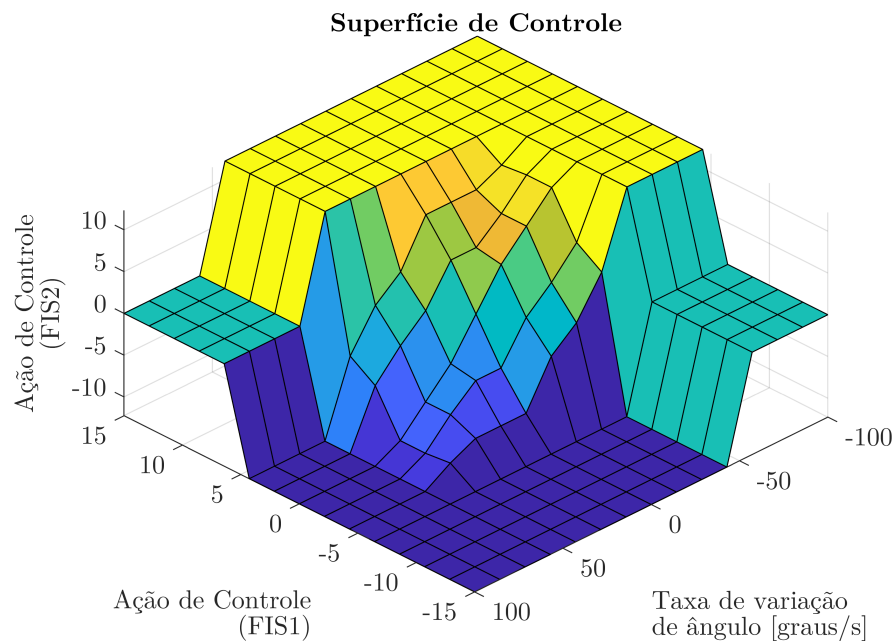
Curvas à esquerda causam uma taxa de variação negativa de ângulo, pois o ângulo está tendendo a ficar negativo, enquanto causa uma taxa de variação positiva de distância, pois a distância entre o centro da imagem e o centro da faixa tende a ficar positiva. De maneira oposta, curvas à direita geram taxa de variação positiva para o ângulo medido e negativa para a distância.

Considerando esse comportamento, a Tabela 10 mostra a base de regras para o FIS2. O número de regras foi definido de forma a minimizar os estados avaliados e tornar mais simples a descrição do comportamento. Por exemplo, sendo a ação de controle FIS1 negativa, o AGV está desenvolvendo uma curva para a esquerda. Nessa condição, a taxa de variação do ângulo pode ser apenas positiva ou nula e a taxa de variação de distância pode assumir apenas valores negativos ou ser nula. Assim, a base de regras foi reduzida para avaliar apenas os casos possíveis.

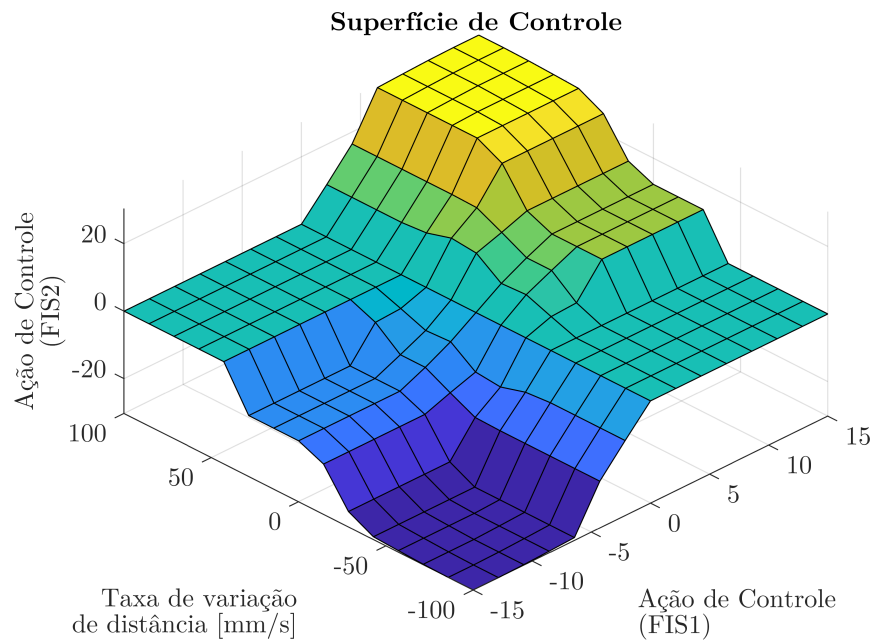
Regra	Ação de controle FIS1	Antecedentes		Consequente	
		Taxa de variação de ângulo	Taxa de variação de distância	Saída de Controle	Peso
1	N	Z	N	CAE	1
2	N	Z	Z	CE	1
3	N	P	N	CAE	1
4	N	P	Z	CE	1
5	Z	N	N	F	1
6	Z	N	Z	CD	1
7	Z	N	P	CD	1
8	Z	Z	N	F	1
9	Z	Z	Z	F	1
10	Z	Z	P	F	1
11	Z	P	N	CE	1
12	Z	P	Z	CE	1
13	Z	P	P	F	1
14	P	N	Z	CD	1
15	P	N	P	CAD	1
16	P	Z	Z	CD	1
17	P	Z	P	CAD	1

Tabela 10 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 2.

As superfícies de controle do sistema resultantes da sintonia são mostradas na Figura 36. As Figuras 37(a) e 37(b) mostram as malhas de controle implementadas no AGV.

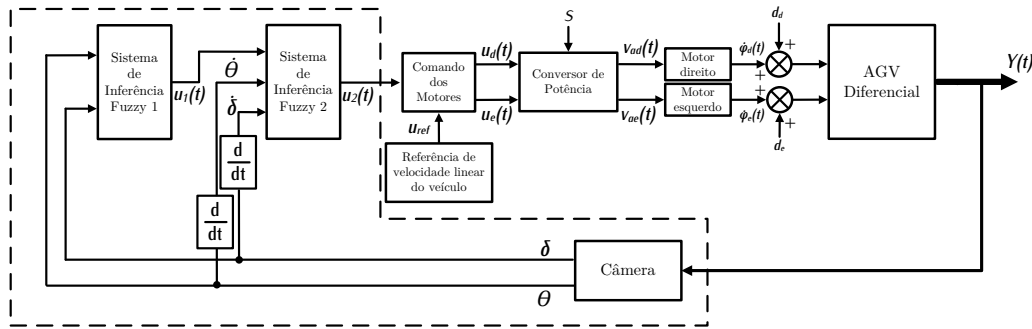


- (a) Superfície de controle considerando como entradas a ação de controle de FIS1 e a taxa de variação de ângulo, sendo a taxa de variação de distância fixada em zero.

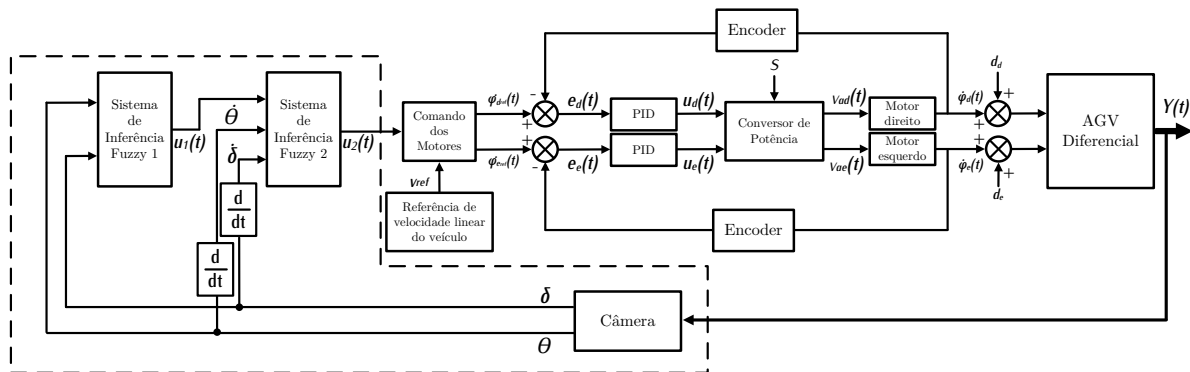


- (b) Superfície de controle considerando como entradas a ação de controle de FIS1 e a taxa de variação de distância, sendo a taxa de variação de ângulo fixada em zero.

Figura 36 – Superfície de controle do sistema de inferência fuzzy 2.



(a) Malha de controle com FIS1 e FIS2 em cascata.



(b) Malha de controle com FIS1 e FIS2 e controle PID de velocidade dos motores.

Figura 37 – Detalhamento das malhas de controle fuzzy implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.

4.3.2.3 Sistema de Inferência Fuzzy 3 - FIS3

O sistema de inferência 3, FIS3, foi idealizado para considerar as medições das centrais inerciais frontal e traseira do AGV de forma a ser mais uma fonte de informação do movimento do veículo. Entretanto, com a capacidade de processamento restrita, o uso dos dados da IMUs foi limitado. Usualmente, o processamento dos sinais de uma IMU envolvem algum tipo de filtro, como o o filtro complementar ou filtro de Kalman para estimação dos valores de posição e ângulos do móvel. No caso de duas centrais inerciais, o mais indicado seria a aplicação de fusão sensorial para extrair melhores informações do movimento do AGV. Entretanto, com o atual hardware embarcado no AGV esse tipo de implementação não é possível sem comprometer a estabilidade do sistema em relação à aquisição e processamento de imagem. Assim, os dados brutos dos sensores foram avaliados de forma a, ainda assim, utilizar as medições das IMUs no controle do AGV.

Primeiramente, avaliou-se utilizar as medidas dos acelerômetros do eixo y para estimar a aceleração angular do veículo como aplicados nos trabalhos de Chee (2005) e Sivashankar e Ulsoy (1998) aplicados à veículos automotores. A localização do par de acelerômetros utilizados em ambos os trabalhos é similar à posição das centrais inerciais no AGV. Entretanto, com o AGV controlado sob a faixa guia com baixa velocidade, mesmo com

oscilações, o sinal medido pelos acelerômetros era muito baixo, tendo uma relação sinal-ruído baixa. Ou seja, as medições da aceleração no eixo y são deterioradas por um ruído com potência muito próxima à potência do sinal medido.

Dessa forma, as medições brutas do giroscópio da velocidade de giro ao redor do eixo z foram utilizadas. Essa medição é a velocidade angular $\dot{\Theta}$ do AGV, em graus por segundo. Para avaliar essas medições, os valores foram comparados com a velocidade angular medida a partir da medição do ângulo da câmera, ou seja, a taxa de variação de ângulo usada no FIS2.

A partir dessa comparação, verificou-se que o valor medido pelos giroscópios tem consistência com o movimento do veículo a partir do comportamento do ângulo da câmera, que são similares. Porém, a partir das análises dos dados, identificou-se que a câmera apresenta um atraso de cerca de dez amostras. Ou seja, o quadro processado pelo software de processamento de imagem tem um tempo de atraso que varia de acordo com a taxa de aquisição dos quadros. Assim, quanto menor o FPS da câmera, maior é o atraso.

Os gráficos da Figura 38 mostram as medições da velocidade angular medida pela câmera e pelas centrais inerciais e o gráfico das velocidades dos motores do AGV, para identificar o momento em que o veículo entra em movimento.

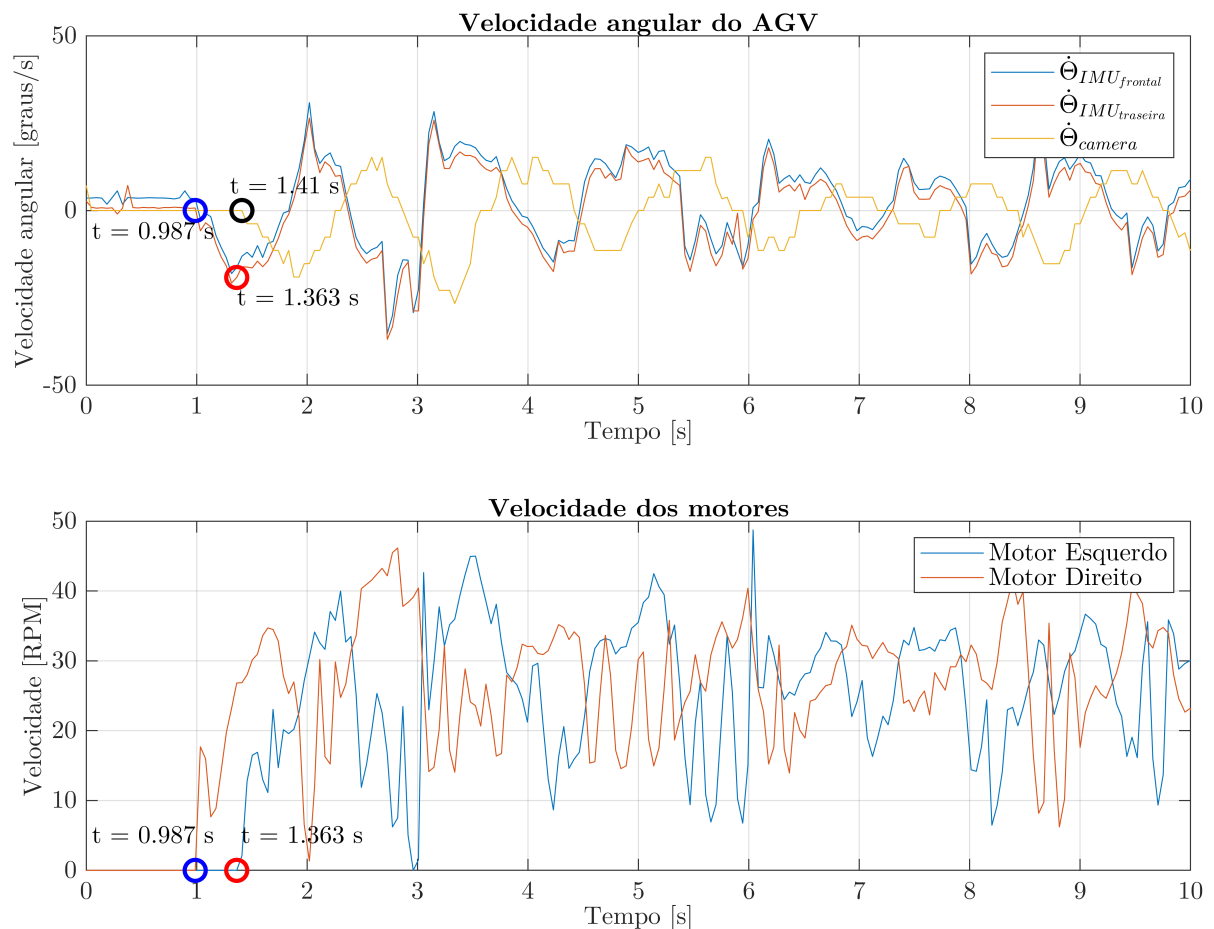


Figura 38 – Comparação do início do movimento do AGV medido pelas IMUs e pelo processamento de imagem.

O sentido de giro positivo da velocidade angular medida pelo giroscópio, como mostrado na Figura 21(c), é contrário ao sentido da velocidade angular medida pela câmera pela escolha dos eixos do AGV. Por isso, no gráfico, a polaridade das velocidades angulares $\dot{\Theta}_{IMU_{frontal}}$ e $\dot{\Theta}_{IMU_{traseira}}$ medidas pelas IMUs é invertida, para facilitar a comparação com a velocidade angular $\dot{\Theta}_{camera}$ medida pela câmera.

Analisando o gráfico pode-se observar que no instante $t = 0.987$ s, destacado com um círculo azul nos gráficos, tem-se a última amostra antes do início do movimento do motor direito. A partir desse instante as centrais inerciais detectam uma velocidade angular negativa. Como explicado na seção 4.3.2.2, uma curva à esquerda, realizada com a aceleração do motor direito, gera uma velocidade angular $\dot{\Theta}$ negativa. A partir do instante $t = 1.363$ s, destacado com um círculo vermelho nos gráficos, o motor esquerdo acelera, fazendo com que a velocidade angular mude de sentido, tendendo à um valor positivo. Apenas no instante $t = 1.41$ s, destacado com um círculo preto no gráfico da velocidade angular, a medição da câmera reage ao movimento do AGV.

O cálculo da diferencial numérica causa o atraso de apenas uma amostra, logo, por característica intrínseca ao sensor, há o atraso de até dez amostras para o processamento de imagem. Para o sistema de controle que gerou os gráficos, significando um tempo morto de, aproximadamente, 0,4 s à uma taxa de 22 FPS. Além disso, pode-se observar que as velocidades angulares medidas tem o mesmo perfil e ordem de grandeza, porém, deslocadas no tempo.

Para verificar se esse atraso era causado pela SOA ou pelo padrão de desenvolvimento de software, um teste rápido foi realizado com uma câmera USB conectada à Raspberry. O serviço foi adaptado para o novo tamanho de quadro da câmera, embora os parâmetros para determinação da constante d_p não tenham sido modificados.

Apesar de produzir um FPS bem menor do que a câmera embarcada no AGV, a câmera USB, utilizando a mesma arquitetura, não apresentou atraso na aquisição dos quadros. A seção trabalhos futuros discute propostas futuras para esse caso. O atraso de 10 amostras à uma taxa de aquisição de 20 fps gera um atraso de 0,5 s. Para um sistema de controle como o AGV, é um atraso muito significativo.

De forma a seguir com o plano de experimentos, mesmo com a detecção no atraso de amostragem da câmera, o FIS3 foi desenvolvido tendo com entradas a ação de controle do FIS2 e as velocidades angulares $\dot{\Theta}_{IMU_{frontal}}$ e $\dot{\Theta}_{IMU_{traseira}}$. A Figura 39 mostra as funções de pertinência das entradas e da saída, mantendo o padrão de granularidade dos FIS anteriores. O universo de discurso das entradas é de -25 a $+25$ para a ação de controle do FIS2, de $\pm 100^\circ/s$ para as velocidades angulares medidas pelos giroscópios. A saída de controle do FIS3 pode assumir valores entre -30 e $+30$.

Considerando que a velocidade angular medida pelos giroscópios possui sentido contrário ao da velocidade angular medida pela câmera, a base de regras é mostrada na Tabela 11.

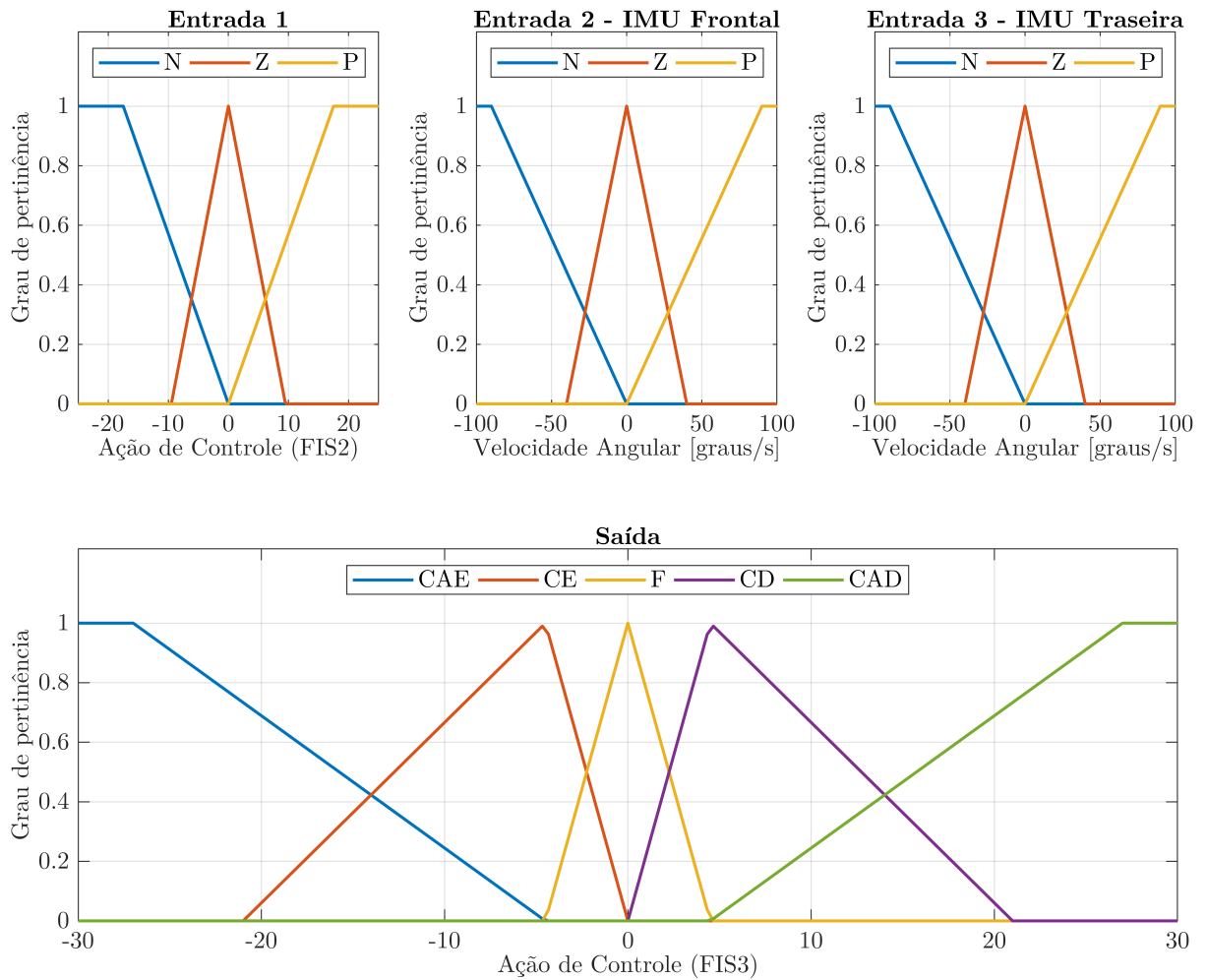


Figura 39 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 3.

Regra	Ação de controle FIS2	Antecedentes		Consequente	
		Velocidade angular $\dot{\theta}_{IMU_{frontal}}$	Velocidade angular $\dot{\theta}_{IMU_{traseira}}$	Saída de Controle	Peso
1	N	N	N	CAE	1
2	N	Z	Z	CAE	1
3	N	P	P	CE	1
4	Z	N	N	CAE	1
5	Z	Z	Z	F	1
6	Z	P	P	CAD	1
7	P	N	N	CD	1
8	P	Z	Z	CAD	1
9	P	P	P	CAD	1

Tabela 11 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 3.

Para reduzir o número de regras, apenas os casos possíveis foram considerados, ou seja, ambos os giroscópios medem velocidades angulares no mesmo sentido. Com isso, nove regras foram usadas. As regras foram definidas de forma que, caso o AGV esteja fazendo uma curva para esquerda, ou seja, a ação de controle FIS2 tem valor negativo, e os giroscópios medem velocidade angular negativa, indicando curva para direita, então o AGV deve fazer uma curva acentuada para a esquerda. Nessa situação, a ação de controle já indicou a curva para esquerda, mas o AGV ainda está tendendo para direita, por isso a correção acentuada.

Após a identificação do atraso da câmera, as regras 4 e 6 se mostraram importantes para a manutenção do AGV na linha. Como os giroscópios percebem o movimento antes da câmera, as regras diminuem a chance do veículo sair da linha, mesmo que cause um pouco mais de oscilação em seu movimento. As Figuras 40(a) e (b) mostram as malhas de controle implementadas no AGV utilizando FIS3. As superfícies de controle não serão apresentadas por depender de vários valores da terceira variável de entrada para mostrar o comportamento, necessitando, assim, de muitos gráficos.

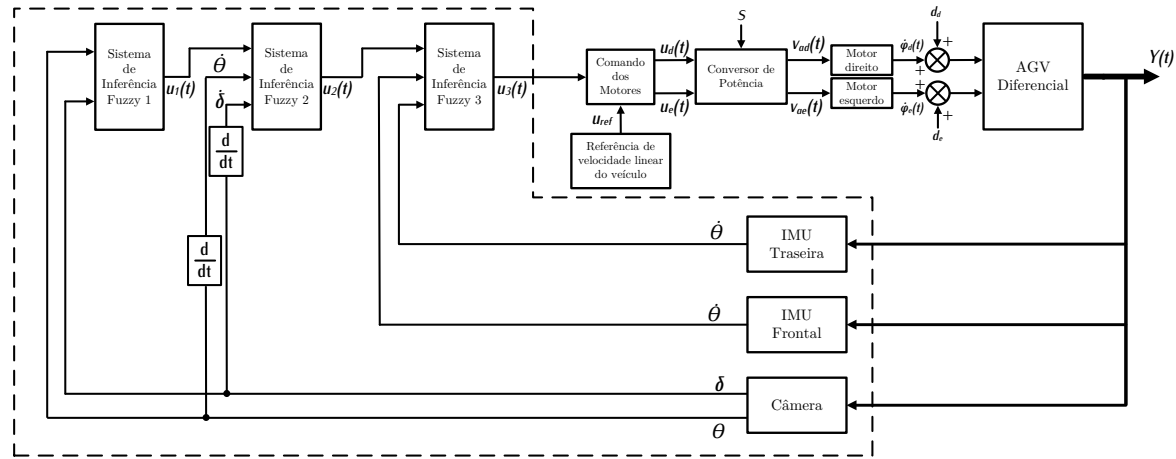
4.3.2.4 Sistema de Inferência Fuzzy 4 - FIS4

Por fim, de modo a utilizar os sensores de corrente dos motores CC para adaptar a operação do AGV sob diferentes condições de carga, o último sistema de inferência fuzzy, FIS4, é apresentado. As entradas são a ação de controle do FIS3 e as correntes dos motor esquerdo i_{ae} e do motor direito i_{ad} .

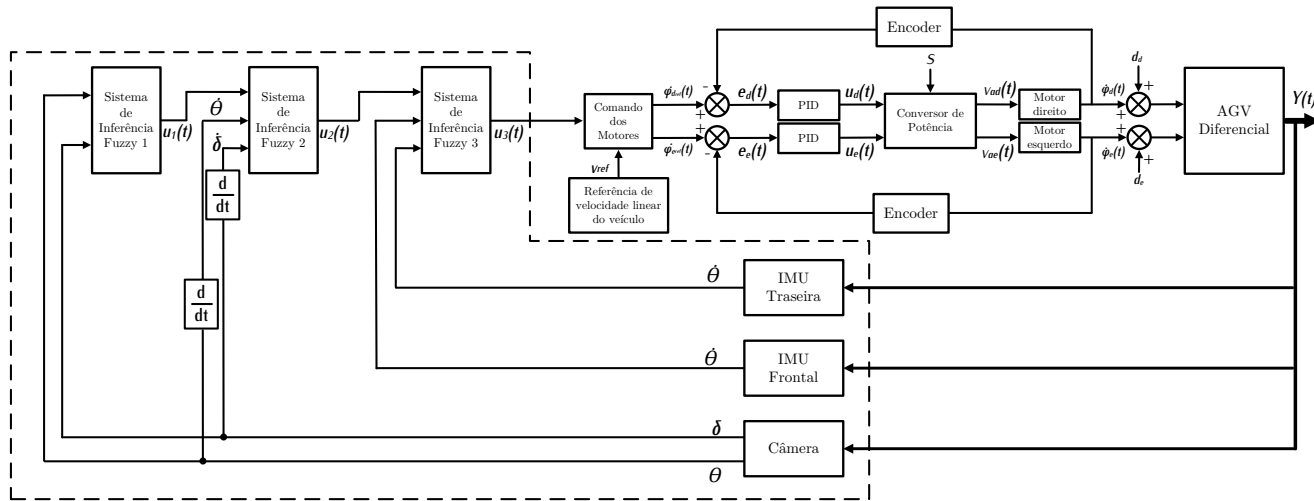
Os sensores de corrente utilizados são ruidosos, necessitando de uma rotina de calibração de zero a cada início de execução do AGV. Além disso, o próprio funcionamento do AGV, com a variação da tensão nos motores para a variação das velocidades das rodas, causa variação na corrente medida e até mesmo inversão no sentido de corrente pela descarga dos enrolamentos. Por isso, para minimizar a variabilidade das medições de corrente foi implementado uma média quadrática móvel (MRMS - moving root mean square), Equação 9. A corrente $i_{MRMS}[j]$ calculada na amostra j é a raiz quadrada da média da soma dos quadrados das últimas N amostras de corrente medidas. Para os ensaios, $N = 100$.

$$i_{MRMS}[j] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=j-N+1}^j i^2[k]} \quad (9)$$

Para cada nível de carga, os motores operam em uma faixa de corrente que foi modelada na entrada fuzzy. Para diferentes condições de carga, o objetivo do FIS4 é adaptar a resposta do AGV. Os intervalos de corrente dos motores para cada carga partiram do definido no conjunto de dados em (REIS; COUTO; MORANDIN JUNIOR, 2022b) e foram ajustados ao longo dos para melhorar o desempenho do controlador.



(a) Malha de controle com FIS1, FIS2 e FIS3 em cascata.



(b) Malha de controle com FIS1, FIS2 e FIS3 e controle PID de velocidade dos motores.

Figura 40 – Detalhamento das malhas de controle fuzzy implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.

Sabendo como as correntes dos motores serão tratadas, para o sistema de controle ajustado usando todos os FIS definidos, as entradas e a saída são definidas como se segue. A granularidade das funções de pertinência das três entradas é cinco. Para entrada ação de controle do FIS3 as funções de pertinência representam valores muito negativos (MN), negativos (N), nulos (Z), positivos (P) e muito positivos (MP), com universo de discurso entre -15 a $+15$.

As entradas de corrente têm funções de pertinência que representam as condições de carga: AGV sem carga (C0), com carga de 1 kg (C1), 2 kg (C2), 3 kg (C3), 4 kg (C4). Para o motor esquerdo, o universo de discurso está entre $0,2$ e 2 A . Já o motor direito tem seu intervalo definido entre $0,4$ e 2 A .

As funções de pertinência da saída tem granularidade sete, representando curva muito acentuada à esquerda (CMAE), curva acentuada à esquerda (CAE), curva à esquerda (CE), frente (F), curva à direita (CD), curva acentuada à direita (CAD) e curva muito acentuada à direita (CMAD). O universo de discurso da ação de controle FIS4 foi definido entre -20 e 20 . A Figura 41 mostra as funções de pertinência das entradas e da saída do FIS4.

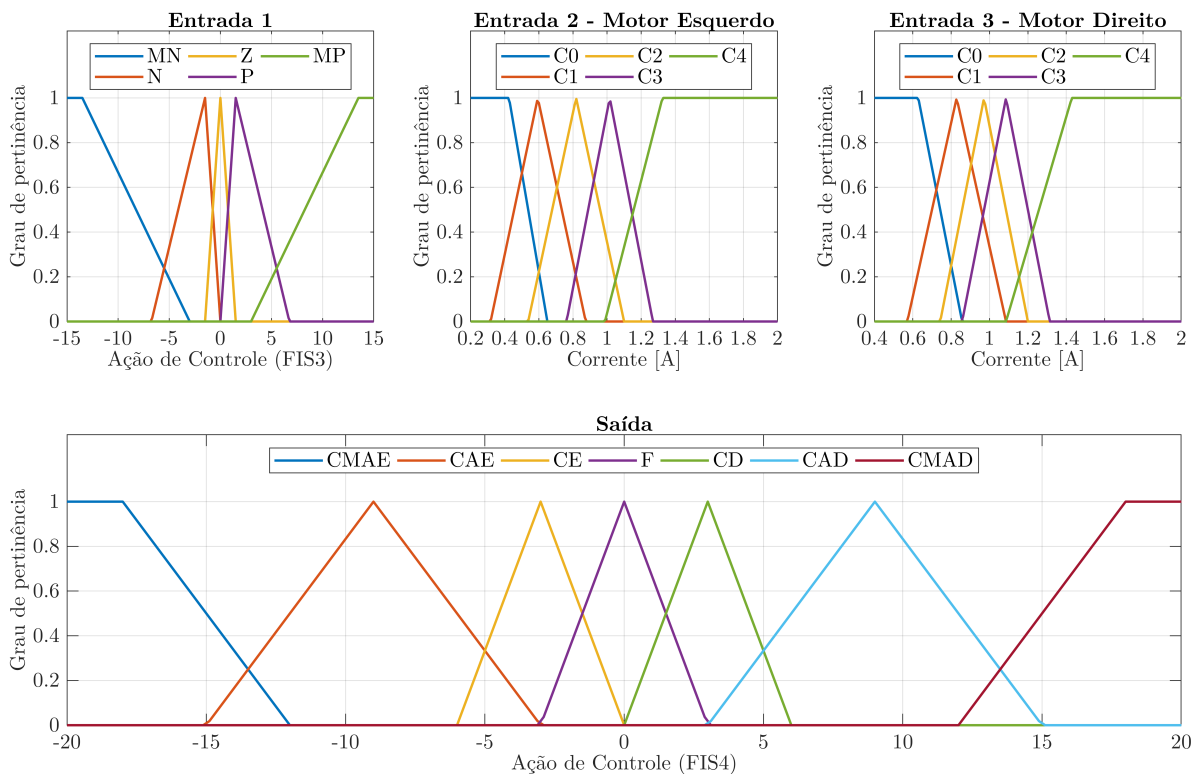


Figura 41 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 4.

A Tabela 11 mostra a base de regras do FIS4. A formação das regras foi determinada de forma que conforme a carga aumenta, a ação de controle também deve aumentar para compensar a variação. Os valores finais foram definidos após ensaios com todas as faixas de carga e representam o sistema com melhor resultado em todas as faixas de carga, em

que o AGV permanece na pista, mesmo com movimento oscilatório, e consegue fazer todas as curvas da pista.

O último sistema de controle foi desenvolvido usando todos os sensores embarcados no veículo. A Figura 42 mostra a malha completa da proposta do presente trabalho.

Regra	Ação de Controle FIS3	Antecedentes		Consequente	
		Corrente do Motor Esquerdo	Corrente do Motor Direito	Saída de Controle	Peso
1	MN	C0	C0	CAE	1
2	MN	C1	C1	CAE	1
3	MN	C2	C2	CMAE	1
4	MN	C3	C3	CMAE	1
5	MN	C4	C4	CMAE	1
6	N	C0	C0	CE	1
7	N	C1	C1	CE	1
8	N	C2	C2	CE	1
9	N	C3	C3	CAE	1
10	N	C4	C4	CAE	1
11	Z	C0	C0	F	1
12	Z	C1	C1	F	1
13	Z	C2	C2	F	1
14	Z	C3	C3	F	1
15	Z	C4	C4	F	1
16	P	C0	C0	CD	1
17	P	C1	C1	CD	1
18	P	C2	C2	CD	1
19	P	C3	C3	CAD	1
20	P	C4	C4	CAD	1
21	MP	C0	C0	CAD	1
22	MP	C1	C1	CAD	1
23	MP	C2	C2	CMAD	1
24	MP	C3	C3	CMAD	1
25	MP	C4	C4	CMAD	1

Tabela 12 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 4.

4.3.3 Controle PID

Para comparação de resultados, foram desenvolvidos e ensaiados sistemas de controle de posição do AGV utilizando controladores PID. O serviço de controle PID implementa o controlador descrito pela Equação 27 mostrada no Apêndice A. Com o objetivo de ser um controlador genérico, o serviço tem como entradas o valor do erro da variável em questão, as constantes do controlador, K_p , T_i e T_d , e o período de amostragem T . O Algoritmo 1, também no Apêndice A, mostra o pseudo-código do serviço implementado.

Inicialmente, foram implementadas malhas de controle individuais para os controladores PID de distância e ângulo de orientação. Foram realizados ensaios para a sintonia dos controladores utilizando os métodos de Ziegler-Nichols.

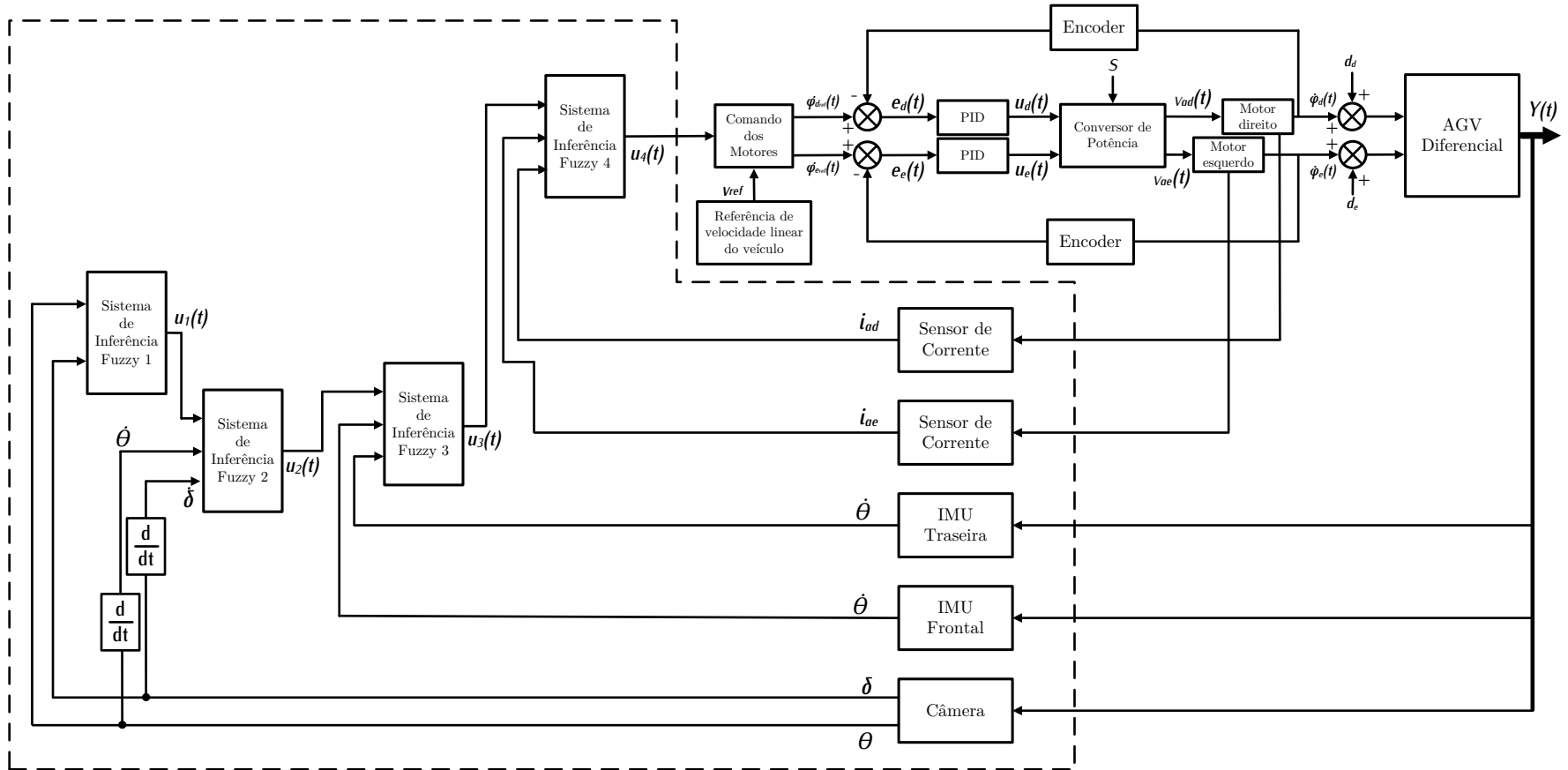
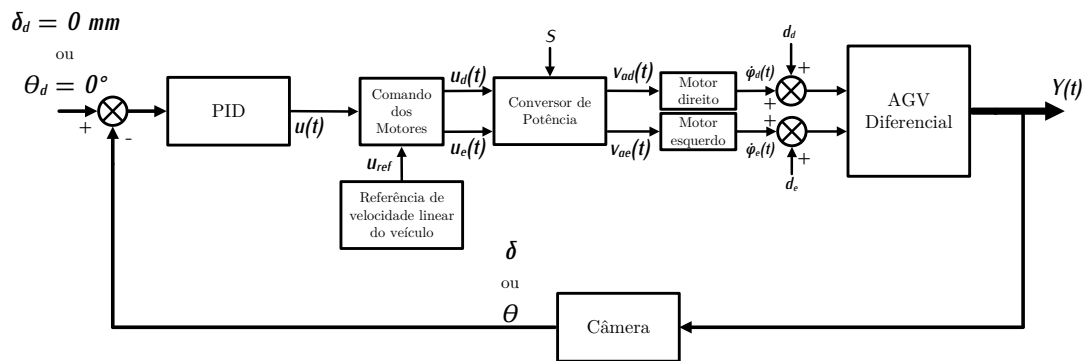


Figura 42 – Detalhamento das malhas de controle fuzzy. Malha de controle com FIS1, FIS2, FIS3 e FIS 4 com controle PID de velocidade dos motores.

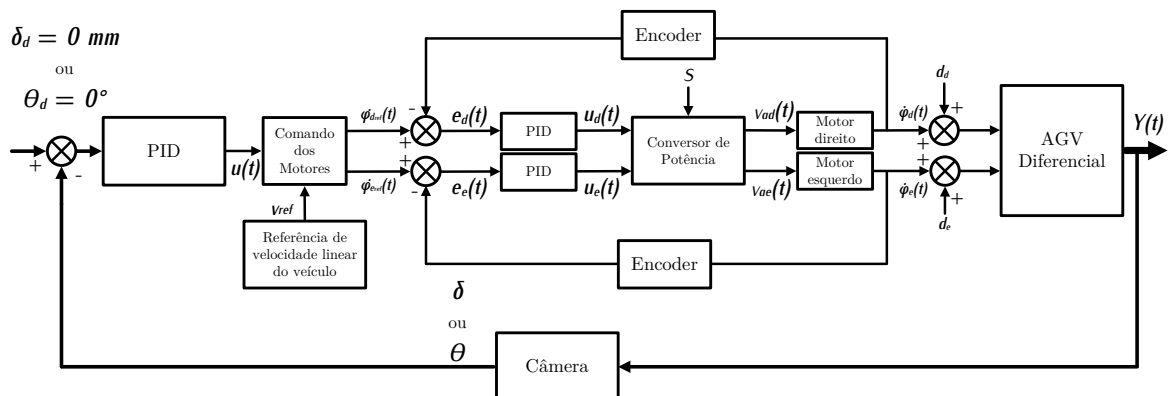
Entretanto o sistema de controle do AGV seguidor de linha não apresenta a curva em formato de S característica dada a aplicação de um degrau de entrada em malha aberta para a aplicação do primeiro método de Ziegler-Nichols. Isso se dá pois o AGV não é um sistema aproximado à um sistema de primeira ordem e por ser instável em malha aberta, ou seja, se um degrau de tensão for aplicado aos motores em malha aberta, o AGV não seguirá a linha.

Quanto ao segundo método, apenas o ganho proporcional é capaz de estabilizar o sistema de controle de forma a encontrar um valor de ganho crítico que leva o sistema à estabilidade marginal, quando é possível determinar o período crítico de uma oscilação sustentada. Por isso, não são aplicáveis os métodos de sintonia de Ziegler-Nichols.

As malhas de controle inicialmente implementadas são mostradas na Figura 43, em que somente uma variável, distância ou ângulo de orientação, são controladas. Entretanto, apenas o controle de distância se mostrou estável, uma vez que o controle apenas do ângulo de orientação do veículo não o manteve na faixa ao longo do percurso.



(a) Malha de controle de posição ou ângulo com controlador PID.



(b) Malha de controle de posição ou ângulo com controlador PID e controle PID de velocidade dos motores.

Figura 43 – Detalhamento das malhas de controle PID implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.

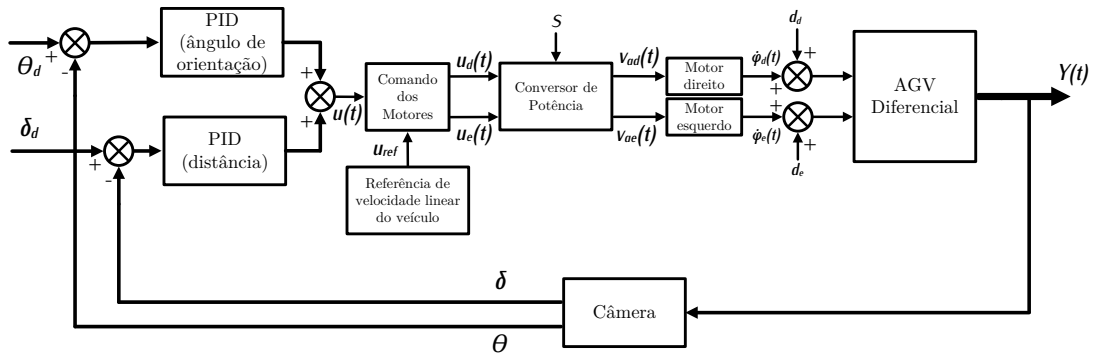
De forma a melhorar os resultados, foram implementados controladores que somam as ações de controle de ângulo e distância, como o implementado em Oliveira, Reis e Morandin Junior (2019) para o AGV com rodas mecanum. É possível encontrar na literatura trabalhos com abordagem similar. Li e Tsang (2007) propõem um sistema de controle de posição para um servo motor que se baseia na ação paralela e concorrente de um controlador PID e um subcontrolador de banda morta integrativo. Os controladores têm a mesma entrada de erro e suas ações de controle são somadas. Os resultados mostram que o subcontrolador melhora o desempenho do sistema durante o transiente, enquanto o controlador PID tem maior influência na resposta do sistema em regime permanente. Os autores reforçam, ainda, que uma das vantagens desse sistema é a possibilidade do projeto e ajuste dos controladores de forma separada.

Sangtungtong e Dadthuyawat (2013) exploram a adaptação da ponderação entre as ações de controle de forma a melhorar o desempenho do sistema de controle usando dois controladores PID convencionais em paralelo. Cada controlador PID é sintonizado usando um método diferente. Um sistema supervisor é responsável por adaptar os pesos de cada saída de controle de forma que a ação de controle somada aplicada a planta obtenha menor erro em regime permanente e menor tempo de acomodação do que o uso individual de cada controlador. E Ibrahim e Sharkawy (2018) apresentam um sistema de controle híbrido com PID adaptativo para o controle de posição de manipuladores robóticos. Para cada junta, dois controladores PID foram desenvolvidos. O primeiro PID é responsável por lidar com a dinâmica das juntas e o segundo com o movimento dos elos rígidos. Uma lei de controle adicional é utilizada para calcular o ângulos das juntas de acordo com a entrada de referência de ângulos dos elos. As saídas de controle são somadas, mas a ação de controle ainda é multiplicada por um parâmetro adaptativo, que varia de acordo com os erros de posição das juntas e dos elos.

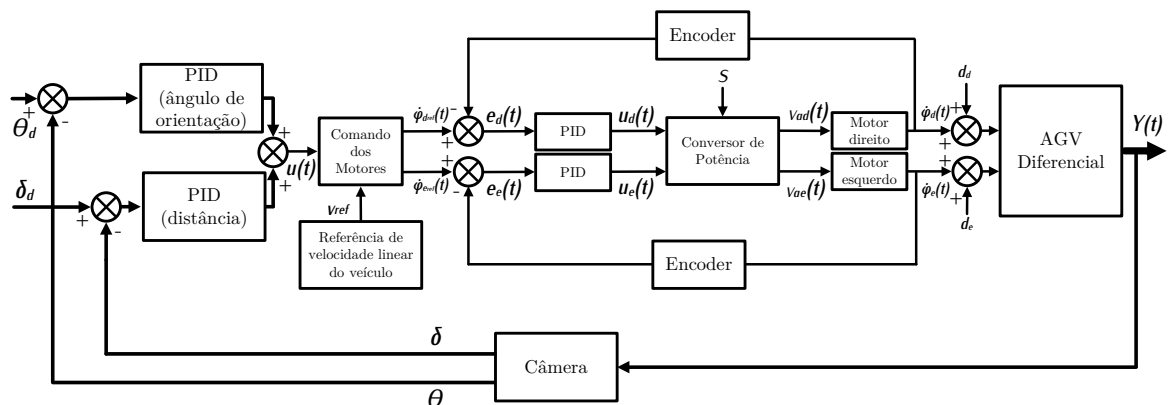
Dessa forma, para comparação de desempenho, foram ensaiadas quatro configurações de sistema de controle com PID: controle de posição a partir da medição da distância com e sem controle de velocidade dos motores e controle de posição a partir da medição de ângulo e distância com e sem controle de velocidade dos motores, da Figura 44. Os controladores foram sintonizados empiricamente, a partir de ensaios e observações do comportamento do veículo. Também foram usados indicadores quantitativos, citados no Capítulo 2 para determinar as constantes. No Capítulo 5 serão apresentados os ensaios dos controladores e os indicadores de cada uma das configurações implementadas.

4.4 Considerações Finais

Para testar as hipóteses da tese, a montagem do AGV diferencial foi necessária. O capítulo apresentou os sensores embarcados que serão utilizados para investigar quais sensores necessários e seus impactos para o domínio do problema (OE1) e examinar qual



(a) Malha de controle de ângulo e posição com controladores PID concorrentes.



(b) Malha de controle de ângulo e posição com controladores PID concorrentes e controle PID de velocidade dos motores.

Figura 44 – Detalhamento das malhas de controle PID concorrente implementadas nas versões sem controle de velocidade dos motores e com controle PID de velocidade dos motores.

a relação desses sensores com a estratégia de controle proposta (OE2). Ao embarcar os softwares para leitura dos sensores e controle do AGV, foi detectado um gargalo no processamento. Por isso, a implementação dos sistemas de controle se deu de forma gradual, ou seja, os sensores só são utilizados se forem entradas para o sistema de controle. Dessa forma, sua leitura não compromete o tempo de ciclo do sistema de controle desnecessariamente. Essa característica coloca uma nova perspectiva nas análises relativas ao objetivo específico (OE3). Além de avaliar o uso de mais variáveis do AGV e a diversidade das grandezas consideradas no controle de posição, a perspectiva de comprometimento no tempo de processamento será também examinada. Foram apresentados, ainda, os controladores propostos para testar a hipótese principal da tese, diretamente relacionada ao objetivo específico OE4, que é desenvolver um controlador fuzzy-adaptativo em cascata para diferentes condições de carga considerando variáveis dinâmicas do AGV. O Capítulo 5 apresenta os métodos experimentais utilizados, os resultados obtidos e a discussão sobre os mesmos relacionada às hipóteses do trabalho.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

5.1 Considerações Iniciais

Após a apresentação do método de desenvolvimento dos sistemas de controle, o presente capítulo apresentará os métodos experimentais usados, os resultados obtidos e a discussão sobre esses dados. Na apresentação dos métodos experimentais, na Seção 5.2, são discutidos os indicadores de performance que serão aplicados aos dados a fim de realizar uma análise quantitativa. Tais indicadores foram identificados na literatura como os mais utilizados para quantizar o desempenho de sistemas de controle de AGVs. Além disso, nessa seção são descritos os experimentos realizados e as condições ensaiadas, apresentando o ambiente experimental utilizado. Na Seção 5.3, os resultados para cada controlador embarcado no AGV e testa são apresentados de forma gráfica, contemplando uma pequena análise, para os dois cenários experimentais: a pista reta e a pista retangular. Ainda nessa seção, os resultados dos indicadores de desempenho de todos os ensaios são compilados em tabelas para comparação, divididas por condição de carga, e os valores de período de amostragem e FPS para cada sistema de controle também são apresentados. Por fim, uma discussão dos resultados à luz da hipótese do trabalho e dos objetivos específicos é conduzida.

5.2 Métodos

Esta seção descreve os métodos utilizados para avaliar e analisar os dados gerados nos ensaios dos controladores embarcados no AGV.

5.2.1 Indicadores de Desempenho

A partir dos dados medidos nos ensaios, os valores dos erros da distância do veículo em relação à faixa guia e do ângulo em relação à referência serão avaliados de acordo com os indicadores de desempenho a seguir, identificados na revisão da literatura, conforme discutido na Seção 2.4. As equações 10 e 11 representam, respectivamente, a média μ_e e o desvio padrão s_e do erro e_i . Os valores representam o comportamento médio do veículo durante a trajetória desenvolvida e a variabilidade do erro, ou seja, o qual a dispersão das medidas de erro de ângulo e distância. Além disso, o valor máximo do erro absoluto também é medido, Equação 12, de forma a avaliar o intervalo de erro em que concentra o controlador ensaiado.

$$\mu_e = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (10)$$

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \mu_e)^2}{n - 1}} \quad (11)$$

$$MAE = \max_{i=1,2,\dots,n} (e_i) \quad (12)$$

O erro quadrático médio (MSE - mean squared error), Equação 13, e a média quadrática do erro (RMSE - root mean squared error), Equação 14, são medidas que indicam o quão próximo da referência o AGV está. Sendo assim, quanto menor seu valor, melhor. Como ambos os indicadores elevam o erro ao quadrado, tendem a penalizar a presença de medições discrepantes, ou *outliers*.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n}} \quad (14)$$

Os próximos indicadores envolvem a integral do erro. A Equação 15 apresenta a formulação discreta da integral do erro quadrático (ISE - Integral of squared error). Esse indicador penaliza, por meio do quadrado do erro, erros maiores, porém, independentemente do momento em que ocorram. Já a integral do erro quadrático ponderado no tempo (ITSE - Integral Time Square Error), Equação 16, penaliza também erros que ocorram em um instante de tempo muito posterior ao início da observação e ao regime transitório por meio do tempo T_n .

$$ISE = \sum_{i=2}^n \frac{e_i^2 + e_{i-1}^2}{2} T_a \quad (15)$$

$$ITSE = \sum_{i=2}^n T_n \frac{e_i^2 + e_{i-1}^2}{2} T_a \quad (16)$$

De forma similar, as Equações 17 e 18 apresentam, respectivamente, a integral do erro absoluto (IAE - integral of absolute error) e a integral do valor absoluto do erro ponderado no tempo (ITAE - Integral Time Absolute Error), cuja penalidade no valor da integral se dá por erros muito grandes, no caso da IAE e da ITAE, e também por erros ocorridos após um intervalo de tempo, no caso da ITAE.

$$IAE = \sum_{i=2}^n \left| \frac{e_i + e_{i-1}}{2} T_a \right| \quad (17)$$

$$ITAE = \sum_{i=2}^n T_n \left| \frac{e_i + e_{i-1}}{2} T_a \right| \quad (18)$$

Como todos os indicadores efetuam uma soma dos erros que somente assumem valores maiores do que zero, quanto menor o valor dos indicadores que envolvem o cálculo da integral, melhor. Esses indicadores também podem ser utilizados na sintonia dos controladores e, na Seção 5.3, serão utilizados para analisar quantitativamente os resultados dos controladores implementados.

5.2.2 Descrição dos Experimentos

Cada controlador embarcado no AGV foi ensaiado em duas pistas: uma reta de 1,4 m de extensão e uma pista retangular de 1,50 por 1,40 m, cujos vértices foram substituídos por arcos de círculo de raio 0,5 m. A Figura 45 mostra as pistas formadas por uma fita branca de 18 mm de largura colada sob um piso de borracha preto. Os experimentos foram realizados em ambiente fechado, sem incidência direta de luz do sol, mas apresentando variação de luz natural ao longo do dia. A luz do ambiente tem baixa influência na câmera do AGV, pois o mesmo dispõe de uma caixa fechada, cuja borda está bem próxima ao chão, e com iluminação forçada e indireta da pista dada por fitas de LED.

Além disso, cinco condições de carga foram ensaiadas para cada controlador em cada uma das pistas: sem carga e com 1 kg, 2 kg, 3 kg e 4 kg de carga. Durante os ensaios as condições de cargas permaneceram constantes, ou seja, o AGV começa e termina o ensaio sem variação na condição de carga. As cargas são posicionadas conforme mostrado na Figura 46.

O software do AGV conta com uma condição de interrupção de funcionamento que desliga os motores e para a execução do software de controle quando o veículo perde a referência da linha. Essa condição é colocada por segurança, para que o AGV não continue a se mover após sair da pista. Entretanto, um comportamento inesperado foi percebido ao longo dos experimentos. Em algumas condições, apesar de o AGV não apresentar

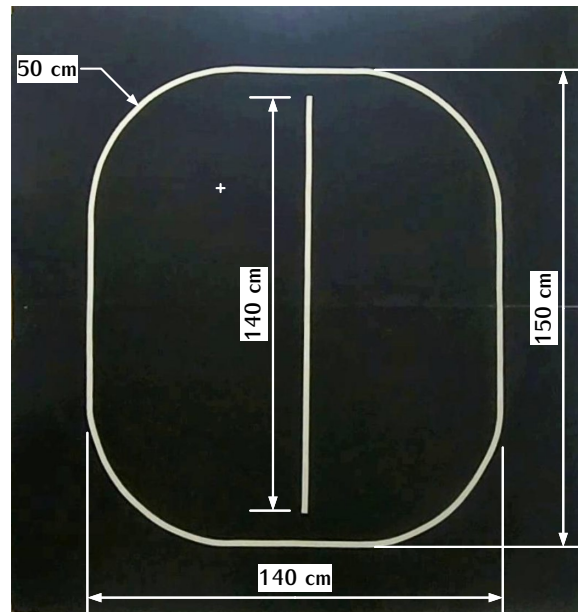


Figura 45 – Imagem com as pistas demarcadas por fitas brancas no piso de borracha preto usadas para os ensaios do AGV com as respectivas medidas.



Figura 46 – Configurações de carga ensaiadas, com a localização das cargas na plataforma do AGV.

variações em sua posição capazes de fazê-lo perder a linha, com o aumento de carga e dependendo do valor do erro e da ação de controle, um pico na corrente dos motores causa a parada do veículo pois o pico de corrente ocasiona uma queda na tensão da alimentação, resultando na perda de referência da faixa pelo desligamento da iluminação forçada da câmera. Dessa forma, em algumas situações, a própria resposta do sistema de controle levou à parada do sistema, mesmo que o AGV ainda estivesse sobre a linha. Para solução do problema, novos dispositivos precisam ser instalados no veículo, o que ficará para a próxima versão de desenvolvimento, assim como outros pontos discutidos na Seção Trabalhos Futuros no Capítulo 5.5.

Para os ensaios realizados na pista reta, entre cinco e dez experimentos foram realiza-

dos para cada faixa de carga. Os controladores foram ensaiados apenas nas condições de carga que os mantinham na pista até o fim do experimento. Para os controladores que não se mostraram estáveis ou, no caso das malhas sem controle de velocidade dos motores, não foram capazes de transportar cargas de maior peso, o veículo não foi estressado com o aumento de carga ou com vários experimentos que resultariam no mesmo resultado. O AGV para quando não detecta pista. Portanto, o experimento termina quando o AGV chega ao final da reta. Quando ensaiados na pista retangular fechada, o veículo foi testado em intervalos, definidos no software embarcado, de 5 a 10 minutos, variando o número de voltas de acordo com a desempenho do controlador e velocidade do veículo.

Os experimentos realizados estão alinhados com os objetivos específicos da proposta. A implementação gradual dos sensores na malha de controle possibilita comparar o comportamento do sistema e a contribuição de cada nova variável para a exatidão/precisão do controle de posição (OE1, OE2 e OE3). Além disso, a forma de construção dos sistemas de controle possibilita verificar o impacto no processamento da malha de controle de cada novo sistema de medição incluído (OE3) e viabilizou, através de medidas redundantes por sensores diferentes, detectar o comportamento da câmera, comparando com os dados medidos pelas centrais inerciais.

O último sistema de controle embarcado no AGV atende ao objetivo OE4, ou seja, a implementação de um controlador fuzzy-adaptativo em cascata no controle de posição de um AGV seguidor de linha de forma avaliar até que ponto o número de variáveis de entrada e diversidade das grandezas consideradas aumenta a exatidão/precisão do sistema de controle. Com essa configuração, todo o sistema embarcado é utilizado e, com os sistemas de inferência em cascata, se tem a influência de todos os sensores no controle de posição do veículo. Além disso, para todos os controladores desenvolvidos, as diferentes condições de carga foram ensaiadas para investigar o impacto da carga na dinâmica do AGV e na exatidão/precisão do controle de posição.

Por fim, o desenvolvimento e a implementação do software embarcado baseado na SOA e usando o padrão fachada possibilita o desenvolvimento e testes dos serviços e softwares individualmente e facilita modificações de parâmetros ou modificação dos algoritmos sem interferência em outros serviços já implementados. Com isso, cumpriu-se o objetivo OE5.

A Tabela 13 mostra os controladores PID embarcados, para comparação com os controladores fuzzy, com as variáveis de entrada, presença ou não da malha de controle de velocidade dos motores e parâmetros dos controladores PID. Analogamente, na Tabela 14 são apresentados os controladores fuzzy implementados, mostrando quais FIS são utilizados, quais as entradas do último FIS da cascata, se há malha de controle de velocidade dos motores e quais os parâmetros do controlador PID em caso positivo.

As medidas realizadas em cada experimento estão descritas na Tabela 15 para os controladores PID e Fuzzy, respectivamente, divididas entre variáveis utilizadas nas malhas de controle e variáveis armazenadas para registro do ensaio. Os resultados dos experimen-

tos serão apresentados em forma de gráficos e em forma de tabela. Todos os experimentos mostram o registro das medições de ângulo de orientação e distância medidas e da ação de controle de cada controlador. À medida que novos sensores são incorporados à malha de controle, novas variáveis são medidas e armazenadas. Dessa forma, novos gráficos serão apresentados quando pertinentes para discussão. Os indicadores de desempenho serão agrupados em tabelas, na Seção 5.3.3, separados por faixa de carga para facilitar a comparação entre as malhas de controle implementadas.

O Apêndice C mostra todos os parâmetros de cada um dos ensaios, já que, à medida que os sensores foram incorporados ao sistema, ajustes foram necessários a cada implementação do controle.

Tabela 13 – Controladores PID implementados no AGV para comparação com os controladores fuzzy da proposta.

Controlador	Parâmetros	Entrada	Controle de Velocidade	Controlador de Velocidade
PID1	$K_p = 0,2, T_i = 10, T_d = 1$	Erro de distância	Não	
PID2	$K_p = 0,2, T_i = 8, T_d = 1$ $K_p = 0,11, T_i = 20, T_d = 0,5$	Erro de ângulo Erro de distância	Não	
PID3	$K_p = 0,25, T_i = 3,75, T_d = 1$	Erro de distância	Sim	$K_p = 0,2,$ $T_i = 0,099, T_d = 0$
PID4	$K_p = 0,225, T_i = 8, T_d = 1$ $K_p = 0,11, T_i = 20, T_d = 0,5$	Erro de ângulo Erro de distância	Sim	$K_p = 0,2,$ $T_i = 0,099, T_d = 0$

Tabela 14 – Controladores fuzzy implementados no AGV.

Controlador	Descrição	Entradas	Controle de Velocidade	Controlador PID de Velocidade
Fuzzy1a	FIS1	Ângulo de orientação θ	Não	-
Fuzzy1b		Distância até o centro da faixa guia δ	Sim	$K_p = 0,32,$ $T_i = 0,09, T_d = 0,007$
Fuzzy2a	FIS1 + FIS2	Saída do Fuzzy1	Não	-
Fuzzy2b		Velocidade Angular $\dot{\theta}$ Taxa de variação de distância $\dot{\delta}$	Sim	$K_p = 0,25,$ $T_i = 0,15, T_d = 0$
Fuzzy3a	FIS1 + FIS2 + FIS3	Saída do Fuzzy2	Não	-
Fuzzy3b		Velocidade Angular $\dot{\theta}_{IMU_{frontal}}$ Velocidade Angular $\dot{\theta}_{IMU_{traseira}}$	Sim	$K_p = 0,25,$ $T_i = 0,15, T_d = 0$
Proposta	FIS1 + FIS2 + FIS3 + FIS4	Saída do Fuzzy 3 Corrente i_{aeMRMS} do motor esquerdo Corrente i_{adMRMS} do motor direito	Sim	$K_p = 0,25,$ $T_i = 0,15, T_d = 0$

Tabela 15 – Variáveis medidas nos sistemas de controle PID e Fuzzy implementados.

Controlador	Variáveis Utilizadas	Variáveis Armazenadas
PID1	Distância	Período de amostragem
		Ângulo
PID2	Ângulo	Média Móvel do Ângulo
		Média Móvel da Distância
PID3	Distância	FPS
		Status da faixa guia
PID4	Ângulo	Ação de Controle
		Período de amostragem
Fuzzy1a	Distância	Velocidade tangencial das rodas
		Velocidades linear e angular do veículo
Fuzzy1b	Distância	Posição x, y estimada pela odometria
		Ângulo de orientação θ estimado pela odometria
Fuzzy1a	Distância	Ângulo
		Média Móvel do Ângulo
Fuzzy1b	Velocidade dos motores	Média Móvel da Distância
		FPS
Fuzzy1a	Distância	Status da faixa guia
		Ação de Controle FIS1
Fuzzy1b	Velocidade dos motores	Período de amostragem
		Velocidade tangencial das rodas
Fuzzy1a	Distância	Velocidades linear e angular do veículo
		Posição x, y estimada pela odometria
Fuzzy1b	Velocidade dos motores	Ângulo de orientação θ estimado pela odometria
		Média Móvel do Ângulo
Fuzzy1a	Distância	Média Móvel da Distância
		FPS
Fuzzy1b	Velocidade dos motores	Status da faixa guia
		Ação de Controle FIS1

Tabela 15 – Continuação.

Controlador	Variáveis Utilizadas	Variáveis Armazenadas
Fuzzy2a	Ação de Controle FIS1	Período de amostragem Ângulo Média Móvel do Ângulo Distância
	Velocidade angular $\dot{\theta}$	Média Móvel da Distância FPS
	Taxa de variação da distância $\dot{\delta}$	Status da faixa guia Ação de Controle FIS1 Ação de Controle FIS2
Fuzzy2b	Ação de Controle FIS1	Período de amostragem Velocidade tangencial das rodas Velocidades linear e angular do veículo Posição x, y estimada pela odometria
	Velocidade angular $\dot{\theta}$	Ângulo de orientação θ estimado pela odometria Ângulo
	Taxa de variação da distância $\dot{\delta}$	Média Móvel do Ângulo Distância Média Móvel da Distância FPS
Fuzzy3a	Velocidade dos motores	Status da faixa guia Ação de Controle FIS1 Ação de Controle FIS2
	Ação de Controle FIS2	Período de amostragem Ângulo Média Móvel do Ângulo Distância
	Velocidade Angular $\dot{\theta}_{IMU_{\text{frontal}}}$	Média Móvel da Distância FPS Status da faixa guia
Fuzzy3b	Velocidade Angular $\dot{\theta}_{IMU_{\text{traseira}}}$	Velocidade angular ao redor dos eixos x, y, z Aceleração nos eixos x, y, z Ação de Controle FIS1 Ação de Controle FIS2 Ação de Controle FIS3
	Ação de Controle FIS2	Período de amostragem Velocidade tangencial das rodas Velocidades linear e angular do veículo Posição x, y estimada pela odometria
	Velocidade Angular $\dot{\theta}_{IMU_{\text{frontal}}}$	Ângulo de orientação θ estimado pela odometria Ângulo Média Móvel do Ângulo Distância
Fuzzy3b	Velocidade Angular $\dot{\theta}_{IMU_{\text{traseira}}}$	Média Móvel da Distância FPS
	Velocidade dos motores	Status da faixa guia Velocidade angular ao redor dos eixos x, y, z Aceleração nos eixos x, y, z Ação de Controle FIS1 Ação de Controle FIS2 Ação de Controle FIS3

Tabela 15 – Continuação.

Controlador	Variáveis Utilizadas	Variáveis Armazenadas
		Período de amostragem
		Velocidade tangencial das rodas
		Velocidades linear e angular do veículo
		Posição x, y estimada pela odometria
		Ângulo de orientação θ estimado pela odometria
	Ação de Controle FIS3	Ângulo
		Média Móvel do Ângulo
	Corrente i_{aeMRMS}	Distância
		Média Móvel da Distância
Fuzzy4	Corrente i_{adMRMS}	FPS
		Status da faixa guia
	Velocidade dos motores	Velocidade angular ao redor dos eixos x, y, z
		Aceleração nos eixos x, y, z
		Corrente i_{aeMRMS} do motor esquerdo
		Corrente i_{adMRMS} do motor direito
		Ação de Controle FIS1
		Ação de Controle FIS2
		Ação de Controle FIS3
		Ação de Controle FIS4

5.3 Resultados

A presente seção apresentará os resultados dos controladores seguindo a ordem gradual com que foram embarcados no AGV. Serão apresentados os resultados dos sistemas de controle sem a malha de realimentação das velocidades dos motores seguidos dos resultados dos sistemas com tal malha de controle. Primeiramente, serão apresentados os resultados dos controladores PID em suas variações. Depois, serão apresentados os resultados dos sistemas fuzzy embarcados.

Os resultados dos experimentos na pista reta serão apresentados em forma de gráfico destacando um comportamento típico medido, com uma região hachurada mostrando o desvio padrão obtido dos ensaios. Os gráficos apresentados serão dos valores de ângulo e distância medidos, para cada faixa de carga. Com isso, pretende-se verificar o tempo de acomodação do sistema de controle em uma linha reta e seu comportamento em regime permanente.

Para a pista retangular, os resultados serão apresentados por meio de gráficos, com as mesmas variáveis consideradas para a pista reta, e tabelas contendo os indicadores de desempenho apresentados na Seção 5.2.1 para os valores de erro de ângulo e distância. Os gráficos contém os valores medidos durante todo o experimento e um excerto de 50 s para detalhar o comportamento do AGV. Esse tempo foi escolhido por ser um intervalo em que o veículo, em todos os controladores, dá, pelo menos, uma volta completa na pista.

Os valores dos indicadores de desempenho calculados para cada ensaio são mostrados nas Tabelas 16 a 20 ao final da seção, separados por controladores e por faixa de carga de forma a facilitar a comparação dos resultados. A Tabela 21 apresenta o tempo de ciclo,

ou período de amostragem, e o FPS resultante de cada implementação dos controladores.

5.3.1 Controladores PID

A implementação dos controladores PID foi realizada diante do extenso uso de tais controladores no domínio de problema, como identificado na etapa de revisão da literatura. Além de propiciar uma comparação para os controladores fuzzy da proposta. A sintonia dos ganhos foi realizada com o AGV a vazio, também se espelhando na maioria dos trabalhos que propõe controladores para AGVs, mas não demonstram experimentos para condições em que o AGV está carregado. É esperado que o desempenho do controlador se degrada conforme a carga no veículo aumenta, principalmente, devido às mudanças no sistema dinâmico que alteram o ponto de operação para qual o controlador foi sintonizado.

5.3.1.1 PID1

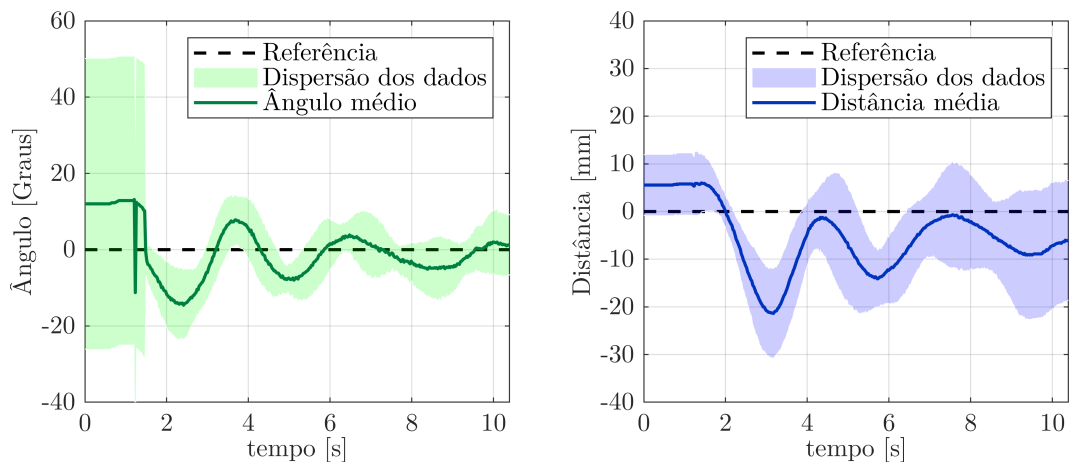
O controlador mais simples implementado é o PID1, implementação da malha de controle da Figura 43(a), que tem como entrada o erro de distância. Nesse caso não há controle de velocidade dos motores, sendo a velocidade de referência definida por um valor de tensão do *driver* de potência definido por uma porcentagem do *duty cycle* da modulação PWM. Os parâmetros do controlador foram apresentados na Tabela 13.

A Figura 47 mostra os resultados dos ensaios com o AGV na pista reta quanto às medições de ângulo e distância. Os gráficos mostram o comportamento médio, linha sólida, em comparação com os valores de referência, que são nulos, representados pela linha tracejada. A região destacada ao redor da média é a região de dispersão dos dados, e foi construída a partir do desvio padrão das amostras dos experimentos.

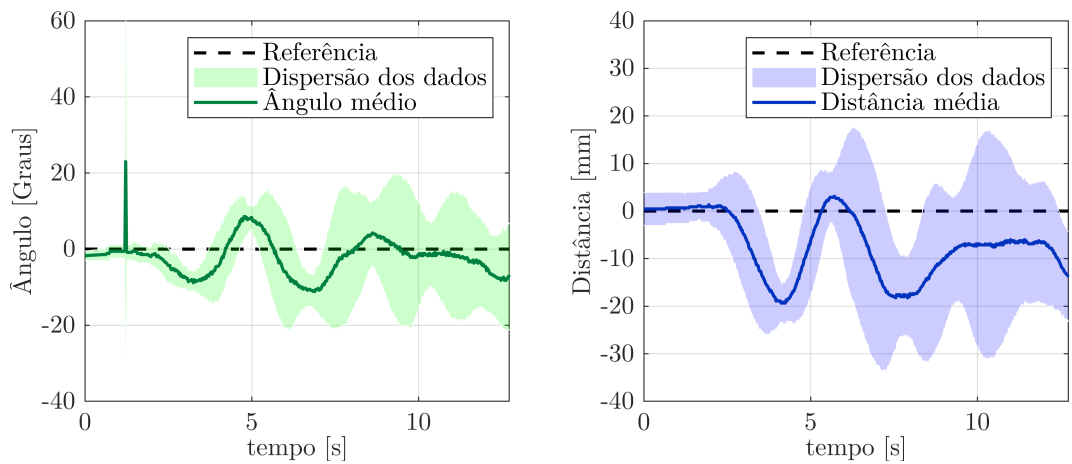
Comparando-se os gráficos resultantes nas duas condições de carga, é possível observar que, com o aumento de carga, o veículo apresentou um incremento na dispersão dos valores de ângulo e distância. Outro impacto do aumento da carga foi o aumento no tempo em que o AGV levou para transpor a mesma distância da pista.

Os resultados para a pista retangular são mostrados nas Figuras 48 e 49. Para a condição a vazio, Figura 48, a amplitude do ângulo permaneceu entre $\pm 20^\circ$ na maior parte do tempo, apresentando picos de maiores valores que refletem uma necessidade de correção maior de distância, como pode ser observado no detalhe dos gráficos no intervalo de tempo de 150 a 200 s. Nesse gráfico, entre 180 e 190 s há um aumento na distância medida no sentido positivo e depois de duas oscilações também no sentido negativo, o que está relacionado com o aumento na amplitude da variação do ângulo.

Ainda sobre a Figura 48, o terceiro gráfico mostra a ação de controle do PID. A presença da ação de controle derivativa implica no surgimento das variações acentuadas no valor aplicado aos atuadores. Porém, o sistema necessita dessa ação de controle para fazer as curvas da pista.



(a) AGV a vazio.



(b) AGV com carga de 1 kg.

Figura 47 – Resultados dos experimentos com PID1 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

Para a condição de carga de 1 kg, o AGV apresentou dificuldades de locomoção, sofrendo condições de travamento do motor em alguns trechos. Esses trechos no gráfico são caracterizados pela medição constante do ângulo e da distância. O veículo completou pouco mais de uma volta, antes de perder a referência da pista.

O controlador PID1, no cenário pista retangular e para condição a vazio, apresentou uma média de erro de $3,07^\circ$ com desvio padrão de $12,33^\circ$, atingindo um valor máximo de $41,1^\circ$, excetuando-se eventuais ruídos de medição. Para o erro de distância, a média foi de $-0,21\text{ mm}$ com desvio padrão de $14,62\text{ mm}$. O valor máximo absoluto do erro de distância atingido pelo veículo foi de $45,6\text{ mm}$, quase no limite de medição do sensor. Na condição de carga 1 kg, todos os valores aumentaram, porém a comparação não pode ser feita sem observar que o AGV não conseguiu permanecer na pista e perdeu a referência da linha, apresentando, assim, valores muito maiores.

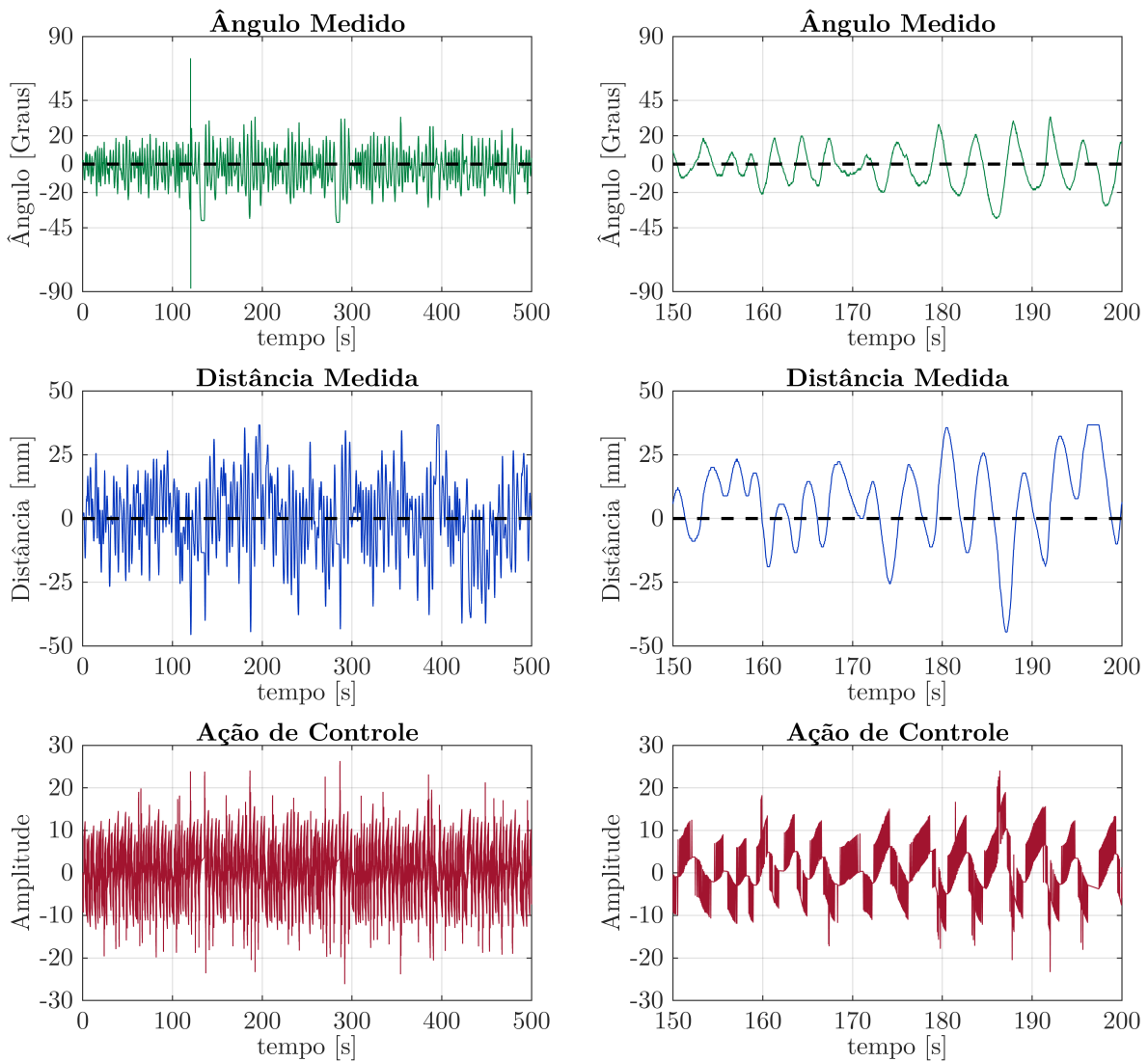


Figura 48 – Resultados do controlador PID1 para o AGV a vazio no cenário pista retangular.

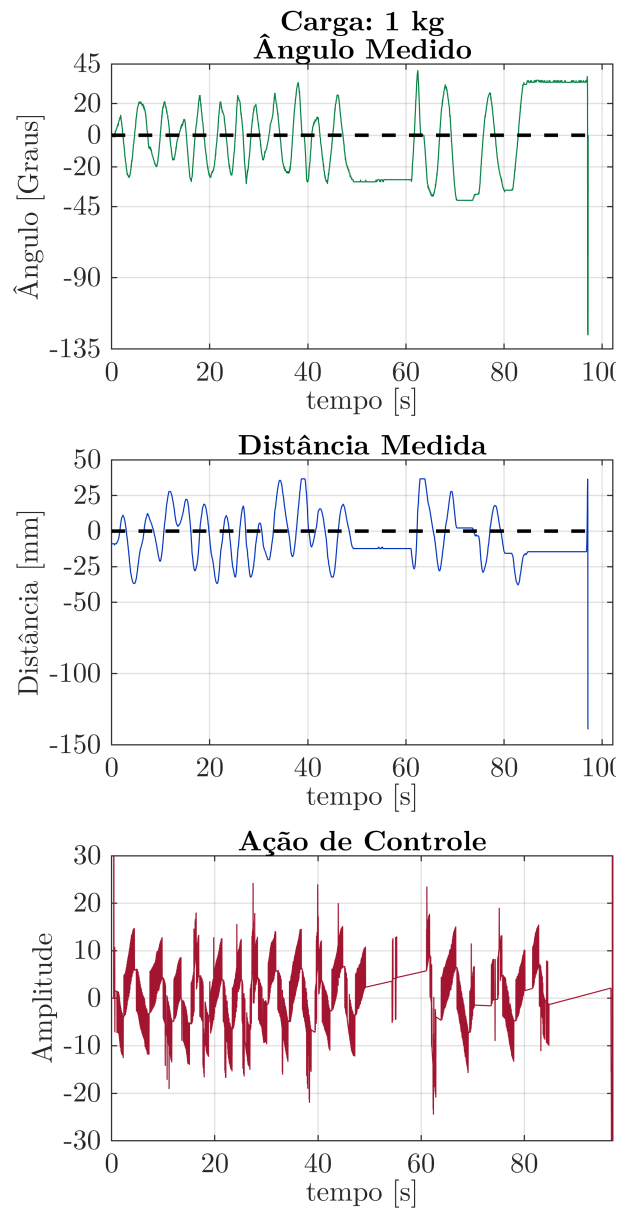
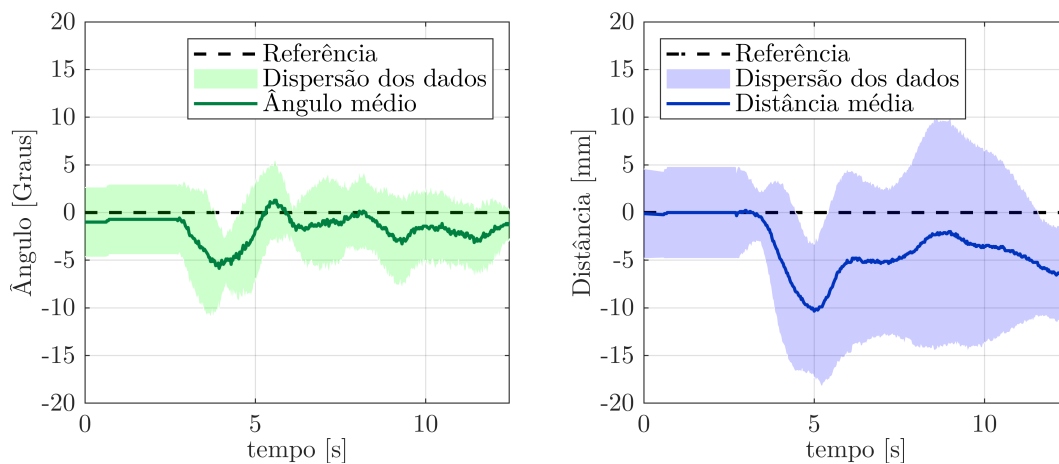


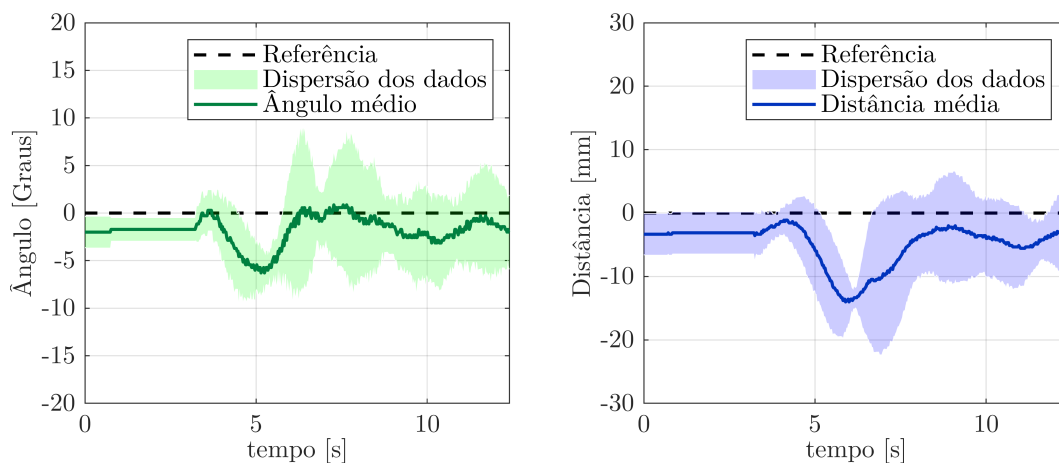
Figura 49 – Resultados do controlador PID1 para o AGV com carga de 1 *kg* no cenário pista retangular.

5.3.1.2 PID2

A fim de se controlar o ângulo do veículo e a distância em relação à faixa guia, o controlador PID concorrente da Figura 44(a) foi implementado. Assim como o controlador anterior, não há controle de velocidade dos motores. Os resultados do controlador na pista reta são apresentados na Figura 50. Comparando com o PID1, a dispersão dos dados de ângulo e distância diminuíram, principalmente para o ângulo de orientação do AGV. Entretanto, é possível observar que a adição de carga causou um aumento na dispersão da distância medida pelo AGV, o que significa que o veículo se afastou mais da faixa guia na condição de 1 kg de carga.



(a) AGV a vazio.



(b) AGV com carga de 1 kg.

Figura 50 – Resultados dos experimentos com PID2 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

As Figuras 51 e 52 mostram os resultados para os ensaios na pista retangular. O maior impacto da carga no comportamento do gráfico é na amplitude de variação da distância medida pelo veículo, ficando o ângulo medido similar à condição a vazio. Ainda,

os resultados dos dois cenários mostram que adicionar o controle do ângulo de orientação do AGV impacta na diminuição da amplitude da distância medida pelo veículo.

Todos resultados quantitativos do controlador PID2 estão descritos nas Tabelas 16 e 17. Para a condição a vazio, a média do erro do ângulo foi de $1,89^\circ$ com desvio padrão de $6,13^\circ$. O máximo valor absoluto do erro foi $34,70^\circ$. Os mesmos indicadores, respectivamente, para o erro de distância foram de $-0,88\text{ mm}$, $10,27\text{ mm}$ e $32,25\text{ mm}$.

Reforçando o impacto da carga observado nos gráficos, a média do erro do ângulo foi de $1,55^\circ$ com desvio padrão de $6,001^\circ$ e máximo valor absoluto do erro igual à $21,2^\circ$. Similarmente, os valores para o erro de distância foram $-14,4\text{ mm}$ de média, desvio padrão de $9,71\text{ mm}$ e máximo erro absoluto de $36,7\text{ mm}$.

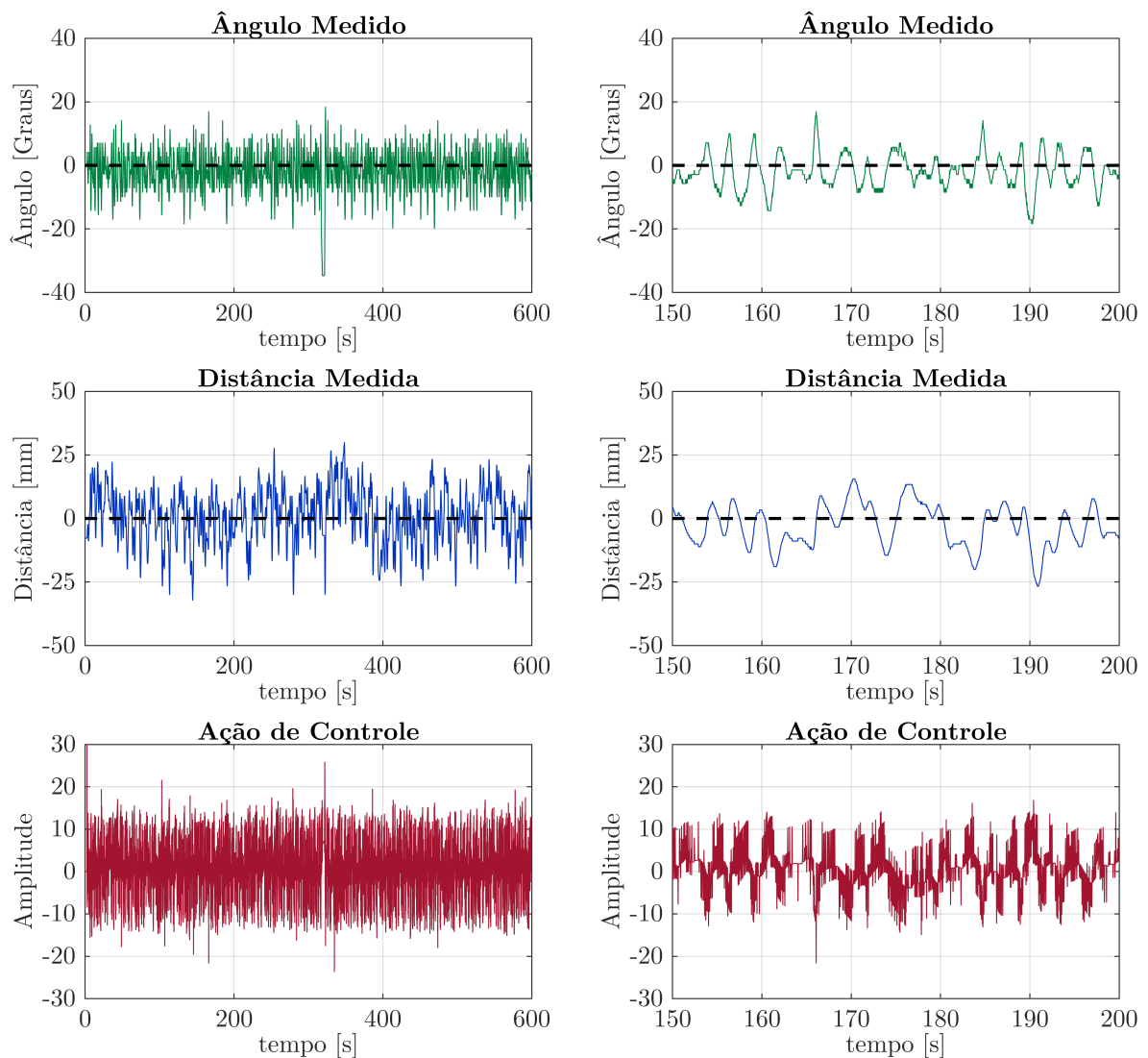


Figura 51 – Resultados dos controladores PID2 para o AGV a vazio no cenário pista retangular.

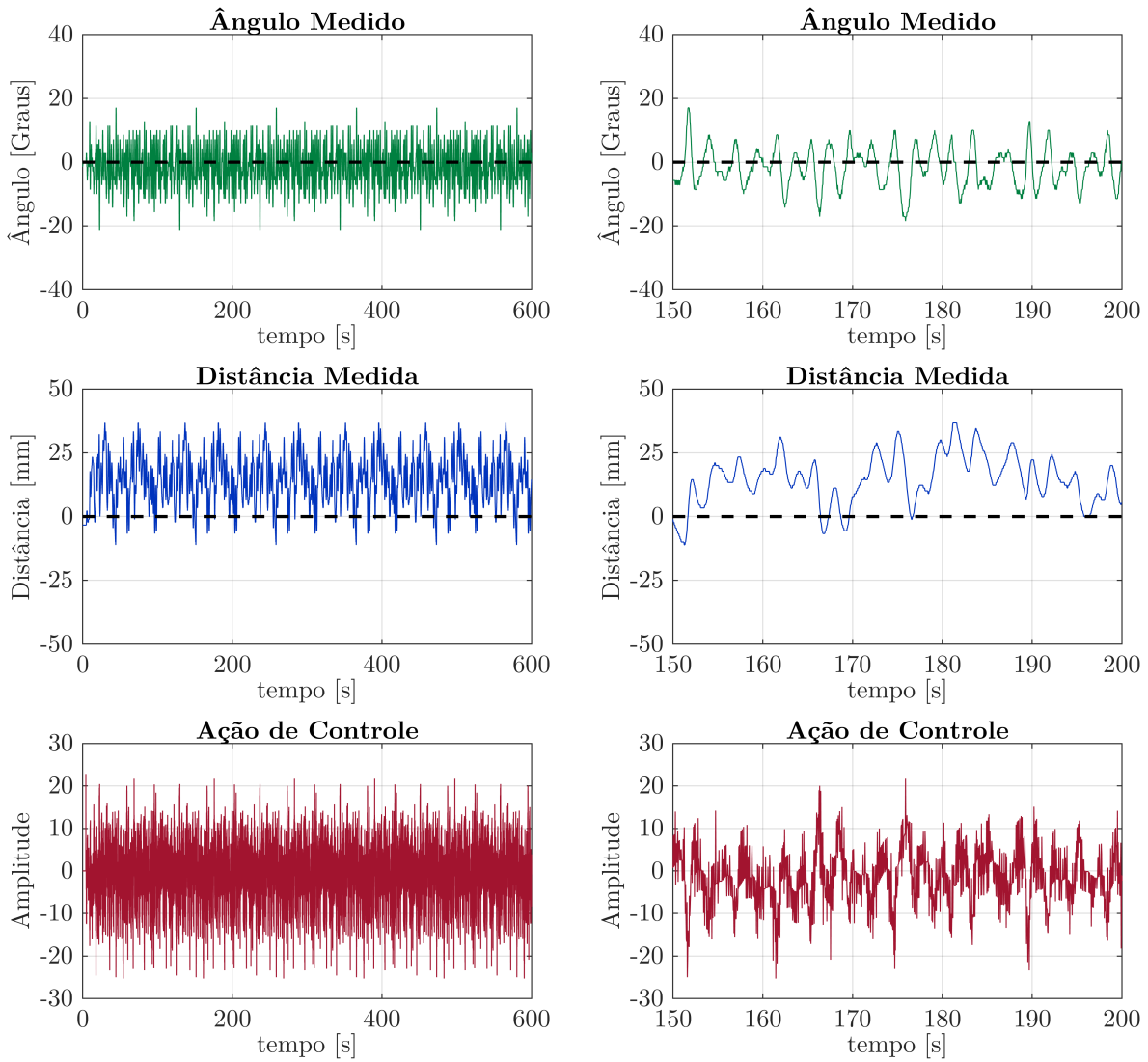
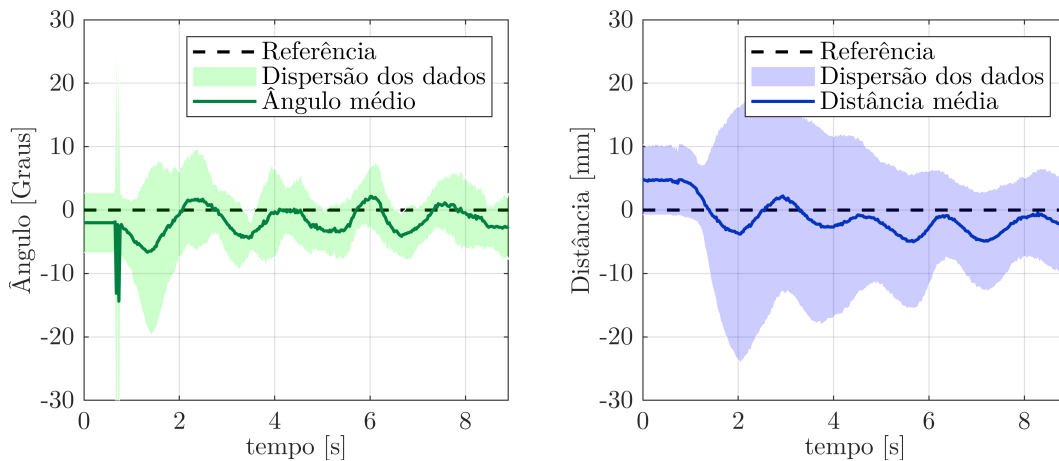


Figura 52 – Resultados dos controladores PID2 para o AGV com carga de 1 *kg* no cenário pista retangular.

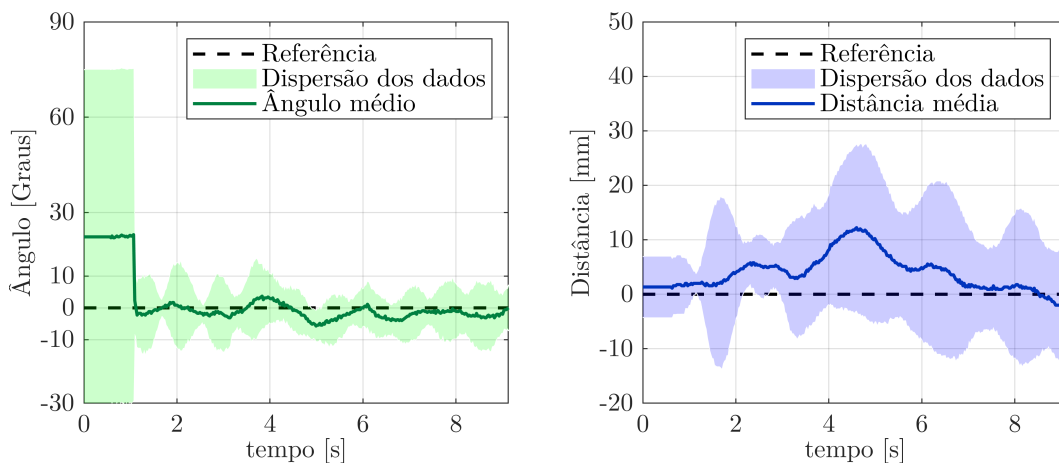
5.3.1.3 PID3

A malha de controle do PID3 é mostrada na Figura 44(a), com a inserção de uma malha de controle de velocidade para cada um dos motores também usando controlador PID. O erro de distância é a entrada do controlador. A velocidade linear de referência do AGV agora é dada em RPM, unidade de velocidade dos motores. As Figuras 53 e 54 mostramos resultados dos ensaios da malha de PID3 na pista reta. Com a presença do controle de velocidade, todas as condições de carga podem ser avaliadas.

O aumento da carga causa aumento na amplitude de variação tanto do valor ângulo quanto da distância medidos pelo AGV. A tendência de movimento oscilatório também aumenta com o aumento da carga alocada na plataforma.



(a) AGV a vazio.



(b) AGV com carga de 1 kg.

Figura 53 – Resultados dos experimentos com PID3 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

Durante os ensaios com a pista retangular, os resultados não foram satisfatórios. As Figuras 55, 56, 57 e 58 mostram os valores encontrados. Apesar de apresentar resultados satisfatórios na pista reta, o impacto da carga foi muito significativo para as condições

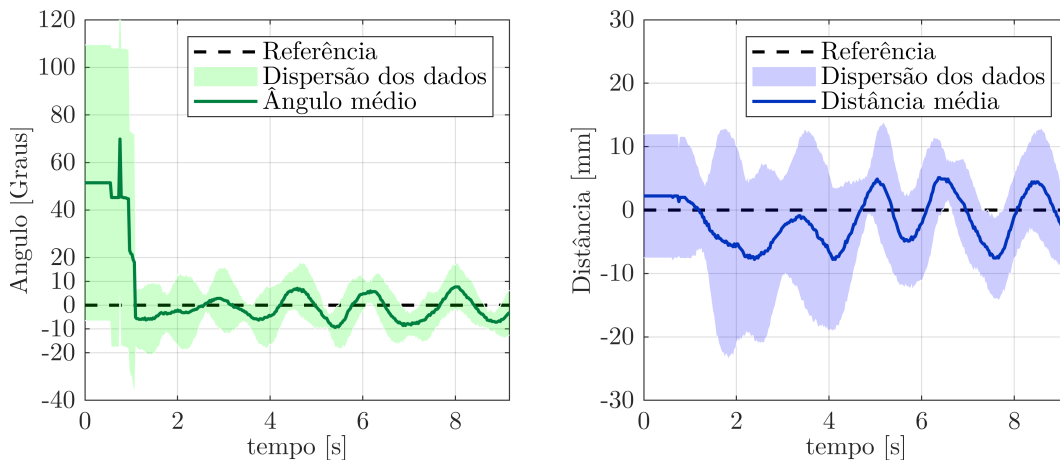
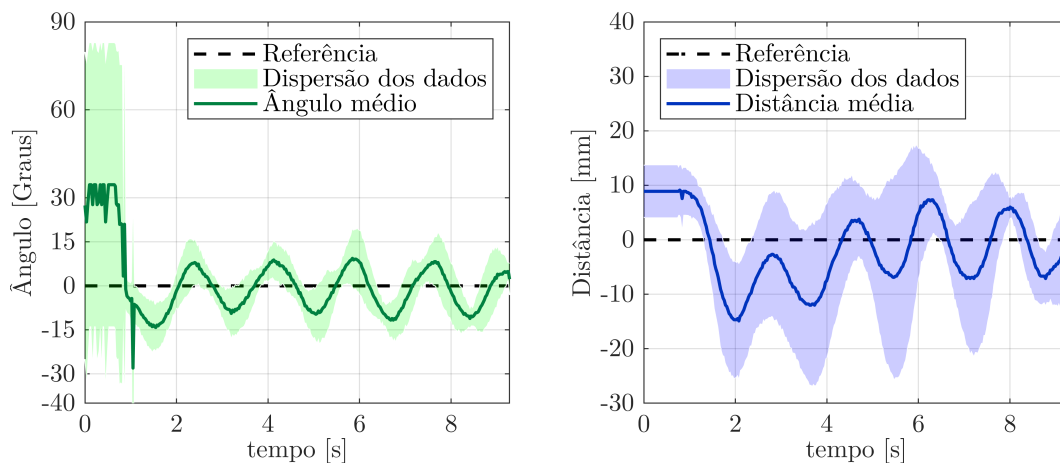
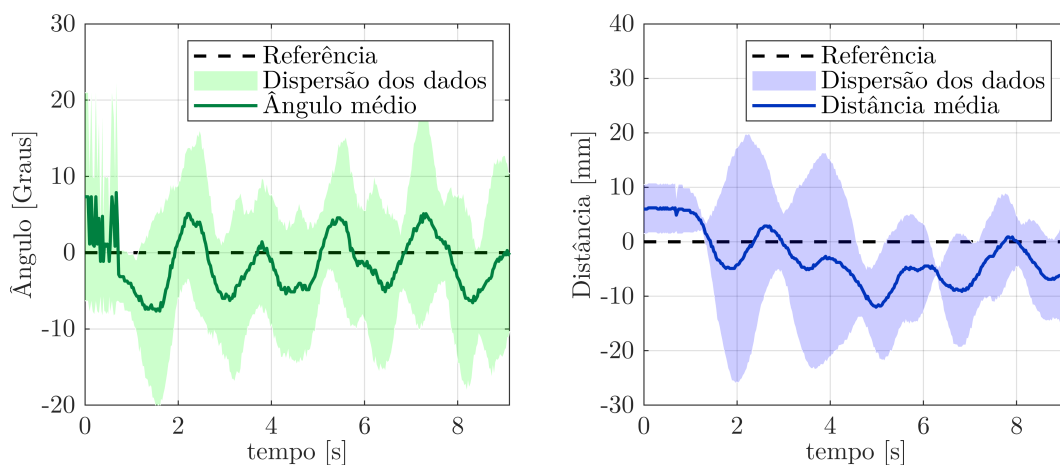
(a) AGV com carga de 2 *kg*.(b) AGV com carga de 3 *kg*.(c) AGV com carga de 4 *kg*.

Figura 54 – Resultados dos experimentos com PID3 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

do AGV com carga na pista retangular. O controlador, nessas situações, apresentou características de surto de ação de controle, que levaram ao surto de corrente nos motores e à condição de parada precoce do veículo. Esse comportamento pode ser observado nas Figuras 56, 57 e 58, com diferentes intervalos de execução. Para as cargas de 2 e 3 kg, a influência foi maior, tendo um comportamento típico de desligamento nos primeiros segundos de ensaio, que se repetiram por várias tentativas.

Comparado com o resultado do PID1, a inclusão da malha de controle de velocidade melhorou o desempenho do sistema, como pode ser observado na Tabela 16. O desvio padrão tanto do erro de ângulo quanto de distância diminuíram, assim como o máximo erro absoluto. Como o ensaio do PID3 a vazio um valor de ruído na medição de ângulo e os picos de erro de distância ocorreram em instantes de tempo avançados em relação ao início do experimento, os indicadores *ITSE* e *ITAE* tiveram um aumento, devido à penalização do tempo.

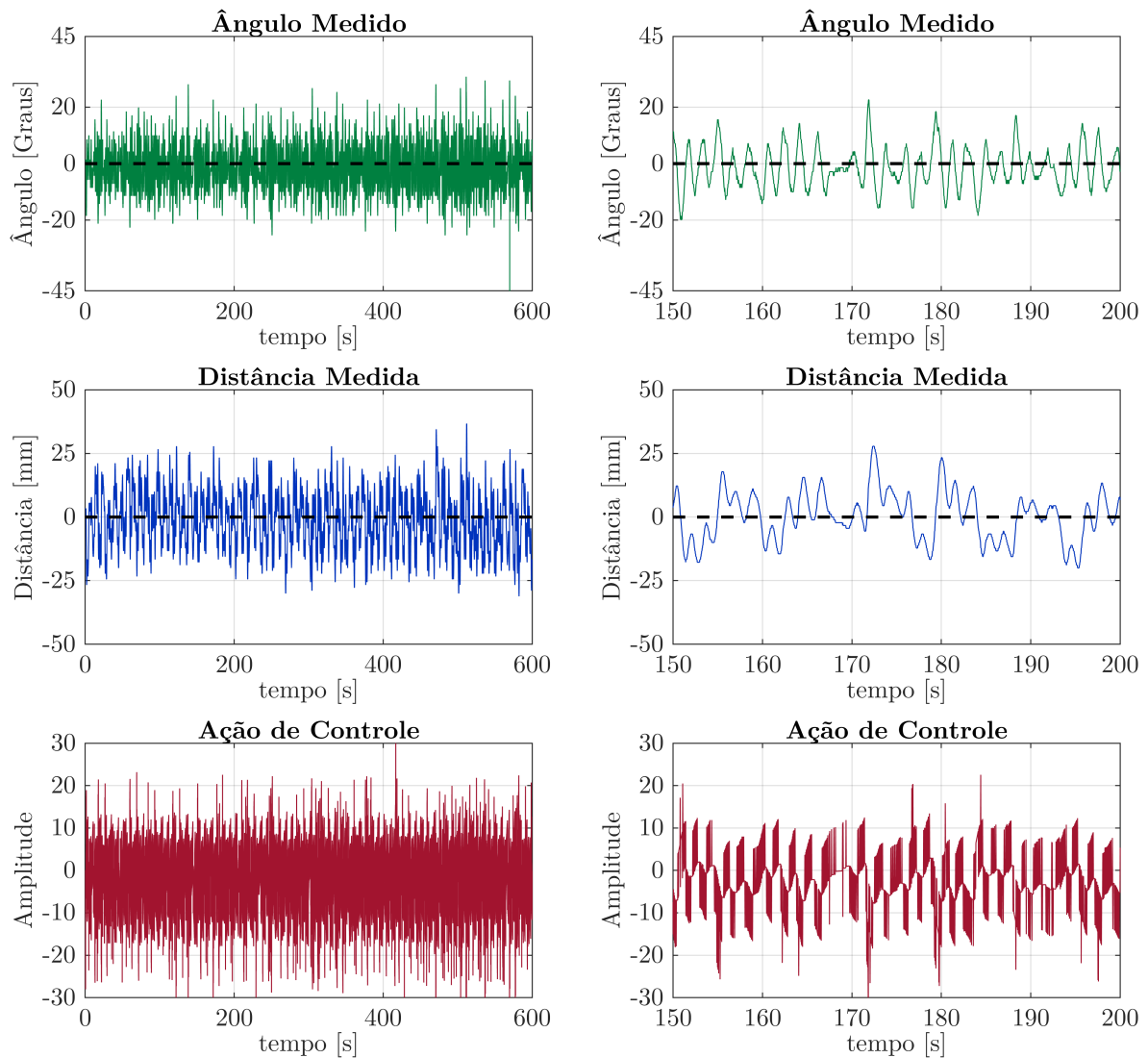


Figura 55 – Resultados do controlador PID3 para o AGV a vazio no cenário pista retangular.

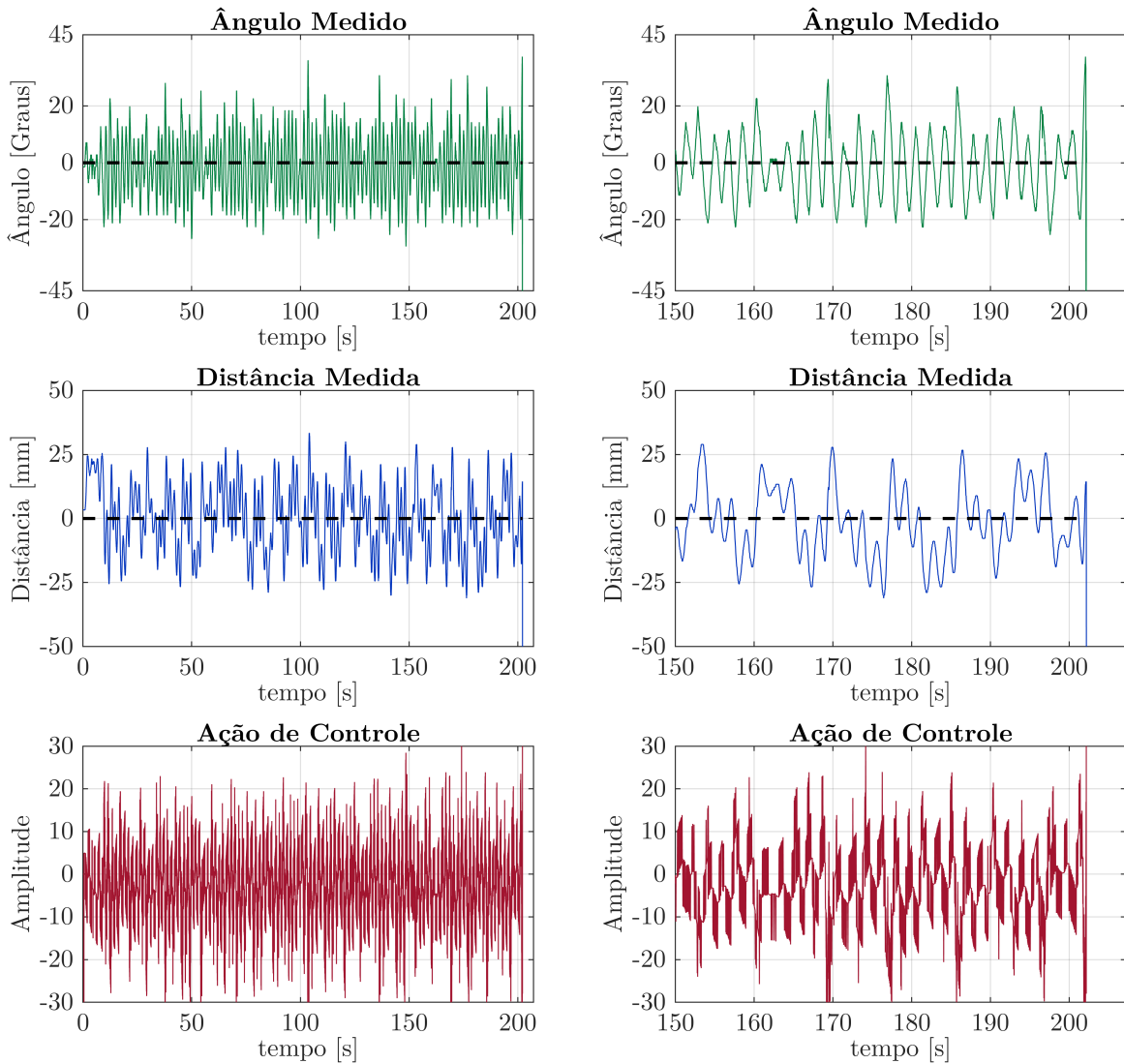


Figura 56 – Resultados do controlador PID3 para o AGV com carga de 1 kg no cenário pista retangular.

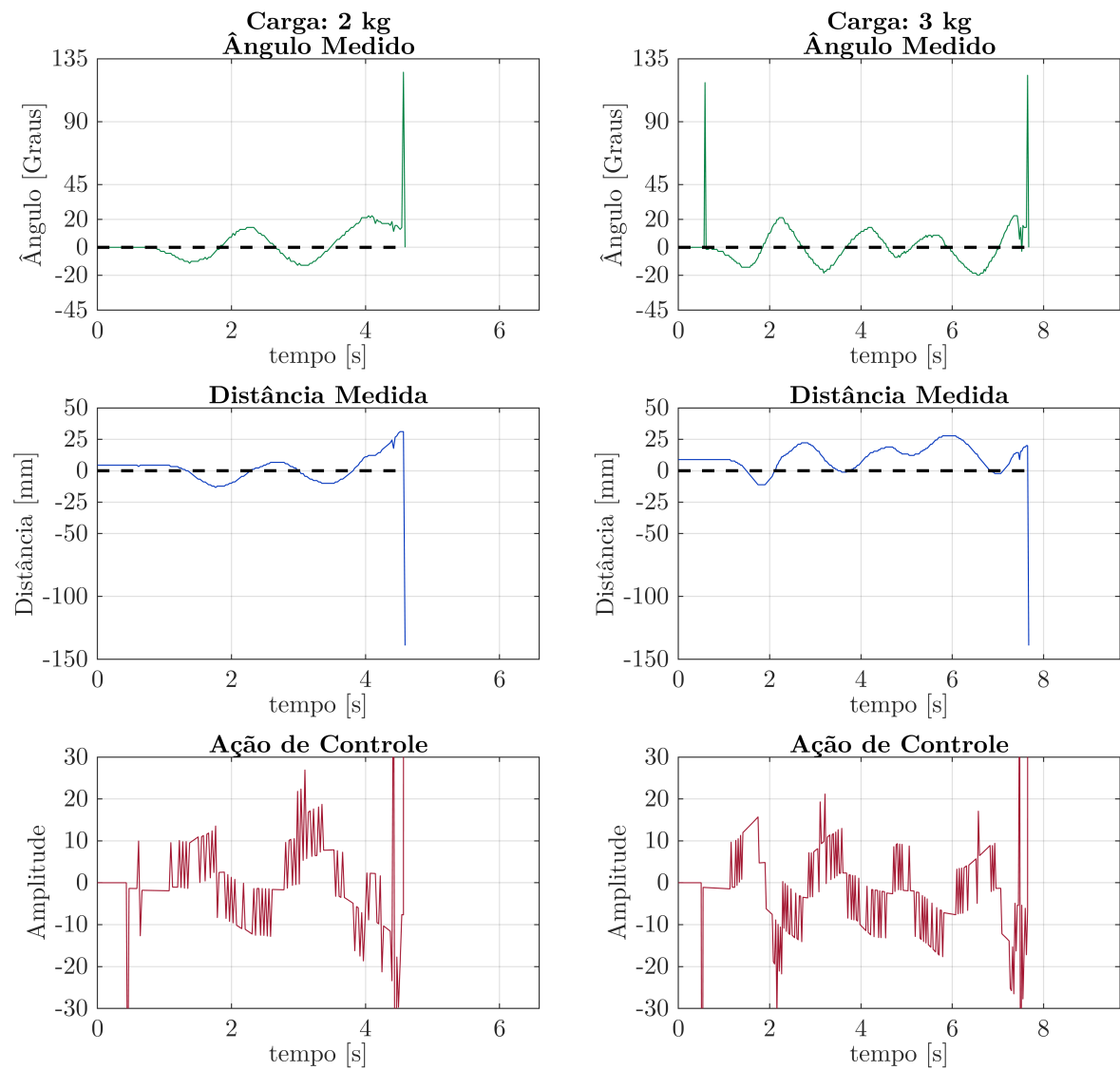


Figura 57 – Resultados do controlador PID3 para o AGV com cargas de 2 kg e 3 kg no cenário pista retangular.

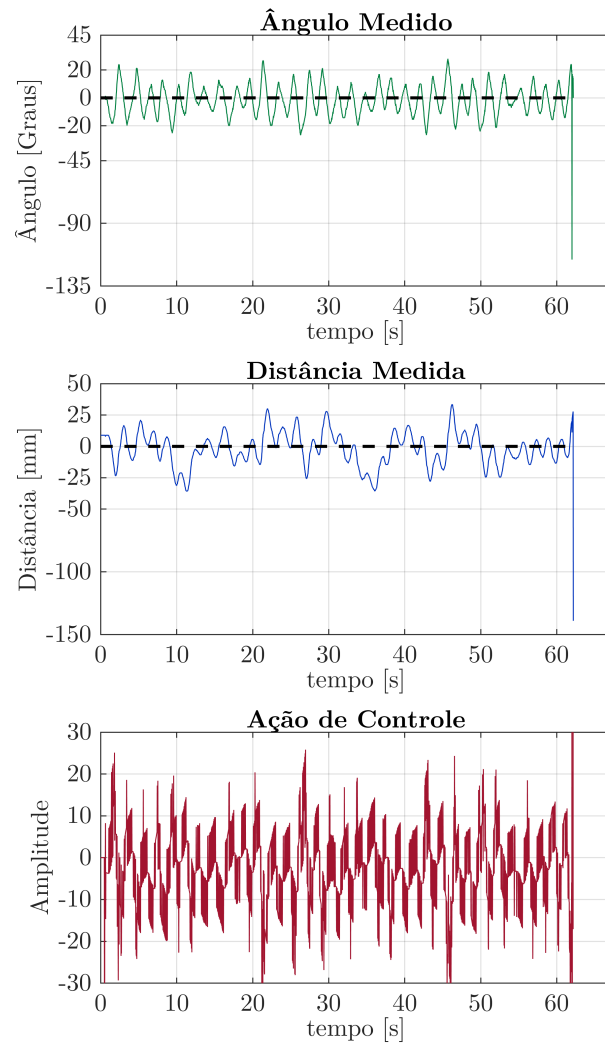
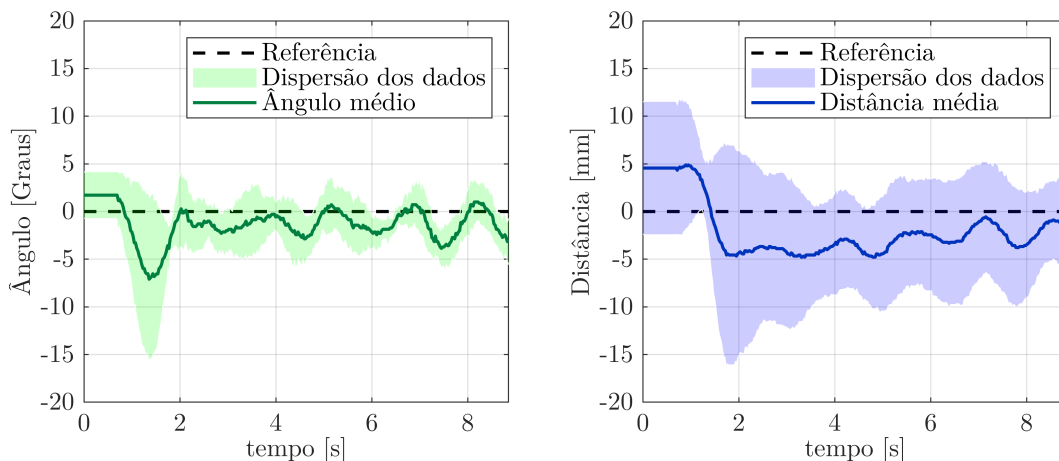


Figura 58 – Resultados do controlador PID3 para o AGV com carga de 4 kg no cenário pista retangular.

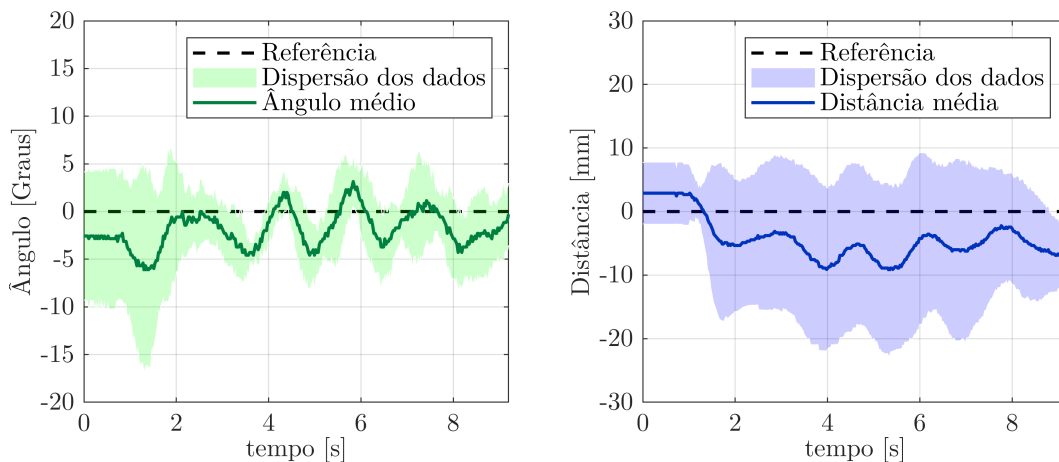
5.3.1.4 PID4

Finalmente, o último controlador PID implementado é representado pela malha de controle da Figura 44(b), que tem como entrada os erro de ângulo e de distância, além da malha de controle de velocidade dos motores. Os parâmetros dos controladores presentes na malha foram apresentados na Tabela 13.

Os resultados dos ensaios na pista reta são mostrados nas Figuras 59 e 60. Do ponto de vista do ângulo medido ao longo dos ensaios, a presença da carga aumenta a oscilação, gerando um comportamento médio e uma dispersão dos valores maiores conforme a carga aumenta. No caso da distância para o centro da faixa guia, os valores para as cargas de 0, 1 e 2 apresentam uma dispersão entre -20 e 10 mm, com valor médio próximo de -5 mm. Entretanto, para as cargas de 3 e 4 kg, a distância média ficou mais próxima de zero e com uma dispersão mais esteira. Além disso, comparando-se com os controladores anteriores, o tempo para completar a pista diminuiu para pouco mais de 8 s.



(a) AGV a vazio.



(b) AGV com carga de 1 kg.

Figura 59 – Resultados dos experimentos com PID4 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

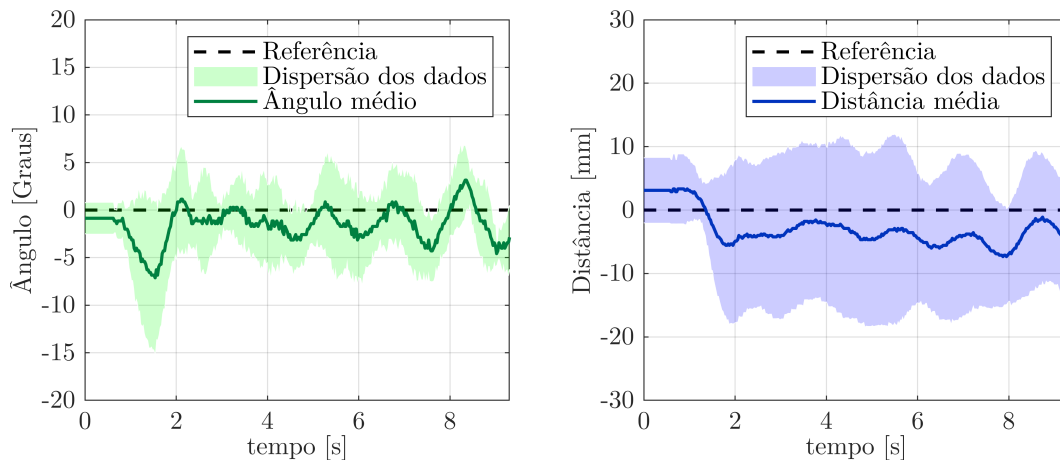
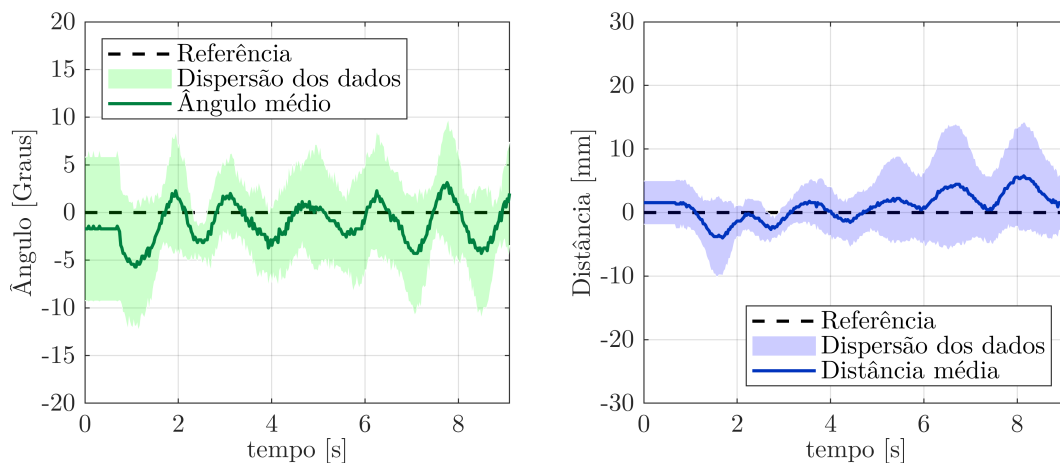
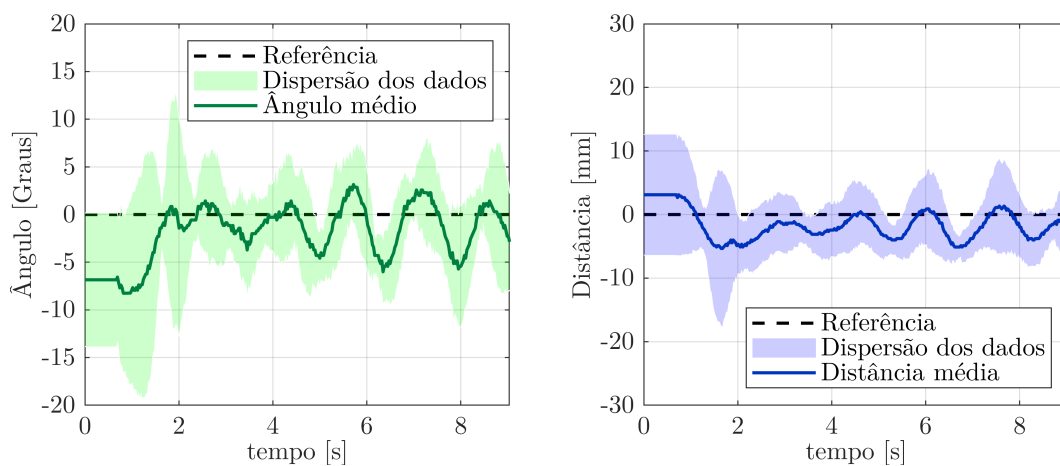
(a) AGV com carga de 2 *kg*.(b) AGV com carga de 3 *kg*.(c) AGV com carga de 4 *kg*.

Figura 60 – Resultados dos experimentos com PID4 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

Os resultados para a pista retangular são mostrados nas Figuras 61, 62, 63 e 64. Comparando com os demais controladores PID, a amplitude da distância permaneceu entre -15 e $+15$ mm na maior parte do tempo de experimento. Esse comportamento pode ser observado também para os experimentos que não deram certo, para as cargas de 2 kg , Figura 63, e de 3 e 4 kg , Figura 64. A amplitude do ângulo foi reduzida significativamente em comparação com os controladores anteriores, se concentrando mais no intervalo entre $\pm 10^\circ$.

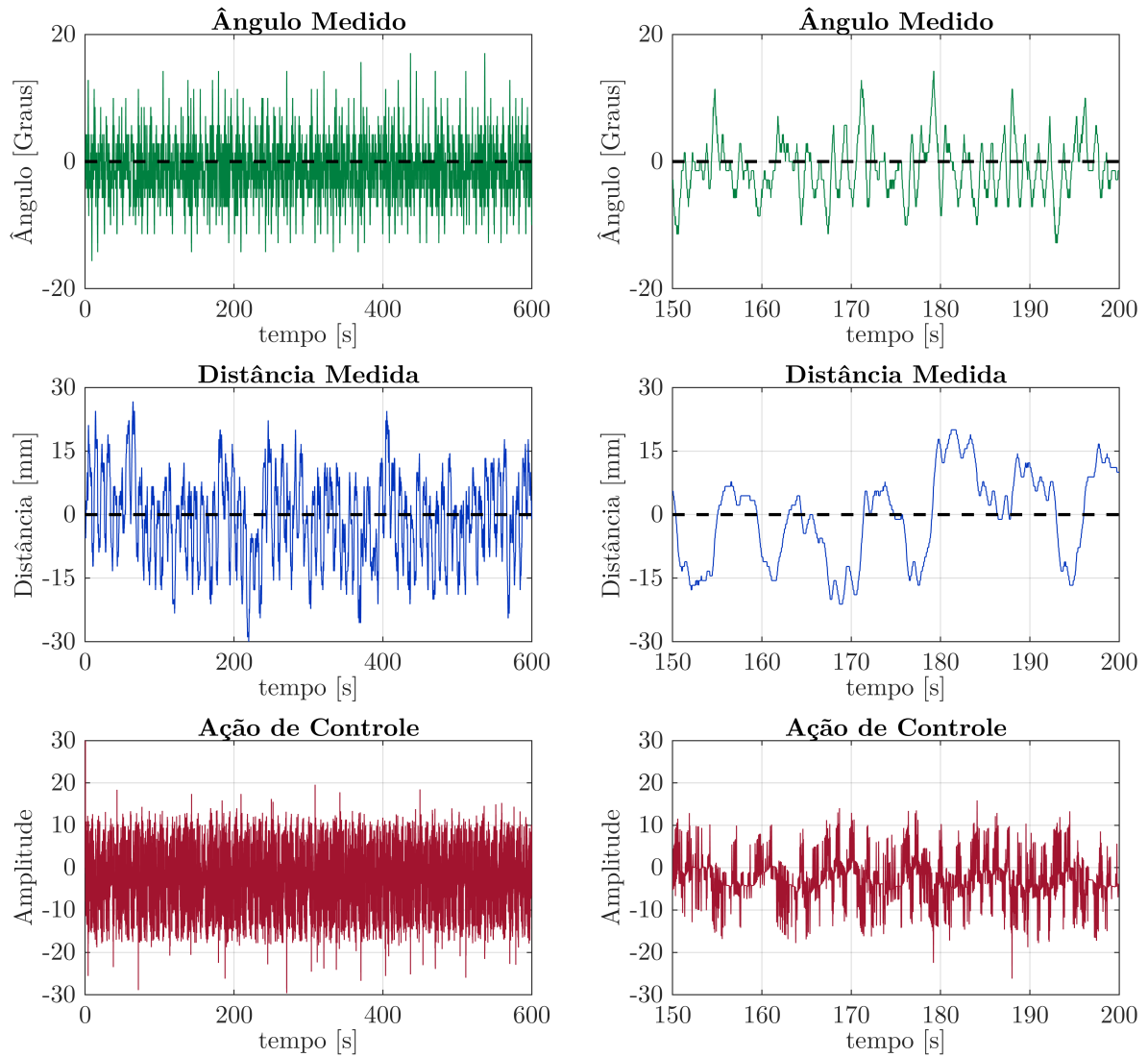


Figura 61 – Resultados do controlador PID4 para o AGV a vazio no cenário pista retangular.

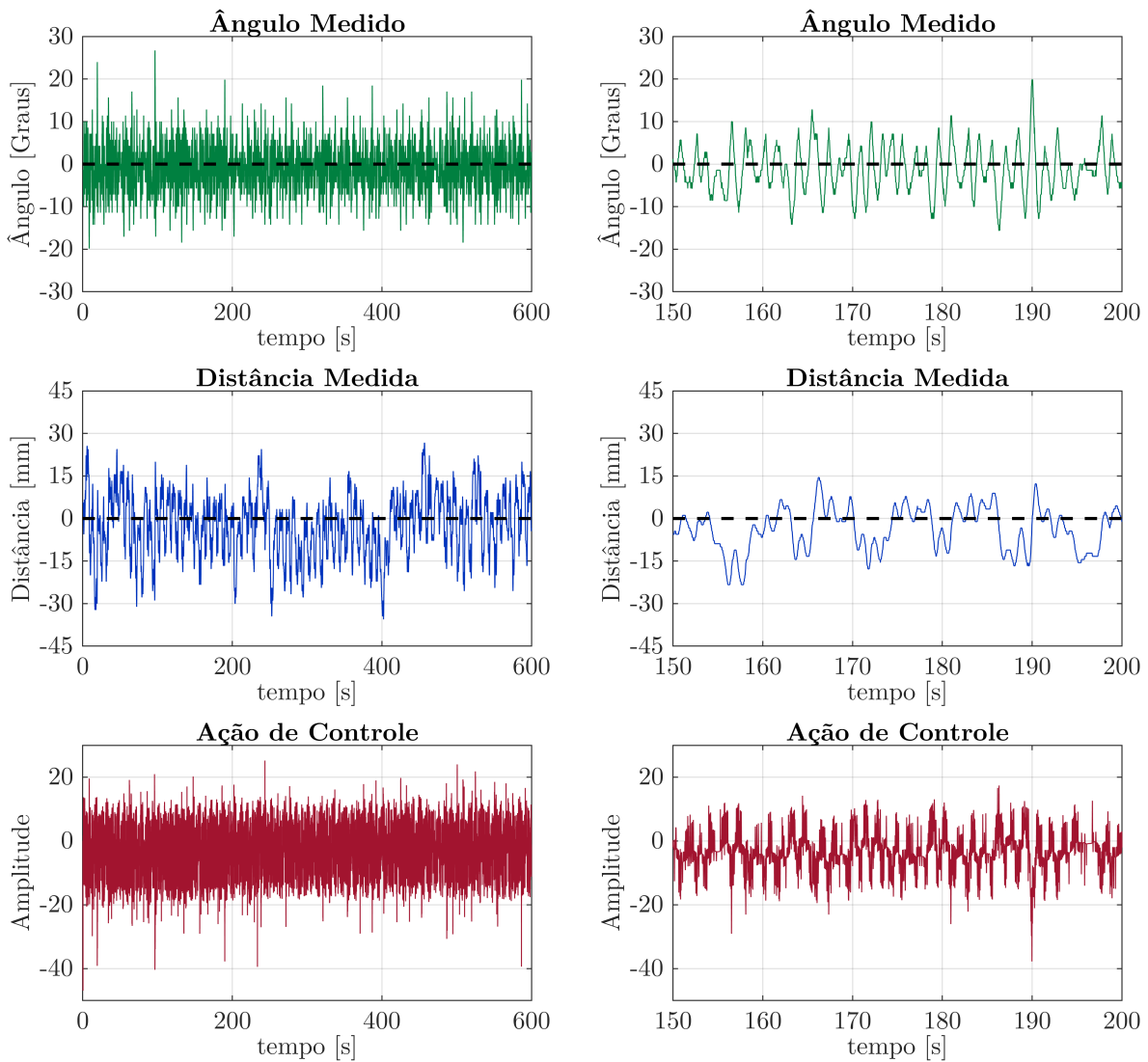


Figura 62 – Resultados do controlador PID4 para o AGV com carga de 1 kg no cenário pista retangular.

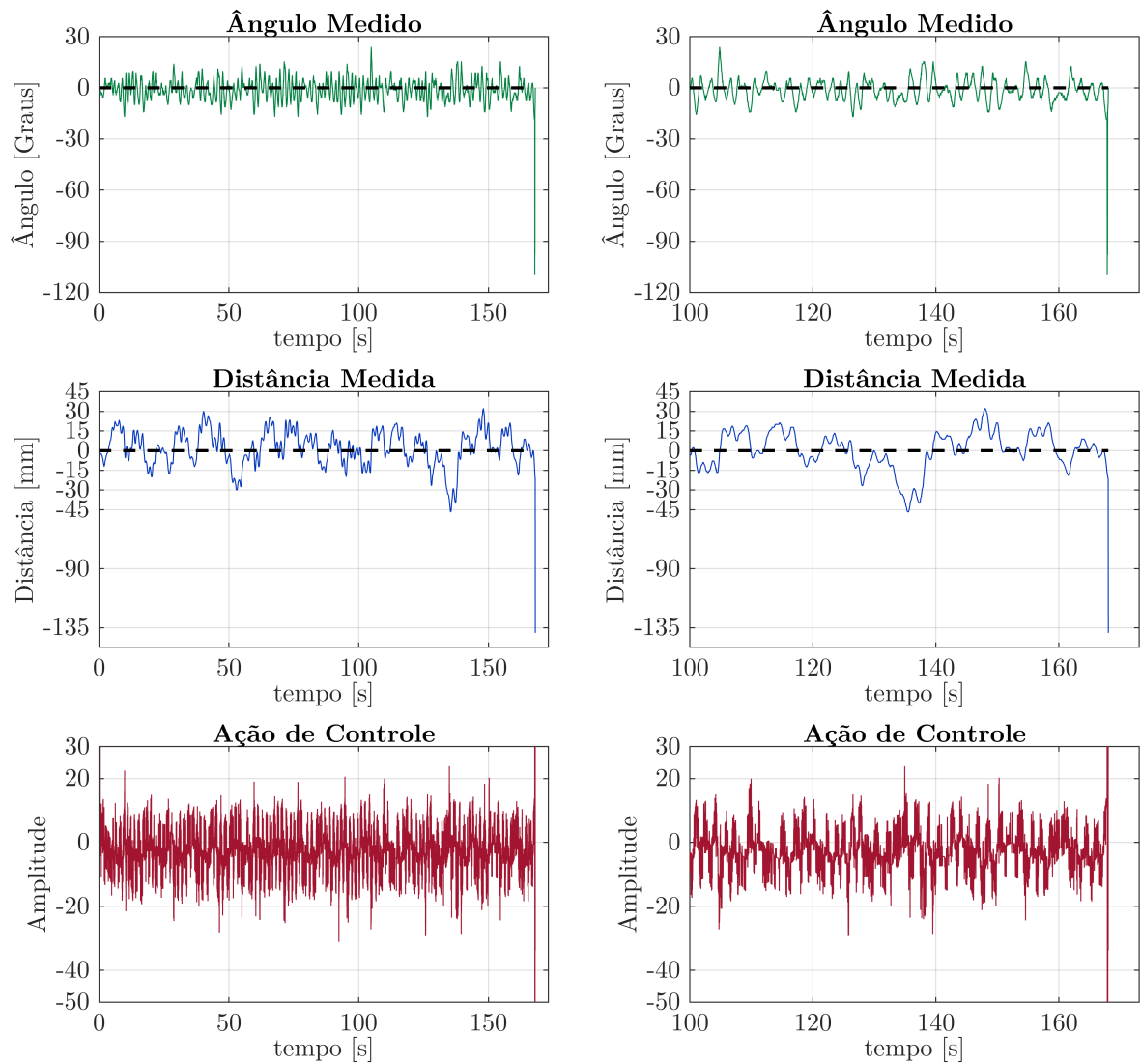


Figura 63 – Resultados do controlador PID4 para o AGV com carga de 2 kg no cenário pista retangular.

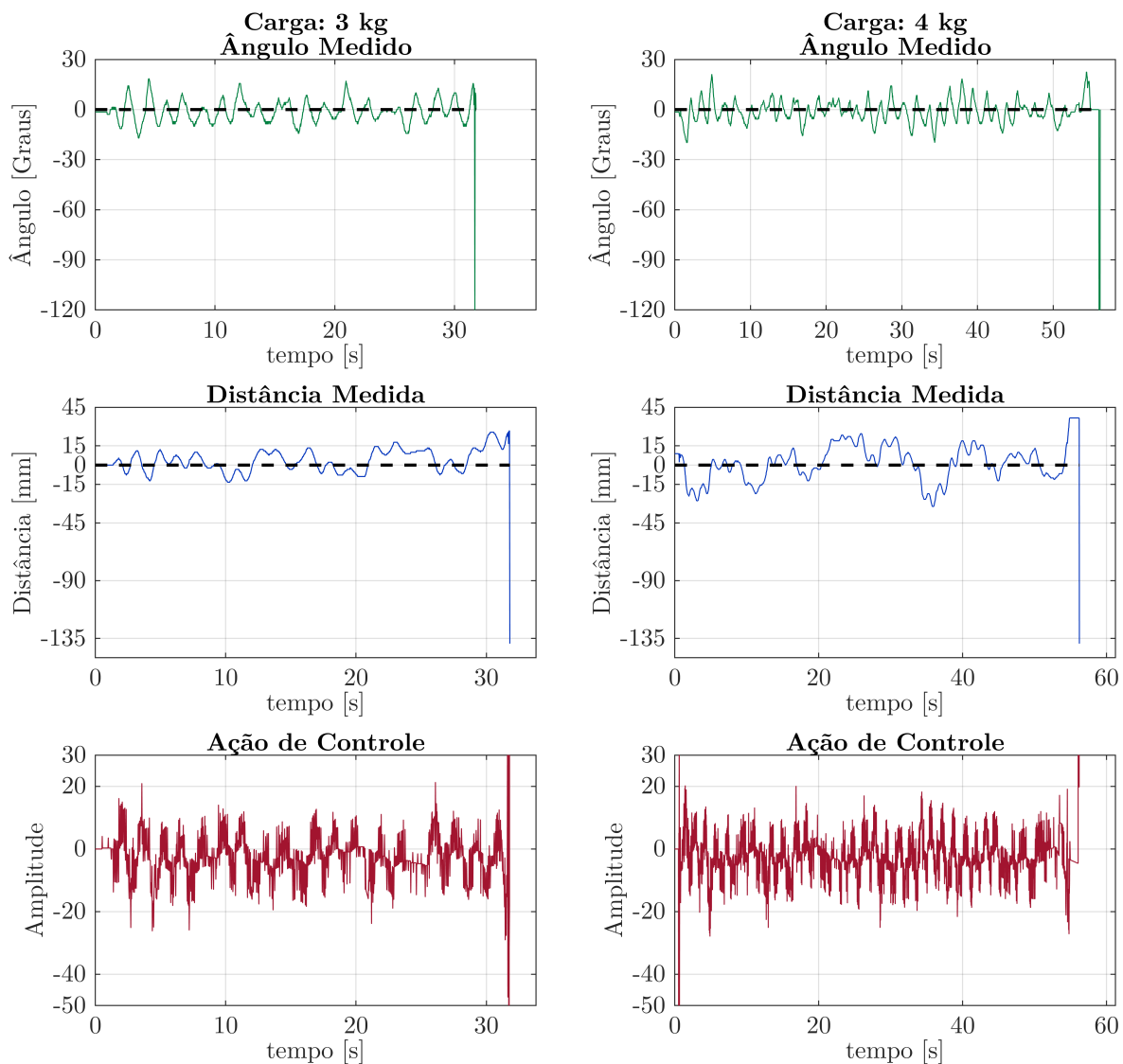


Figura 64 – Resultados do controlador PID4 para o AGV com cargas de 3 *kg* e 4 *kg* no cenário pista retangular.

5.3.2 Controladores Fuzzy

Com a implementação gradual dos controladores, novas variáveis foram medidas a nada novo FIS adicionado à cascata. Os resultados a seguir mostram os valores resultantes de ângulo e distâncias medidos pelo AGV e ação de controle relativa ao controlador em questão. As demais variáveis envolvidas em cada sistema de controle são apresentadas no Apêndice C para consulta.

5.3.2.1 Fuzzy1a

Como não há malha de controle de velocidade para compensar o efeito da carga e com a velocidade de referência definida de 20% da capacidade do *driver* de potência dos

motores, a locomoção do AGV com a carga de 1 kg foi degradada e a partir de 2 kg o AGV não se locomoveu. Durante os ensaios na pista reta, o veículo teve dificuldades de completar o percurso já com a carga de 1 kg . Por esse motivo, serão apresentados apenas os resultados para o AGV a vazio nesse cenário, como mostra a Figura 65.

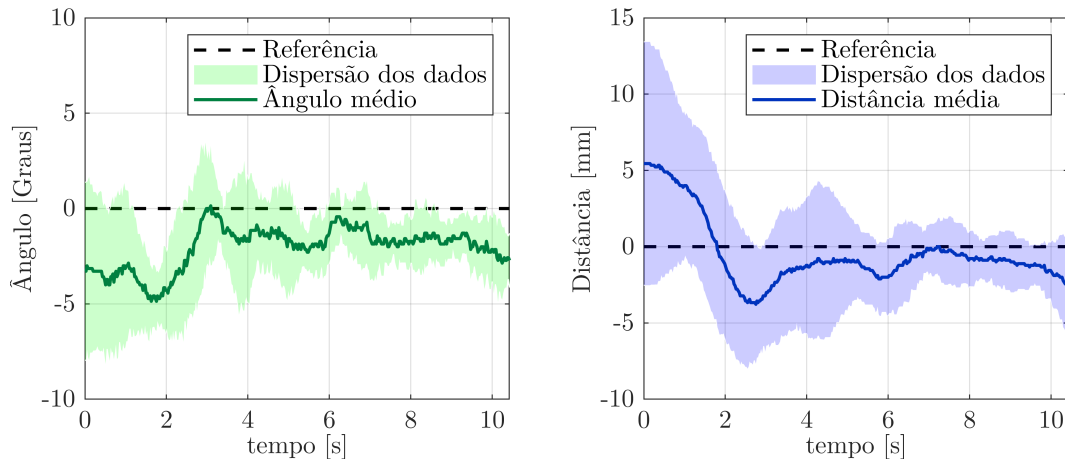


Figura 65 – Resultados dos experimentos com Fuzzy1a na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para condição a vazio.

O gráfico do ângulo medido mostra que a dispersão das medições do ângulo ao longo do percurso diminui. Isso significa que, nos ensaios realizados, o controlador conseguiu fazer convergir essa medição para uma faixa estreita entre -5° e 0° . Lembrando que o ângulo negativo significa que o ângulo de orientação do AGV tende à direita em relação à pista.

Para a medição da distância, a dispersão inicial entre -5 e 15 mm se dá pela posição inicial do AGV nos ensaios não ser fixada. Por isso, a cada ensaio, o veículo parte de um ponto de repouso com distância diferente de zero. A mesma observação pode ser feita para o ângulo inicial do AGV.

E de forma similar ao ângulo, a distância representada pela dispersão dos dados também converge. Dado o tamanho limitado da pista e o número de ensaios, a tendência mostrada no gráfico é de uma oscilação no sentido de aumentar tanto o valor médio da distância quando a dispersão de dados. Nesse ponto, o ensaio se encerra pois a pista termina. Dessa forma, o comportamento indica que o tempo de acomodação do sistema é maior do que o tempo que o AGV leva para completar o percurso, ou o regime permanente do sistema apresentará oscilações.

As Figuras 66 e 67 apresentam os resultados do sistema de controle da Figura 34(a) para a condição a vazio e com 1 kg de carga. Com o movimento limitado, o AGV entrou em condições de aumento demasiado da corrente dos motores, causando a interrupção do ensaio. Esse comportamento pode ser observado na Figura 67 entre 30 e 40 s, por exemplo, quando há um platô nos gráficos, indicando que o AGV ficou imóvel, com os

motores travados. Por esse motivo, as demais cargas não foram ensaiadas.

A Tabela 16 mostra os valores dos indicadores de desempenho calculados para os ensaios das Figuras 66 e 67. Observe que o número de amostras e o tempo decorrido do ensaio para a carga de 1 kg é muito menor do que para o ensaio a vazio. Com isso, os indicadores, principalmente aqueles que penalizam ao longo do tempo, apresentam valores que não podem ser diretamente comparados.

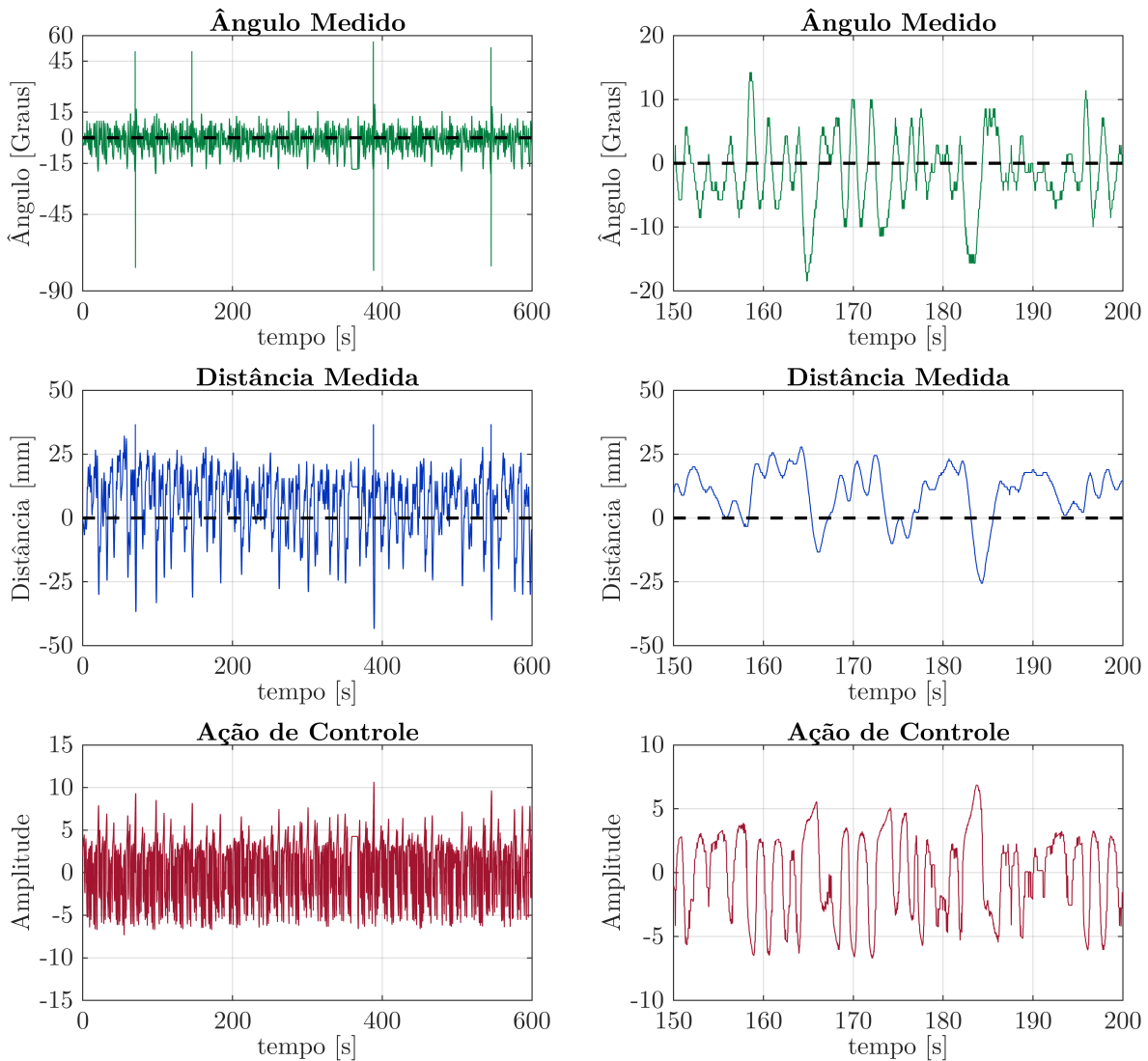


Figura 66 – Resultados do controlador Fuzzy1a, com entradas de ângulo e distância medidos. AGV a vazio no cenário pista retangular.

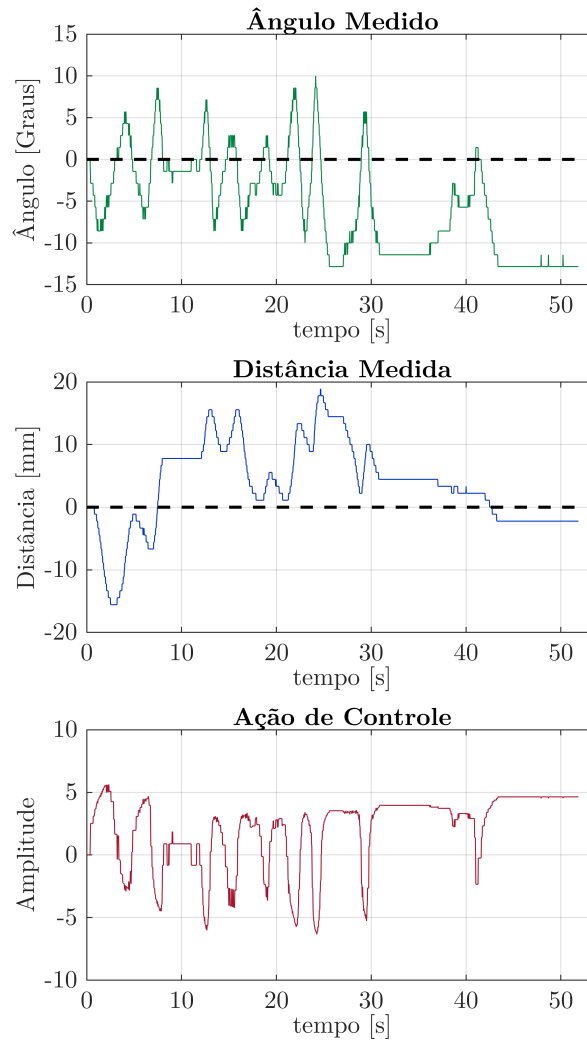


Figura 67 – Resultados do controlador Fuzzy1a, com entradas de ângulo e distância medidos. AGV com carga de 1 kg no cenário pista retangular.

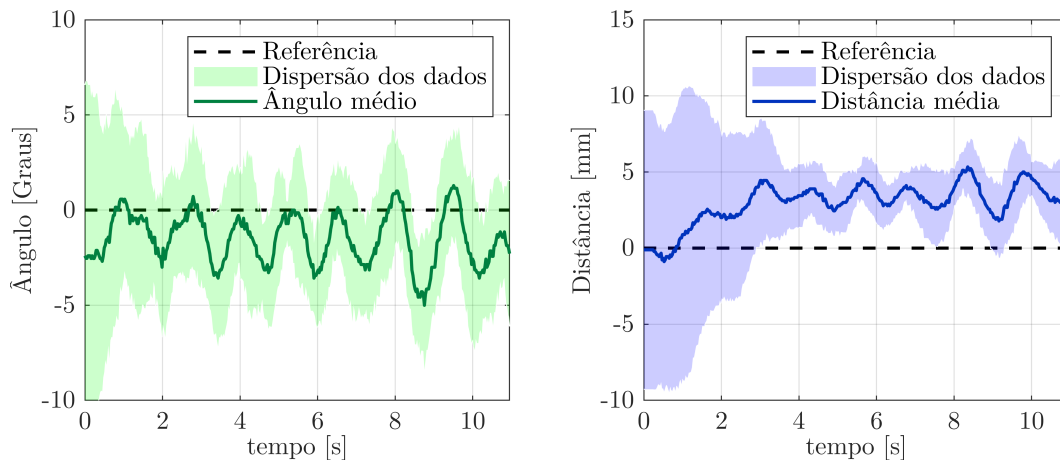
5.3.2.2 Fuzzy1b

Com a implementação da malha de controle da Figura 34(b), a velocidade dos motores passa a ser medida pelos encoders e ser controlada por um controlador PID.

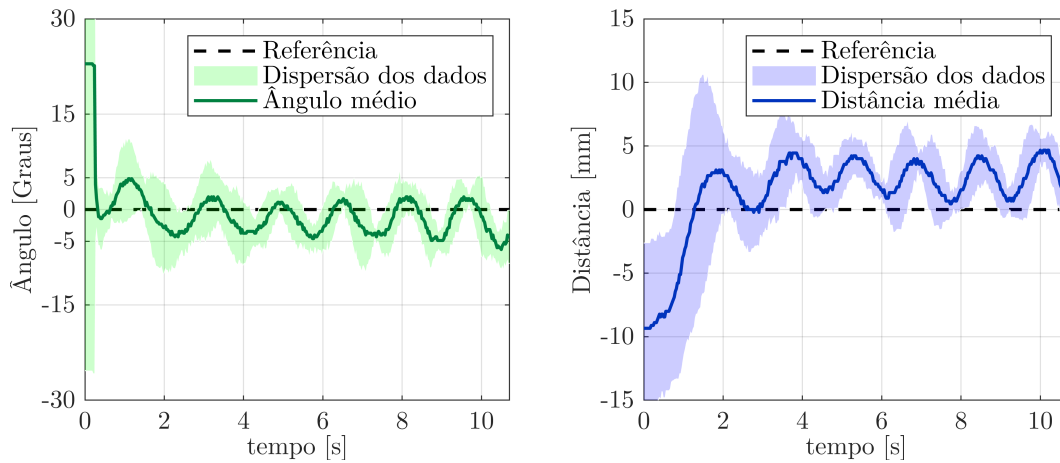
As Figuras 68 e 69 apresentam os resultados dos ensaios na pista reta. Como pode-se observar para o ângulo medido, o aumento de carga não causa uma aumento significativo na dispersão dos valores dos ensaios, embora haja um aumento na oscilação do comportamento médio seguindo o aumento da carga.

Em relação á distância medida, os valores médios mantiveram-se no intervalo entre 0 e 5 mm aproximadamente durante todo o tempo dos ensaios. A região da dispersão sofreu variações de uma condição de carga para outra, sendo maior para as três maiores cargas, mas, ainda assim, com valores não muito maiores do que o intervalo citado anteriormente.

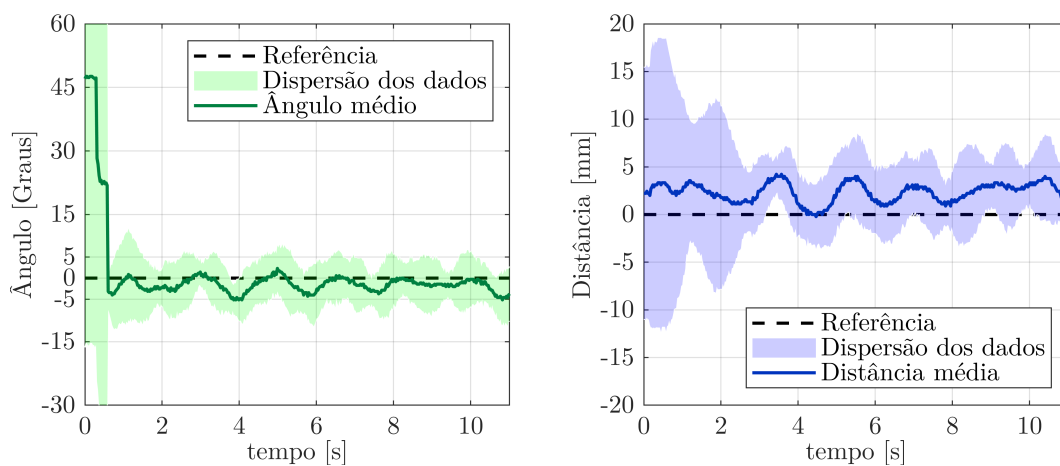
As Figuras de 70 a 74 apresentam os resultados do controlador ensaiado na pista retangular para as faixas de carga de 0 a 4 kg , respectivamente. O comportamento do



(a) AGV a vazio.

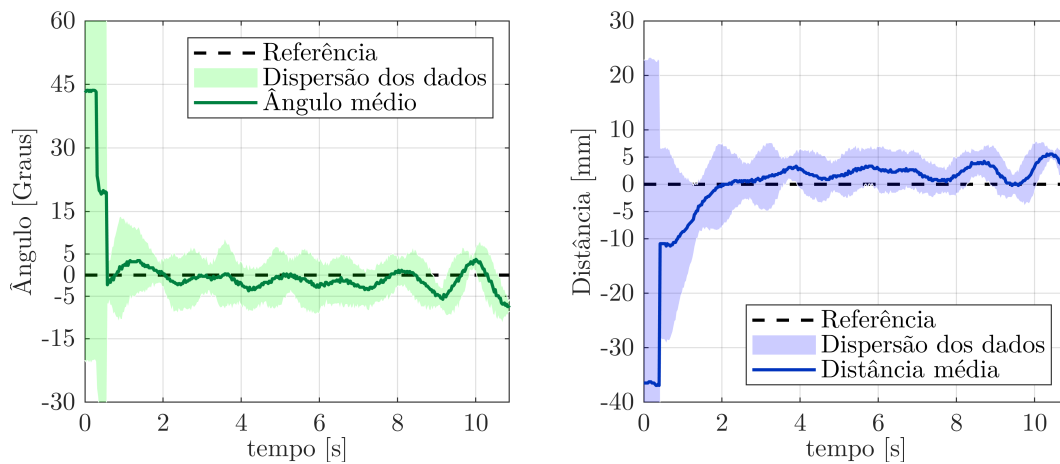


(b) AGV com carga de 1 kg.

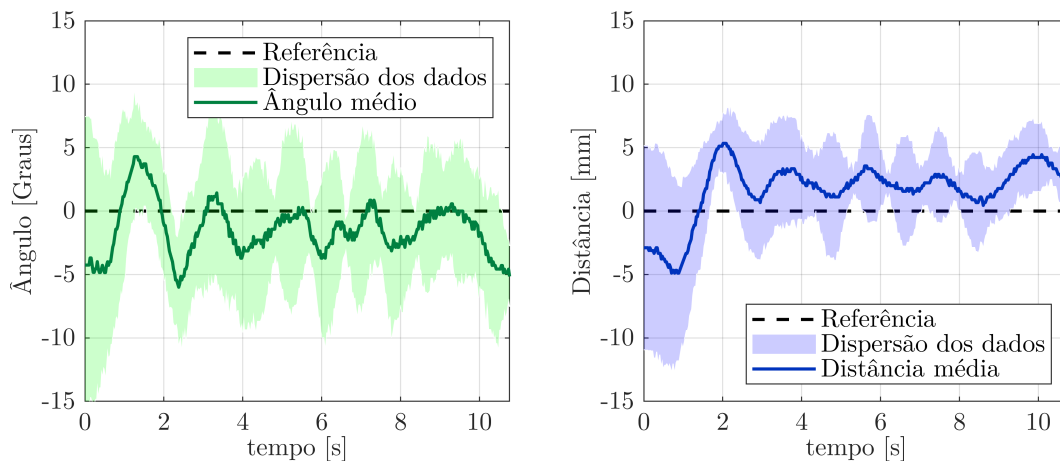


(c) AGV com carga de 2 kg.

Figura 68 – Resultados dos experimentos com Fuzzy1b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.



(a) AGV com carga de 3 kg.



(b) AGV com carga de 4 kg.

Figura 69 – Resultados dos experimentos com Fuzzy1b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

AGV ao longo da pista pode ser notado no gráfico detalhado da medição da distância na Figura 70. O perfil do gráfico indica que o AGV busca a referência nas retas, ou seja, nos intervalos de tempo em que a medição da distância é mais próxima de zero. No momento das curvas, a distância medida pelo veículo passa a figurar próximo aos 15 mm, sendo a oscilação nesse nível causada pela compensação da posição do veículo. Após uma curva, o AGV busca novamente o zero no trecho reto da pista retangular.

Comparando os resultados das Figuras 70, 71 e 72, percebe-se que o incremento na carga degrada o desempenho do controlador em relação à maior amplitude da distância medida, ou seja, maior erro é percebido no deslocamento do veículo à medida que a carga aumenta. Apesar disso, o AGV completou os ensaios, permanecendo na pista pelo tempo determinado. Também é possível observar um aumento na amplitude do ângulo de orientação, embora seja menor, proporcionalmente, do que o aumento na amplitude da distância medida.

Entretanto, para as carga de 3 kg e 4 kg, Figuras 73 e 74, a resposta do controlador, mesmo que degradada, se mostrou similar às condições anteriores, apesar da interrupção do controle dado pelo aumento da corrente dos motores.

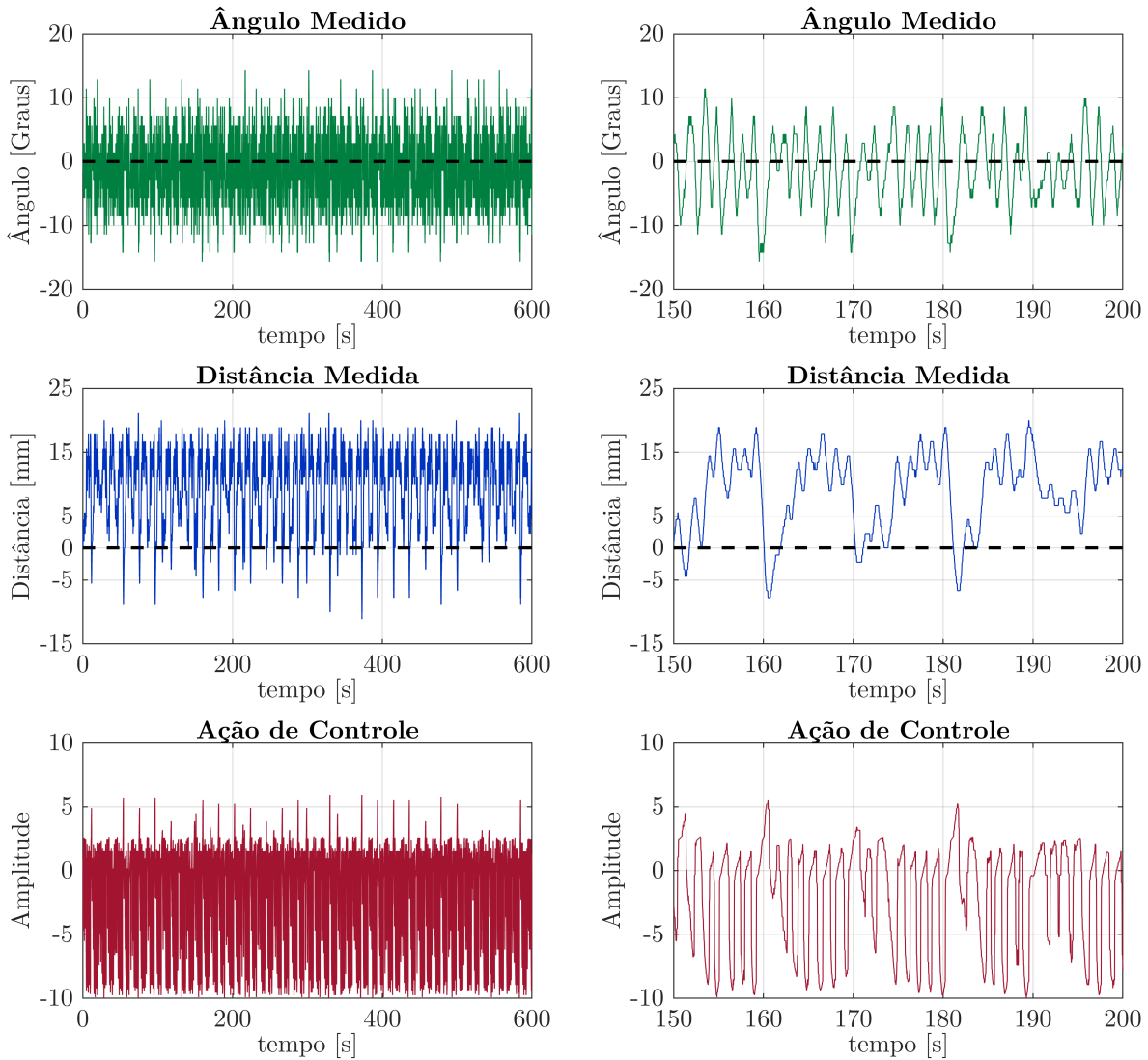


Figura 70 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV a vazio no cenário pista retangular.

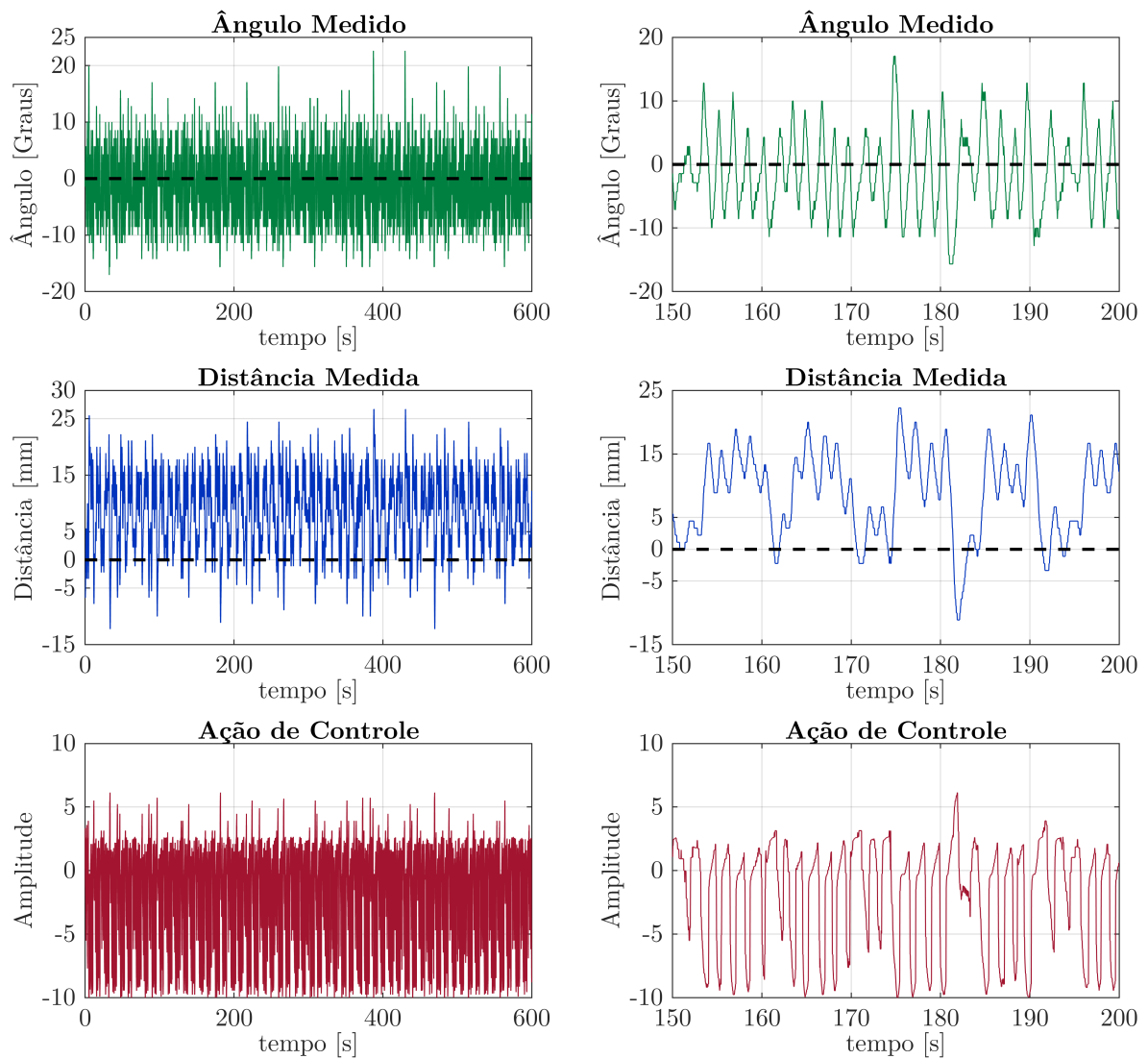


Figura 71 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 1 kg no cenário pista retangular.

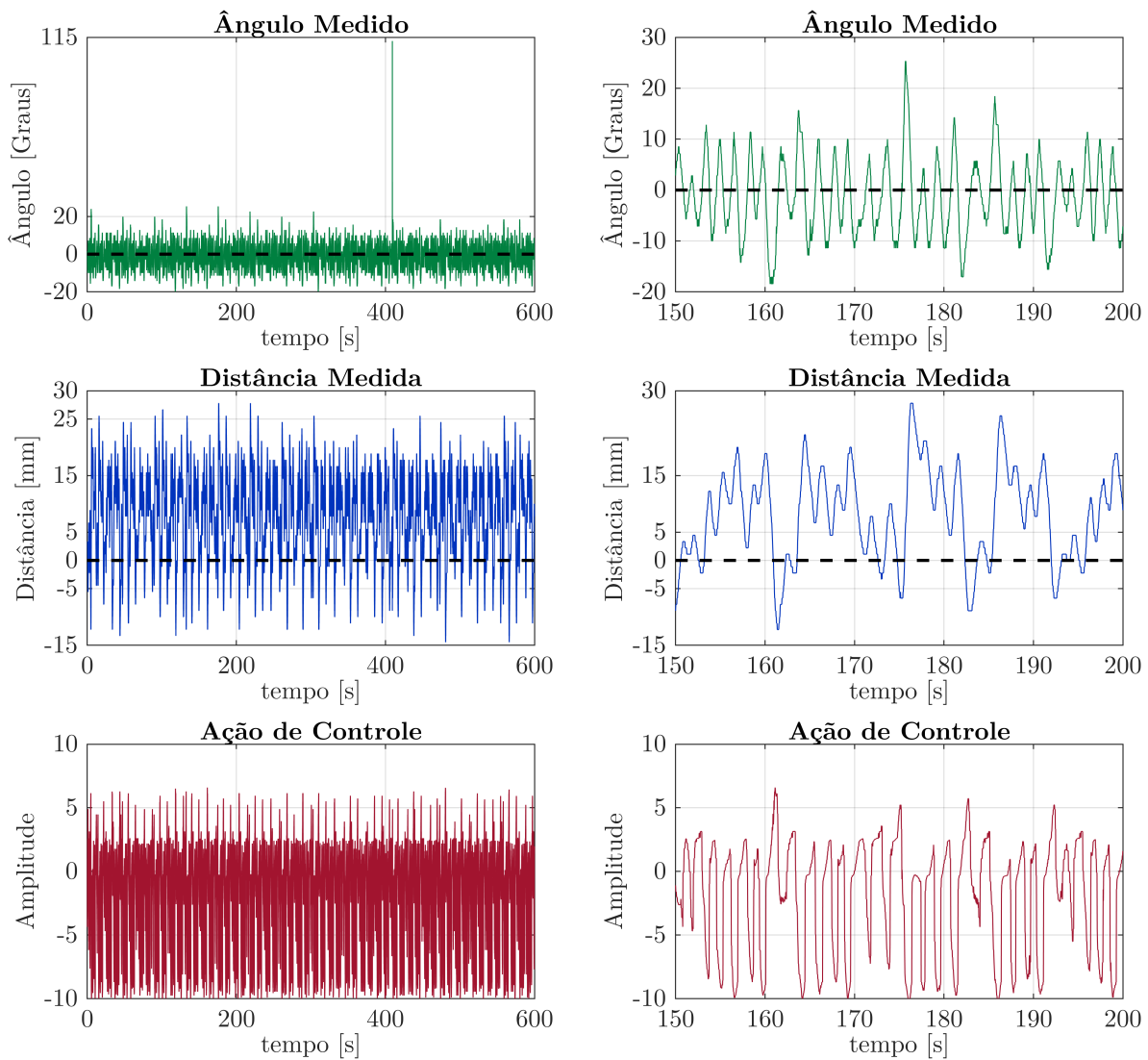


Figura 72 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 2 kg no cenário pista retangular.

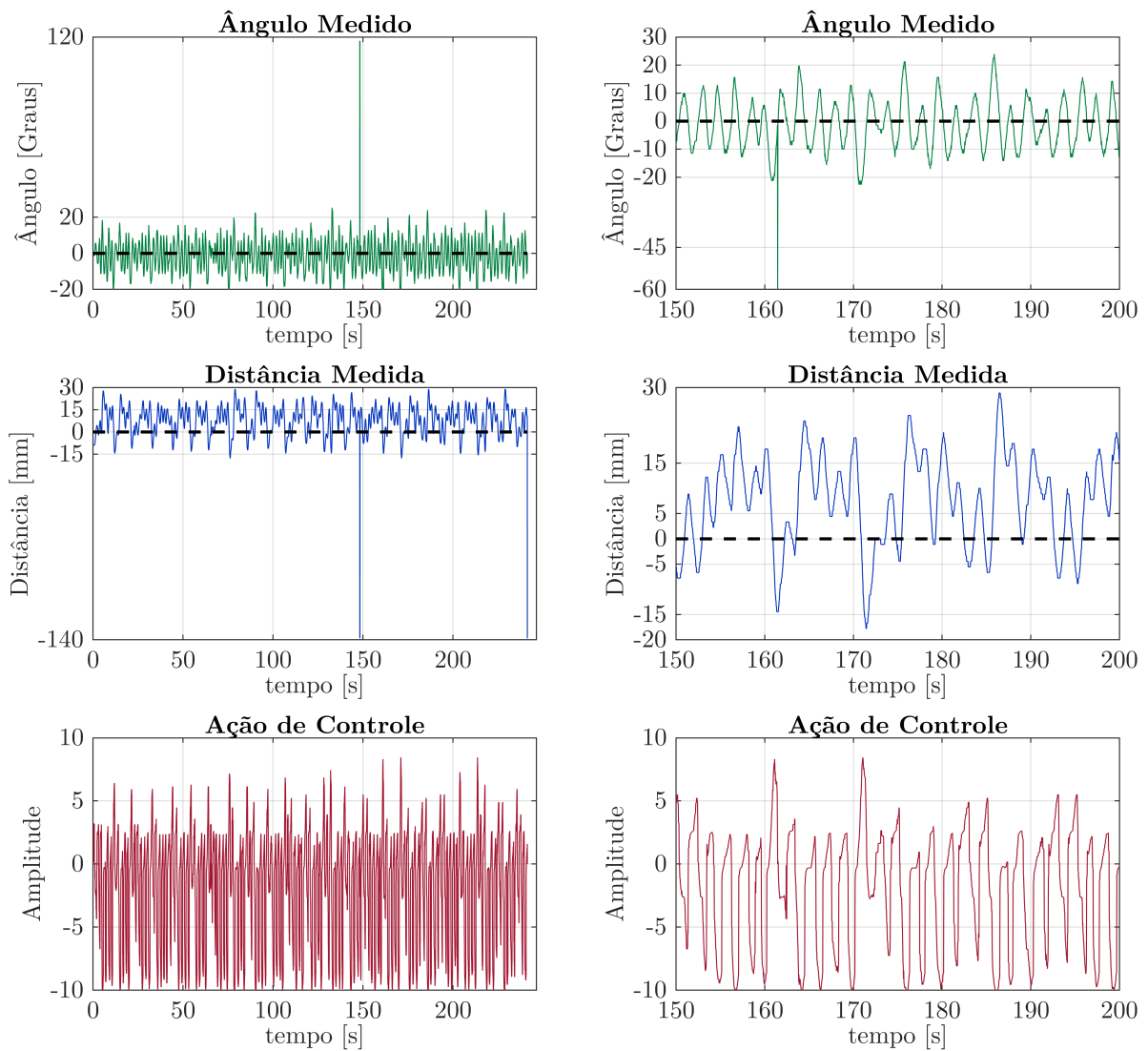


Figura 73 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 3 kg no cenário pista retangular.

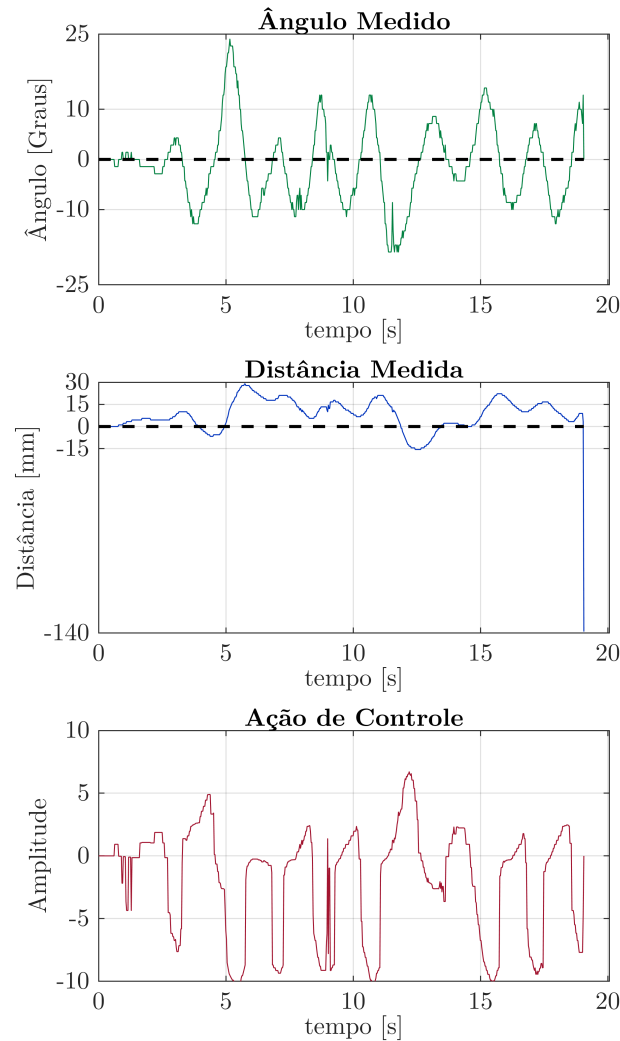


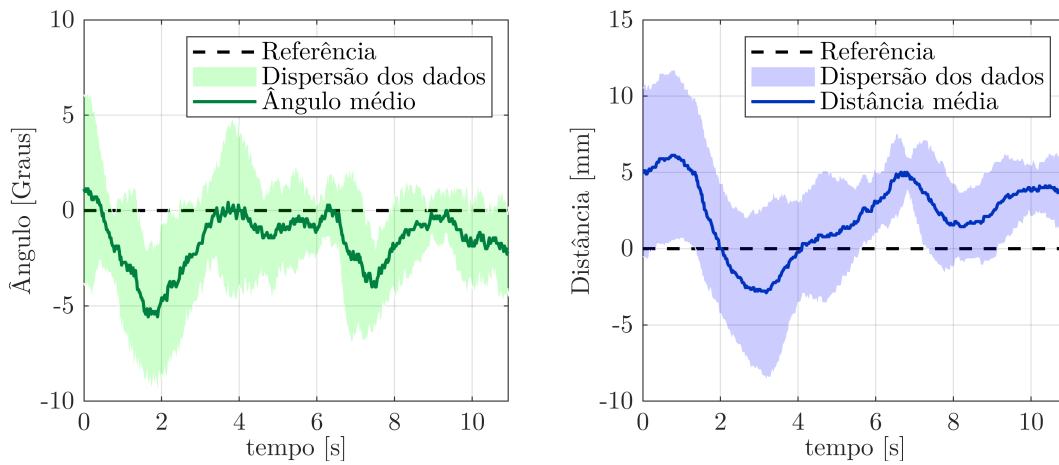
Figura 74 – Resultados do controlador Fuzzy1b, com entradas de ângulo e distância medidos, com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 4 kg no cenário pista retangular.

5.3.2.3 Fuzzy2a

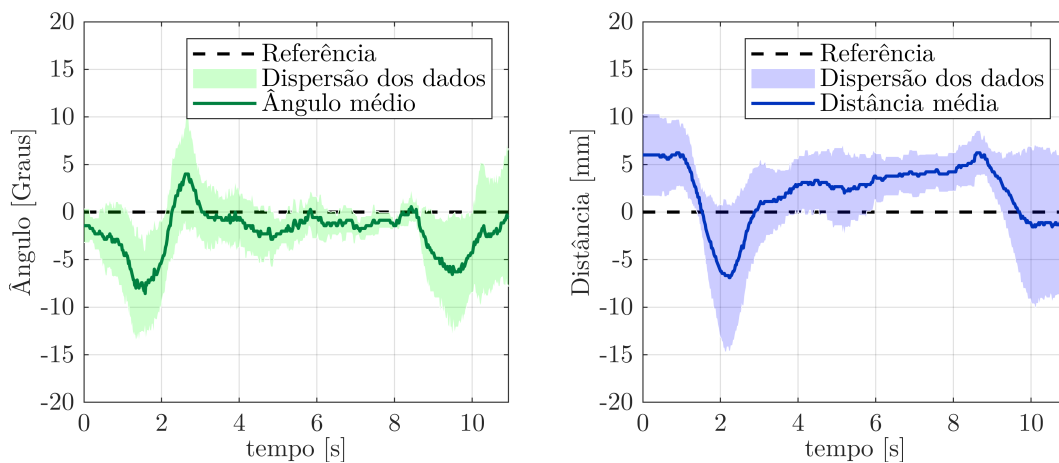
O sistema de controle fuzzy implementa a malha de controle da Figura 37(a), que além das medições de ângulo e distância, considera como entradas suas taxas de variação. A Figura 75 mostra os resultados experimentais para o cenário da pista reta nas condições a vazio e com carga de 1 kg. Analisando-se esses gráficos, pode-se observar que a sintonia do controlador tem uma tolerância menor para o erro do ângulo de orientação do AGV do que para o erro de distância.

Em ambas as condições de carga, há um intervalo de tempo no qual o ângulo é mantido em um nível próximo de zero, mas a distância sofre uma variação crescente. Para a condição a vazio, o intervalo de tempo é de, aproximadamente, 4 até 6 s. Nesse intervalo a distância varia entre 0 e, aproximadamente, 5 mm. De forma similar, para carga de 1 kg, o intervalo de tempo em que se observa o comportamento se inicia em, aproximadamente

3 s e termina pouco depois dos 8 s. E da mesma forma, a distância varia cerca de 5 mm, enquanto o ângulo é mantido próximo de zero.



(a) AGV a vazio.



(b) AGV com carga de 1 kg.

Figura 75 – Resultados dos experimentos com Fuzzy2a na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

As Figuras 76 e 77 mostram os resultados experimentais para a pista retangular. Comparando-se com os sistemas de controle anteriores, há uma redução na amplitude da distância em relação á faixa guia medida, enquanto a amplitude do ângulo de orientação do AGV é similar. Entretanto, com as características das entradas do FIS2, há um incremento na oscilação do veiculo que pode ser vista pelo aumento na variação registrada para ângulo, distância e ação de controle se comparados com os sistemas anteriores para o mesmo intervalo de tempo.

Por ser uma malha de controle simples, sem a realimentação das velocidades dos motores, o AGV não é capaz de se locomover em todas as faixas de carga. Na Figura 77, pode-se observar que, após os 100 s, há um intervalo em que o AGV fica imóvel, não tendo potência suficiente para se mover. E então o ensaio é encerrado pelo efeito do aumento

da corrente dos motores.

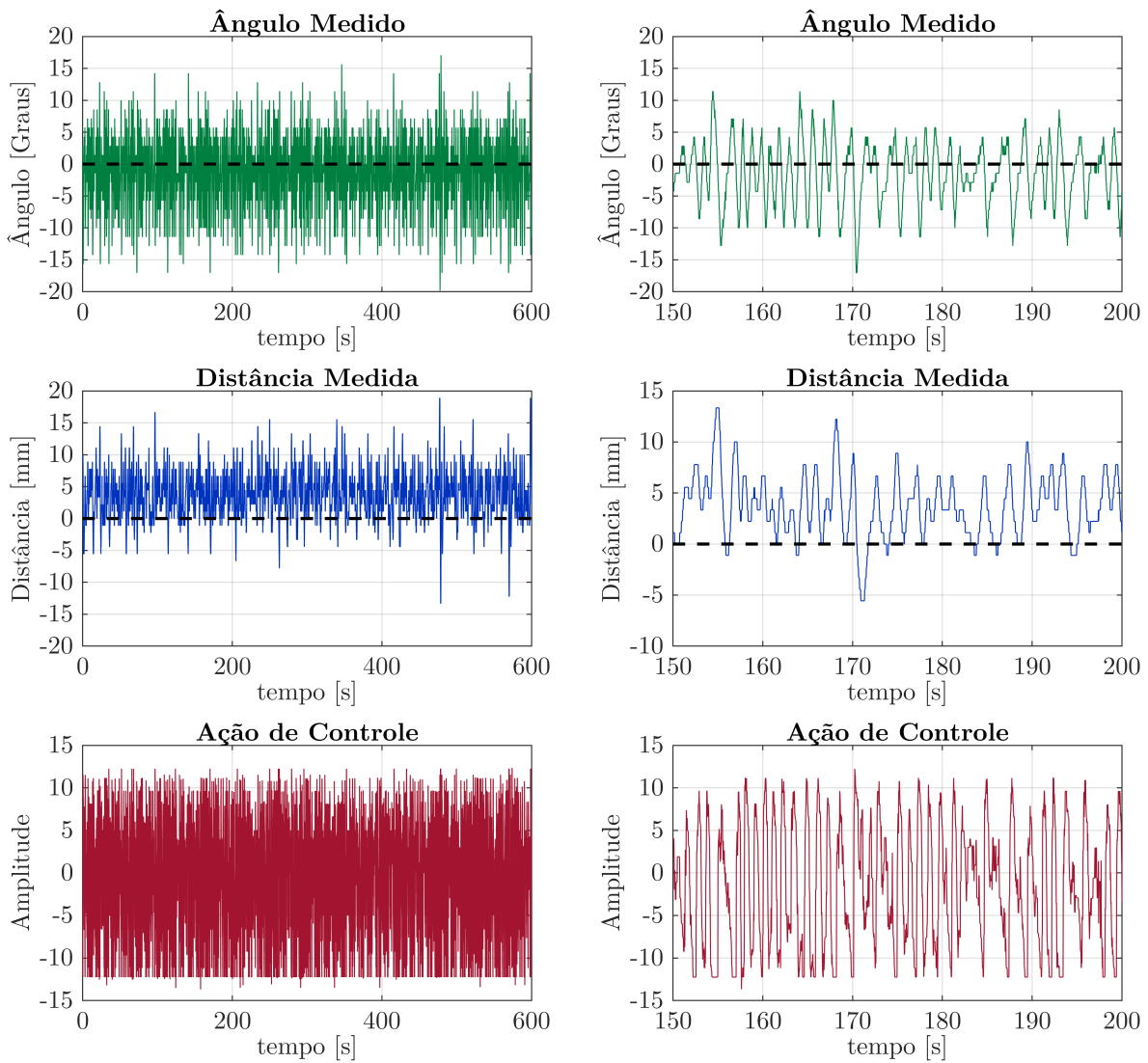


Figura 76 – Resultados do controlador Fuzzy2a da Figura 37(a). AGV a vazio no cenário pista retangular.

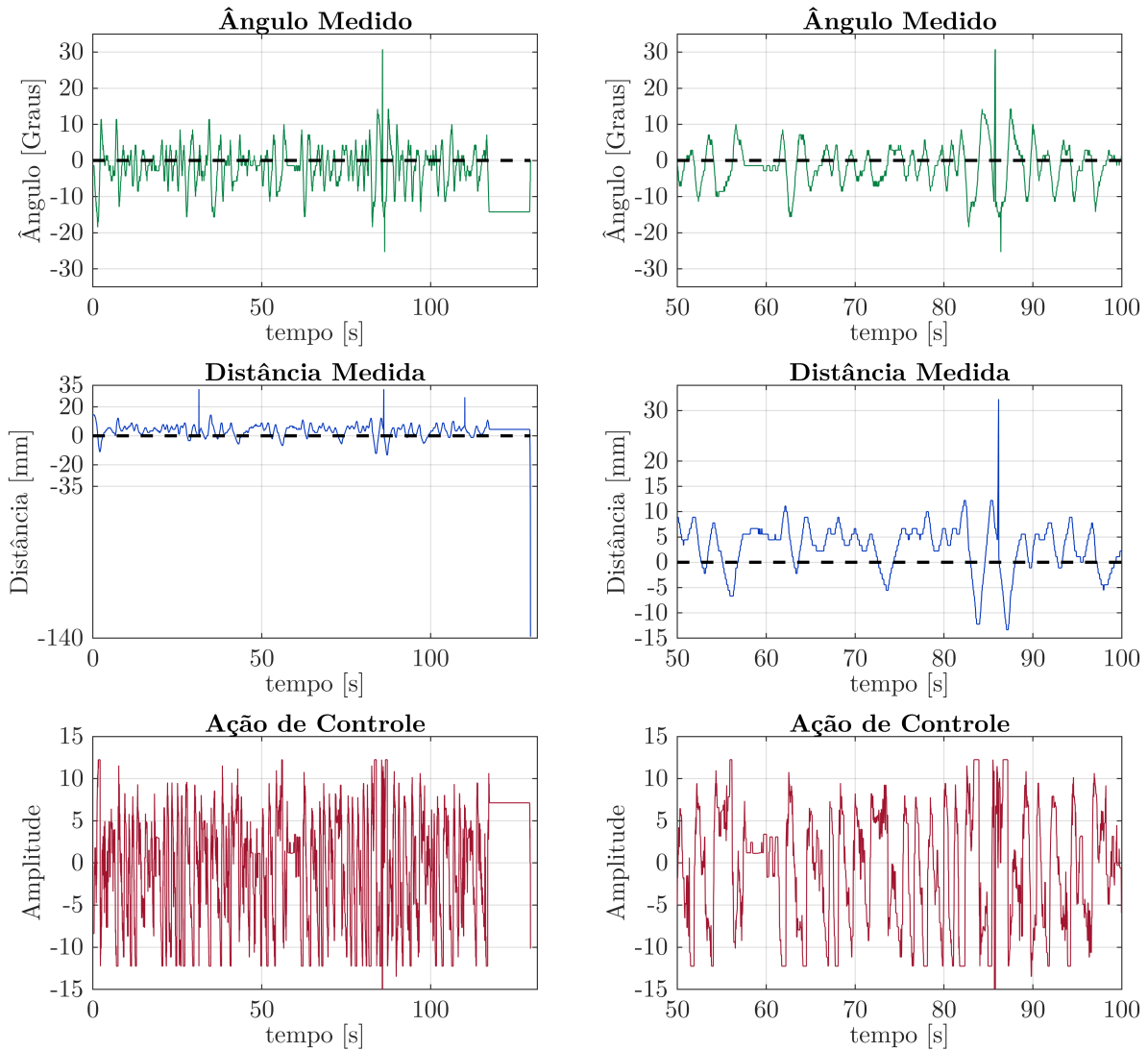


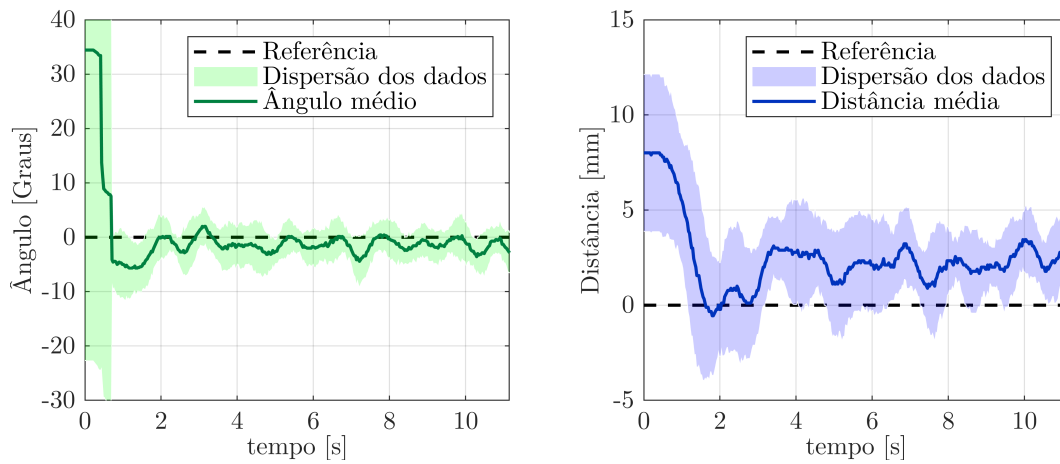
Figura 77 – Resultados do controlador Fuzzy2a da Figura 37(a). AGV com carga de 1 *kg* no cenário pista retangular.

5.3.2.4 Fuzzy2b

O controlador Fuzzy2b é resultado da junção do controlador fuzzy em cascata de FIS1 e FIS2 e o controle de velocidade dos motores. Os resultados para a pista reta são apresentados nas Figuras 78 e 79 para todas as faixas de carga. Os gráficos para o ângulo medido mostram uma baixa dispersão dos dados em comparação com o valor médio, significando que em todos os experimentos o AGV teve comportamento similar. Há um ligeiro aumento na dispersão nos últimos segundos de ensaio para as cargas de 2 e 4 *kg*, mas todos os ensaios se mantêm em uma faixa de $\pm 10^\circ$, em alguns casos mantendo-se até entre $\pm 5^\circ$.

Para a distância, a distância média mostrou que, para todas as faixas de carga, há um deslocamento positivo do zero. Para todas as condições, a distância medida está

contida no intervalo de $\pm 5 \text{ mm}$. Como observado nos resultados de outros controladores, o aumento da carga na plataforma do AGV causa um aumento na dispersão dos dados.



(a) AGV a vazio.

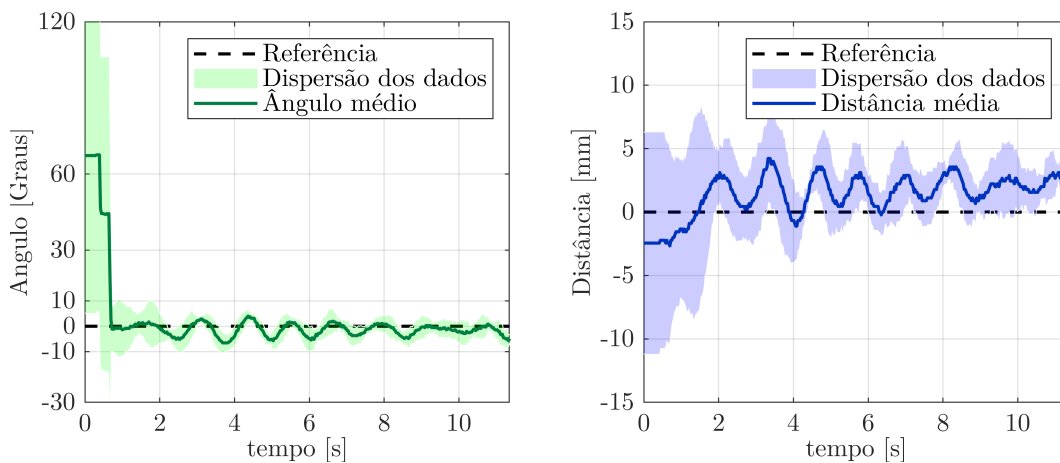
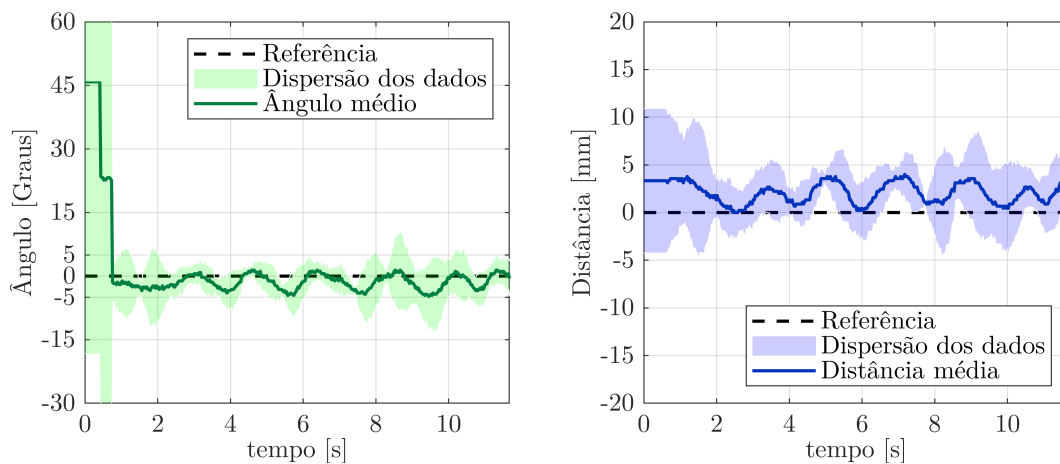
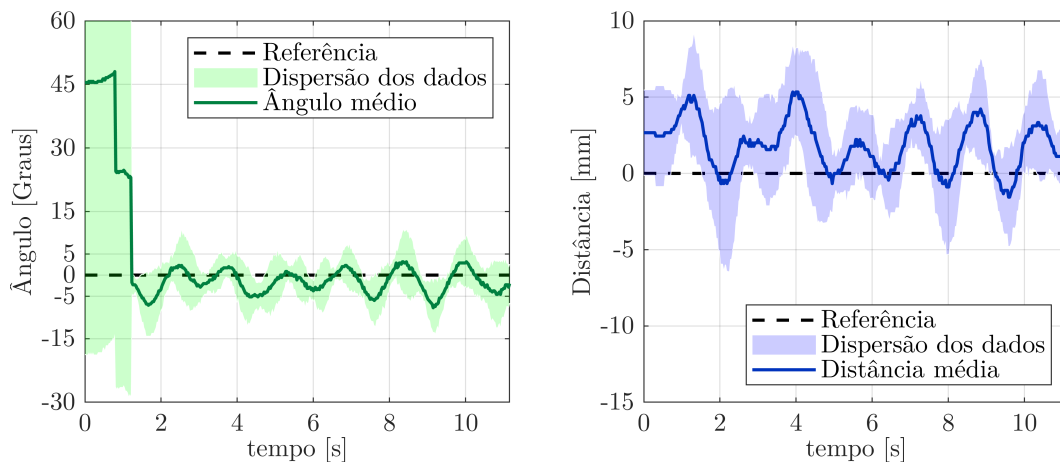
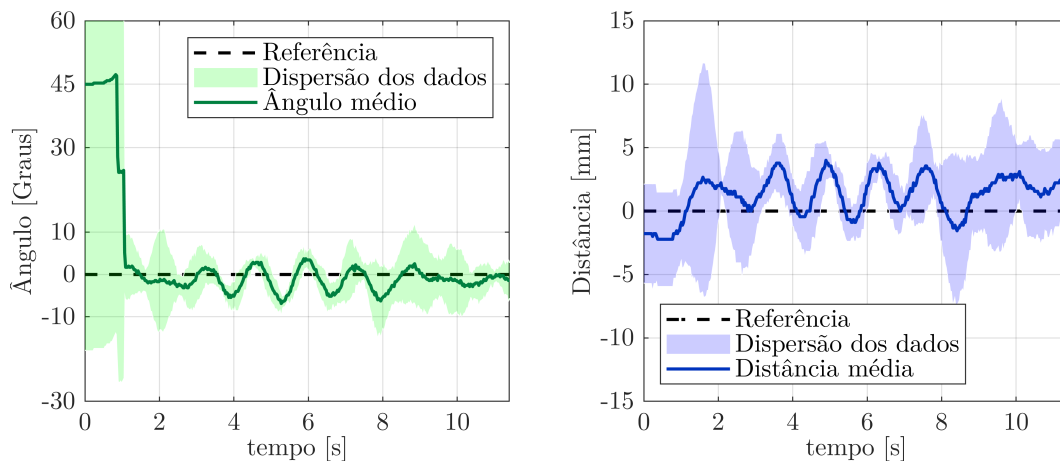
(b) AGV com carga de 1 *kg*.(c) AGV com carga de 2 *kg*.

Figura 78 – Resultados dos experimentos com Fuzzy2b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.



(a) AGV com carga de 3 kg.



(b) AGV com carga de 4 kg.

Figura 79 – Resultados dos experimentos com Fuzzy2b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

Os resultados gráficos mostrados nas Figuras de 80 a 84 são similares ao controlador anterior, com o ângulo medido concentrado no intervalo entre $\pm 15^\circ$ e a distância entre -5 e 20 mm. O desempenho do controlador para as faixas de carga entre 0 e 2 kg difere mais em relação no surgimento de picos maiores de ângulo e distância medidos para a carga de 2 kg, que significam um deslocamento maior do veículo e a necessidade de ângulos mais acentuados para correção da posição.

Entretanto, com o aumento da carga para 3 e 4 kg, o movimento do veículo torna-se mais oscilatório a ponto de, eventualmente, o veículo perder a referência da linha. Na Figura 83, o veículo apresenta alguns picos de distância medida próximos à 40 mm. Após 150 s, esse deslocamento demasiado causa a perda da referência e a parada do AGV. Já na Figura 84, mesmo sem apresentar picos anteriores próximos ao limite de distância, após 200 s o AGV perde a referência por se afastar da faixa guia.

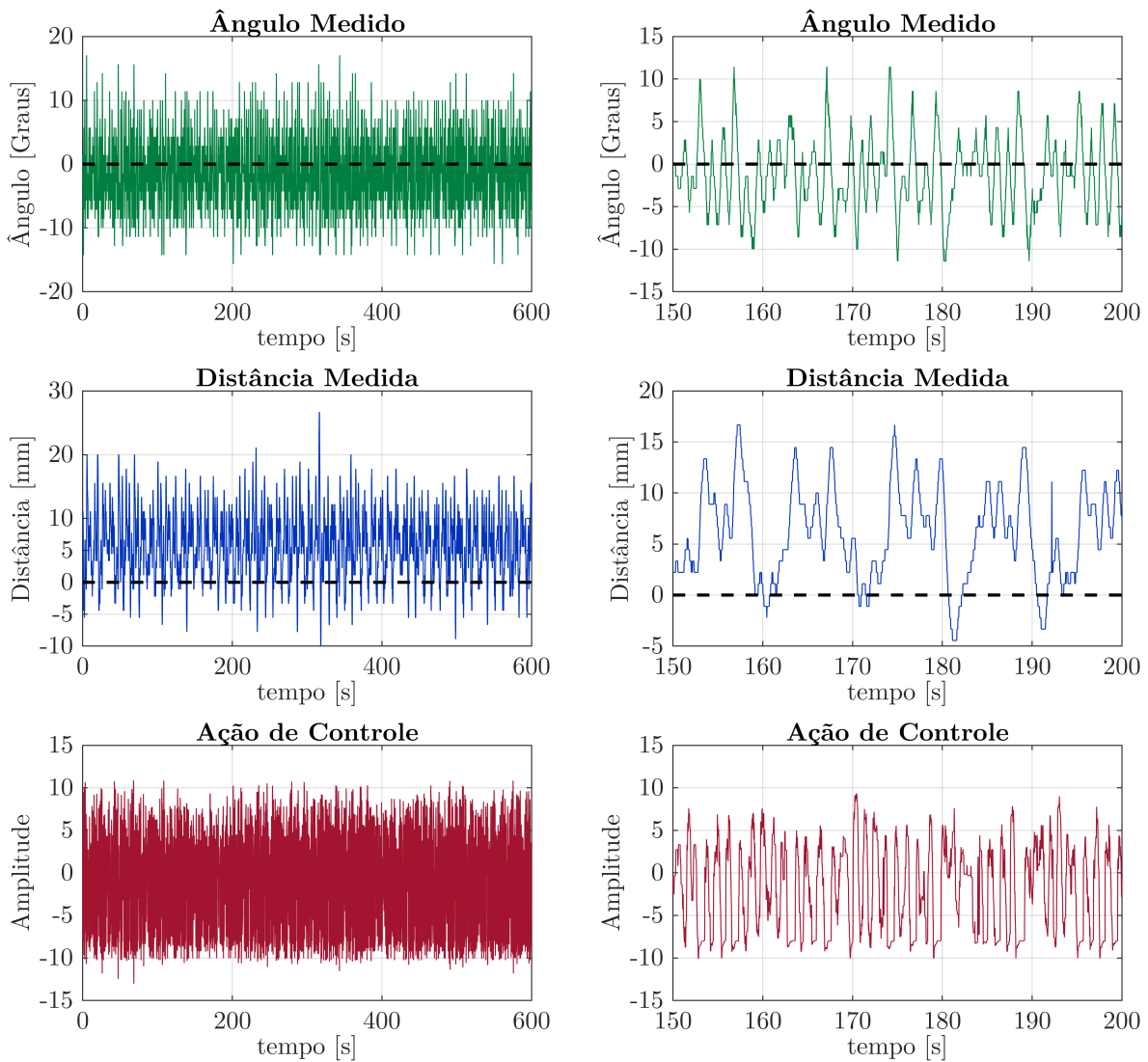


Figura 80 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV a vazio no cenário pista retangular.

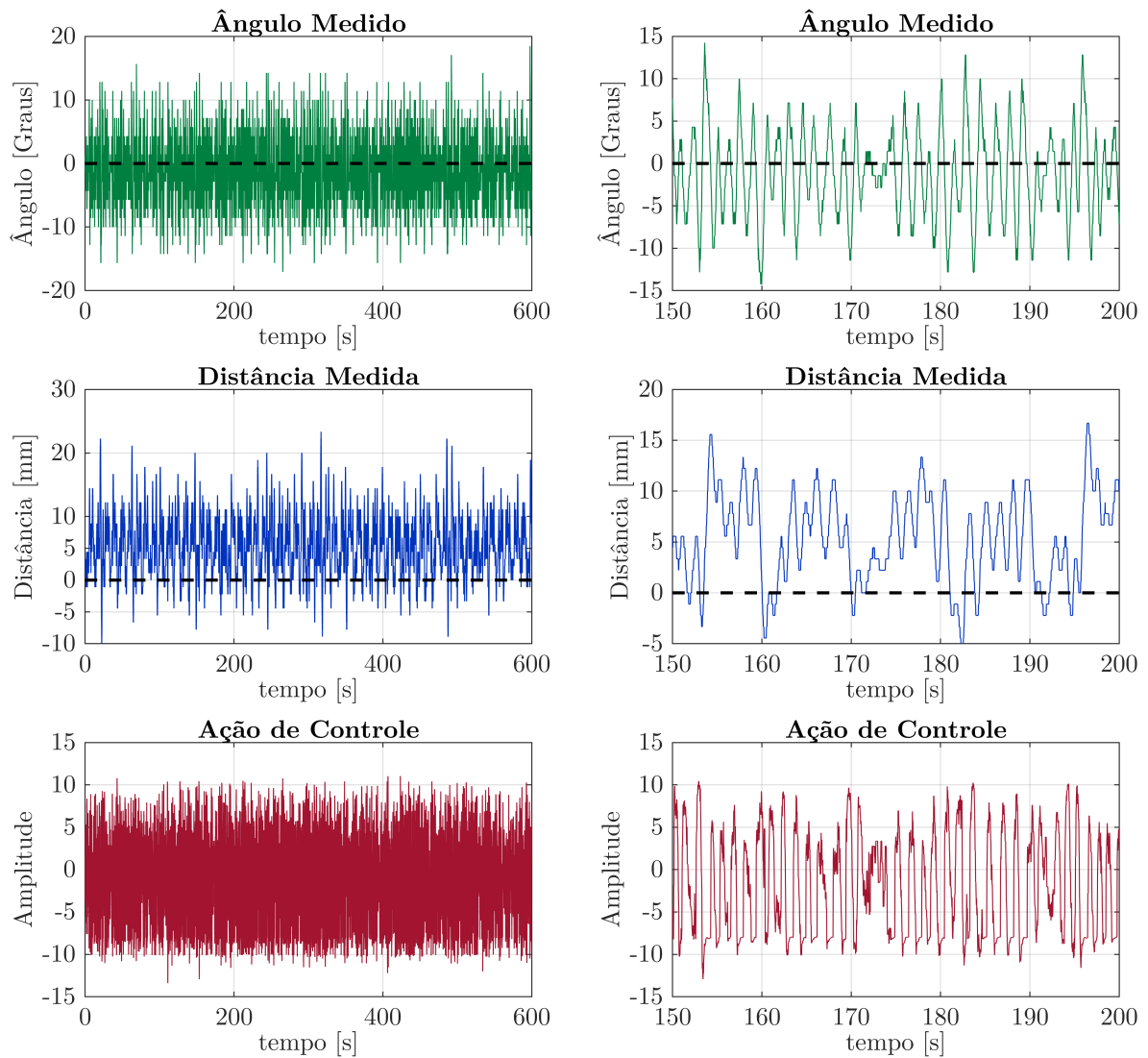


Figura 81 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 1 kg no cenário pista retangular.

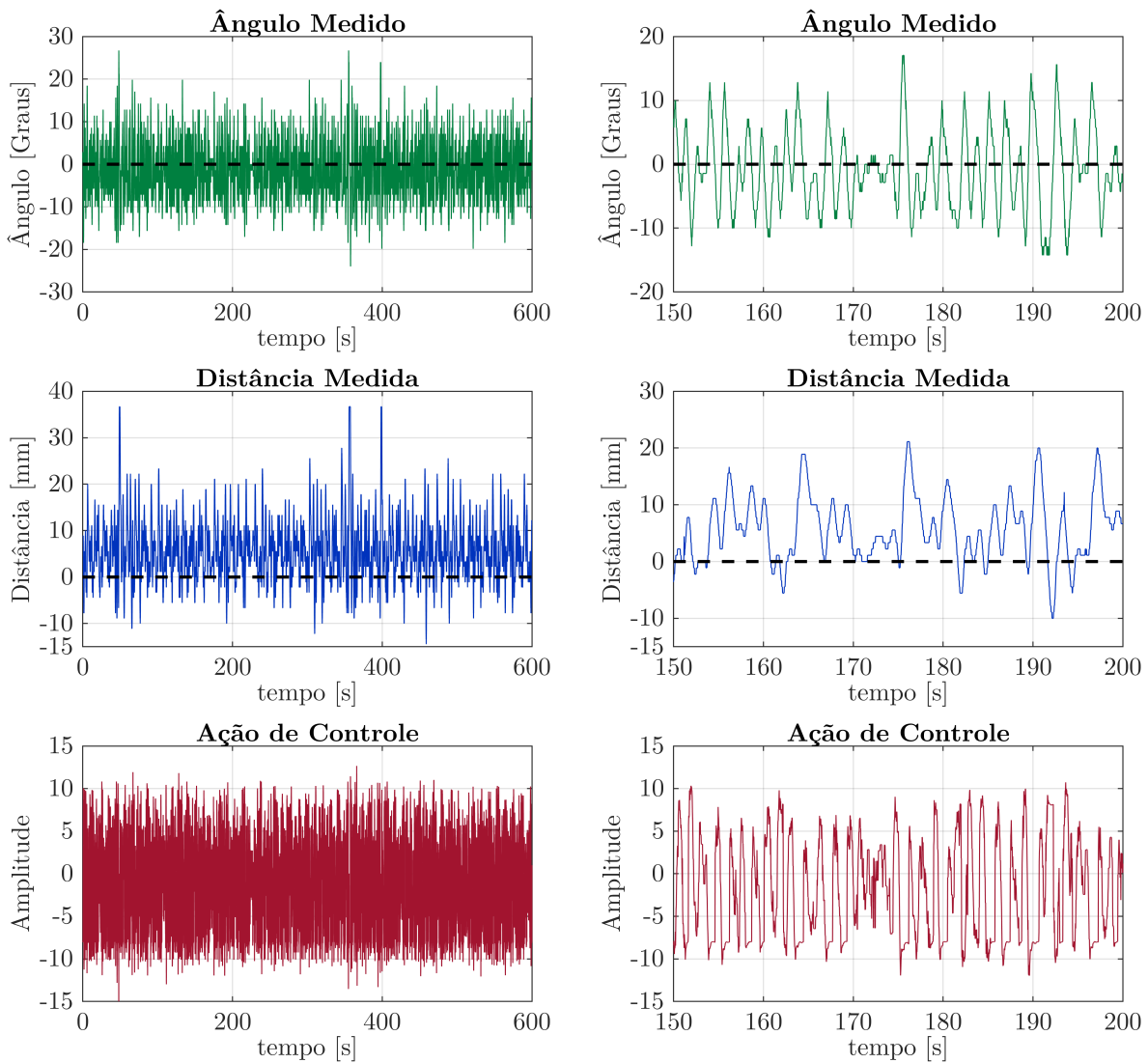


Figura 82 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 2 kg no cenário pista retangular.

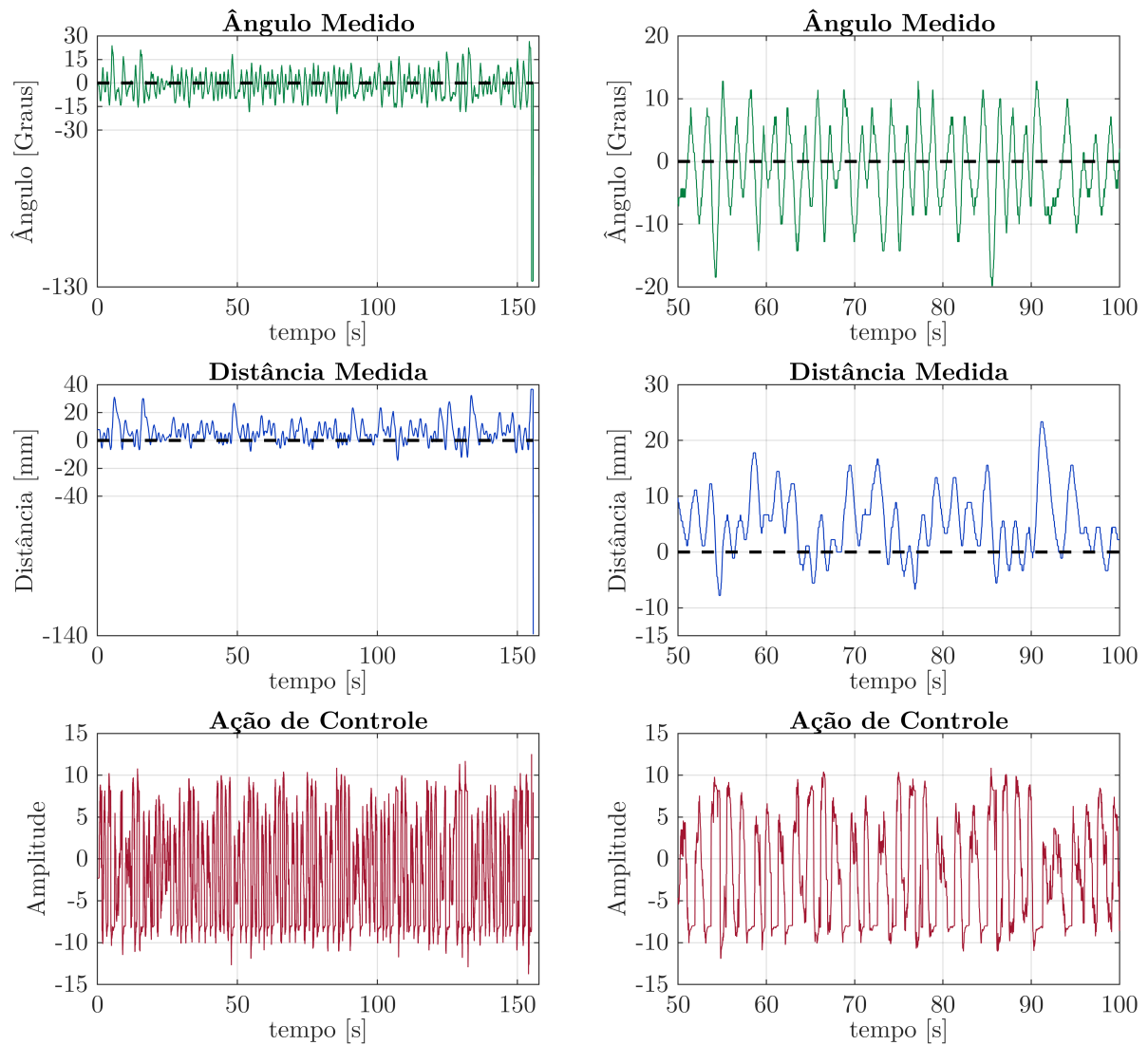


Figura 83 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 3 kg no cenário pista retangular.

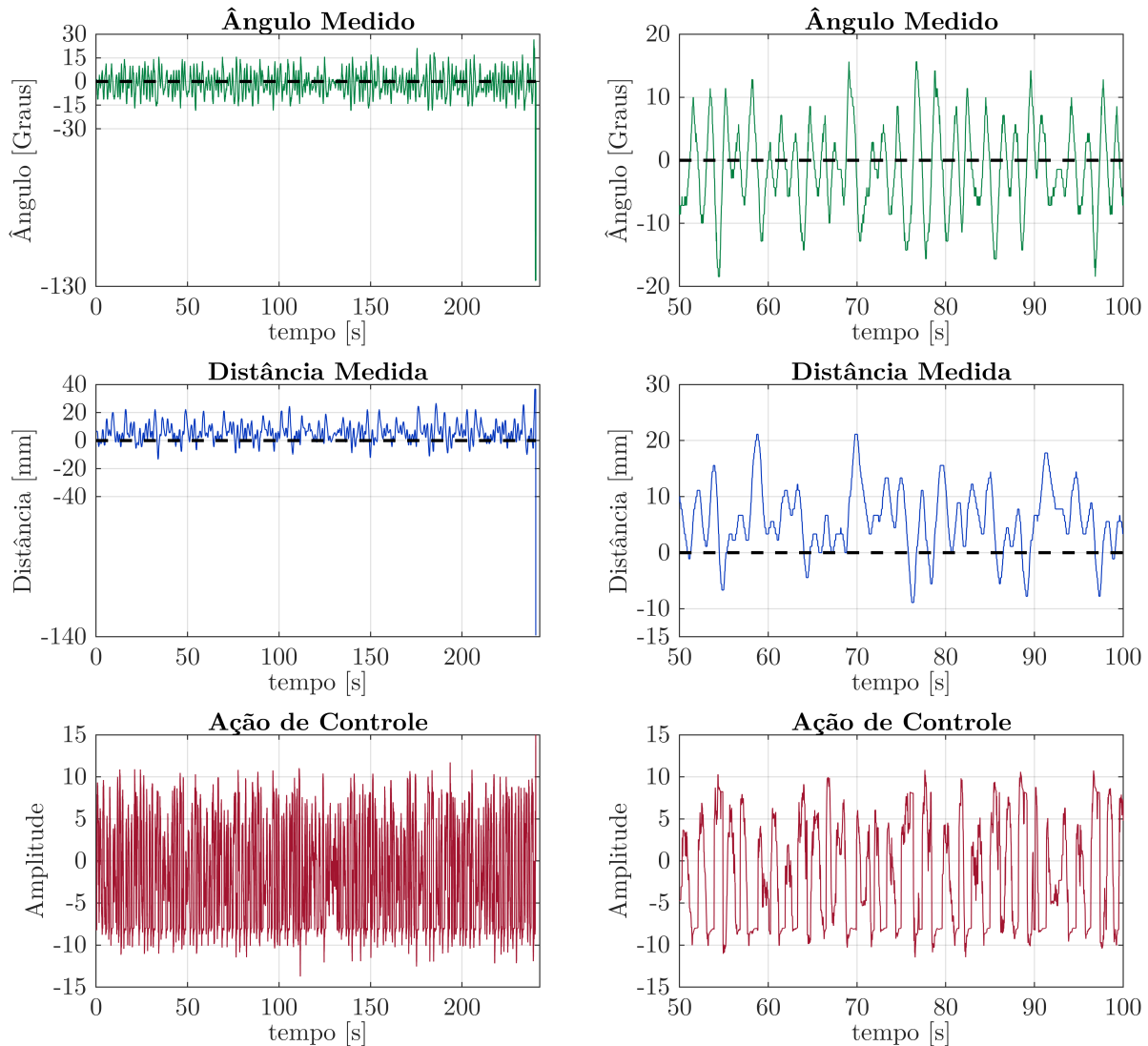


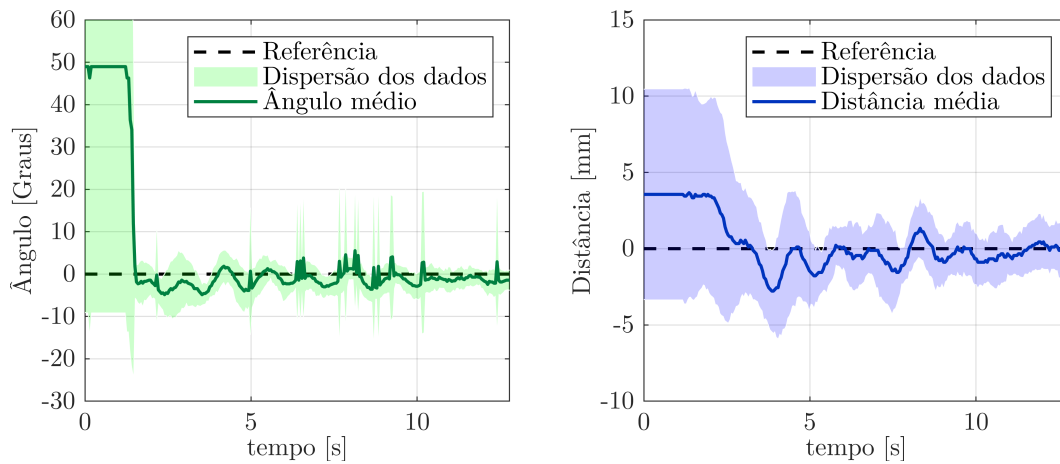
Figura 84 – Resultados do controlador Fuzzy2b da Figura 37(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 4 kg no cenário pista retangular.

5.3.2.5 Fuzzy3a

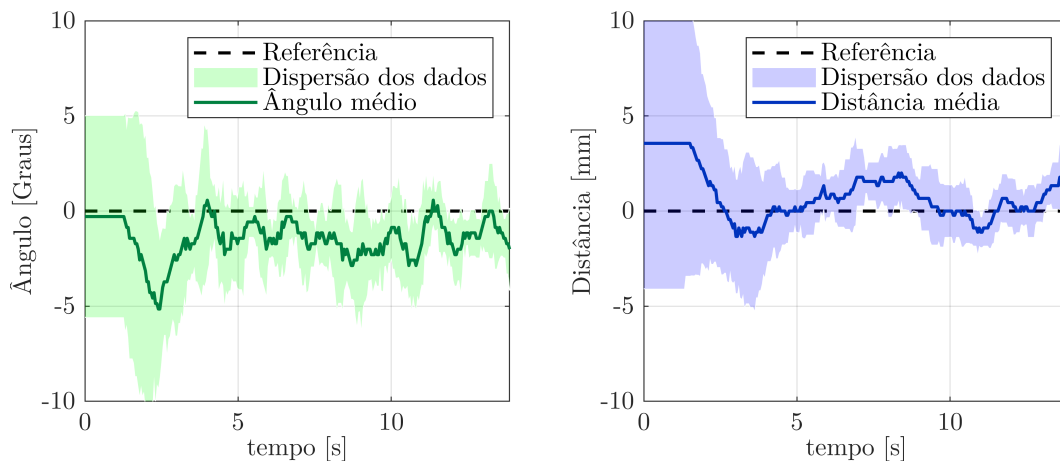
O próximo controlador implementado, Fuzzy3a, se baseia na cascata entre o FIS1, FIS2 e FIS3, conforme apresentado na Figura 40(a) e incorpora ao sistema de controle os dados das velocidades angulares medida pelas centrais inerciais embarcadas no veículo. Assim como os demais sistemas de controle sem a realimentação da velocidade dos motores, cargas acima de 2 kg não são suportadas devido à baixa velocidade de referência determinada.

Os resultados para a pista reta, Figura 85, mostram que para as duas condições de carga ensaiadas, a amplitude de dispersão para o ângulo e para a distância medidas permanecem dentro da faixa de $\pm 5^\circ$ e $\pm 5\text{ mm}$, respectivamente. Para o ângulo, a dispersão da posição inicial na condição a vazio sofre um deslocamento por conta de ruídos de

medição. Já para a distância, o regime permanente na faixa de distância citada ocorre mesmo com aposição inicial do veículo para os diferentes testes variando além dessa faixa.



(a) AGV a vazio.



(b) AGV com carga de 1 kg.

Figura 85 – Resultados dos experimentos com Fuzzy3a na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

Os resultados mostrados nas Figuras 86 e 87 mostram que a carga aumenta a amplitude de variação, principalmente, da distância medida. Os gráficos do ângulo medido apresentam amplitudes similares para as condições a vazio e com carga de 1 kg. Em comparação com os sistemas de controle anteriores, a ação de controle apresenta maior variação devido os ruídos presentes na medição da velocidade angular pelas IMUs. Porém, comparando o gráfico da ação de controle com os gráficos das variáveis medidas, não há um impacto negativo perceptível. Porém, isso significa que o atuador está sofrendo surtos de tensão, o que pode diminuir sua vida útil.

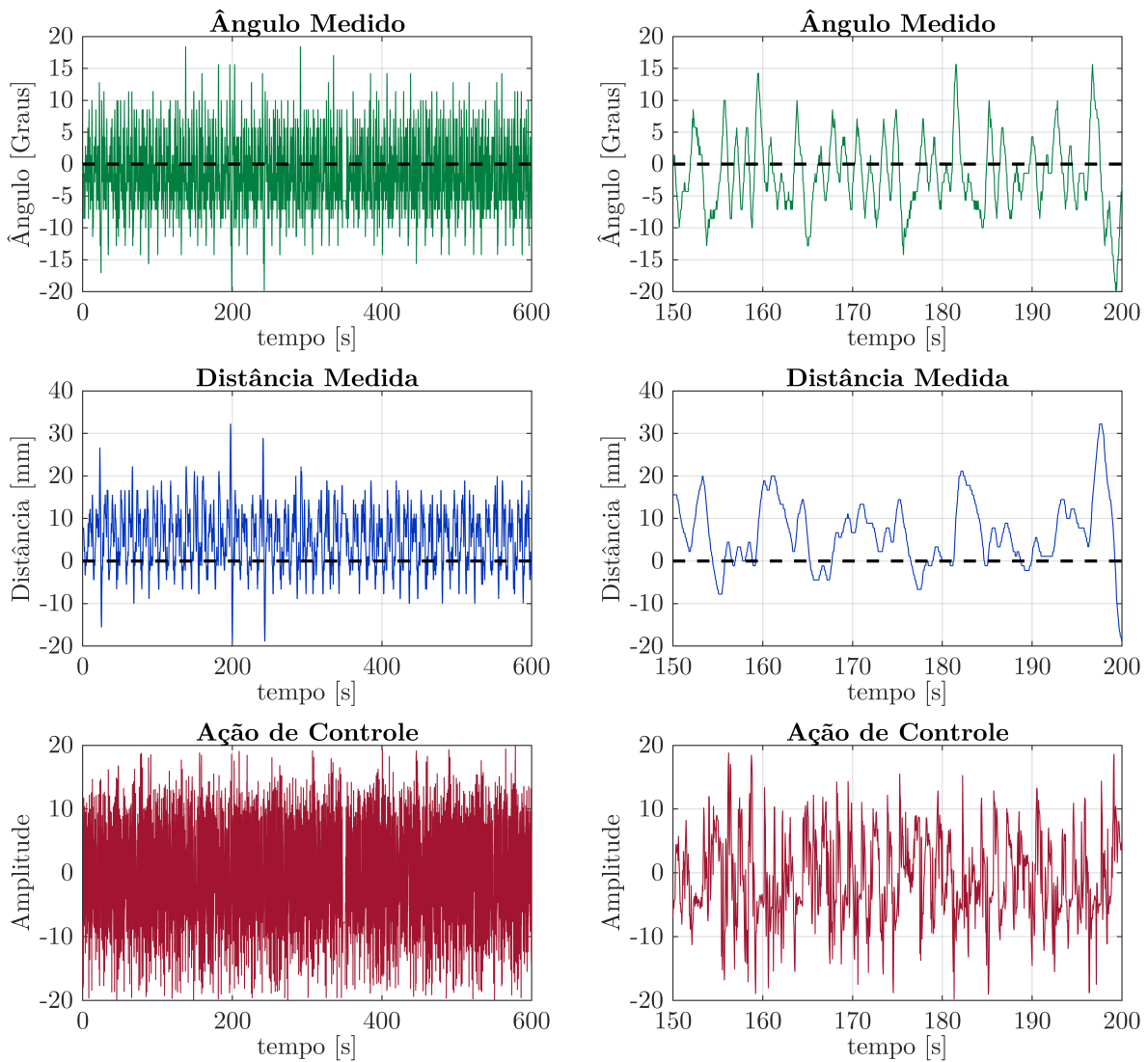


Figura 86 – Resultados do controlador Fuzzy3a da Figura 40(a). AGV a vazio no cenário pista retangular.

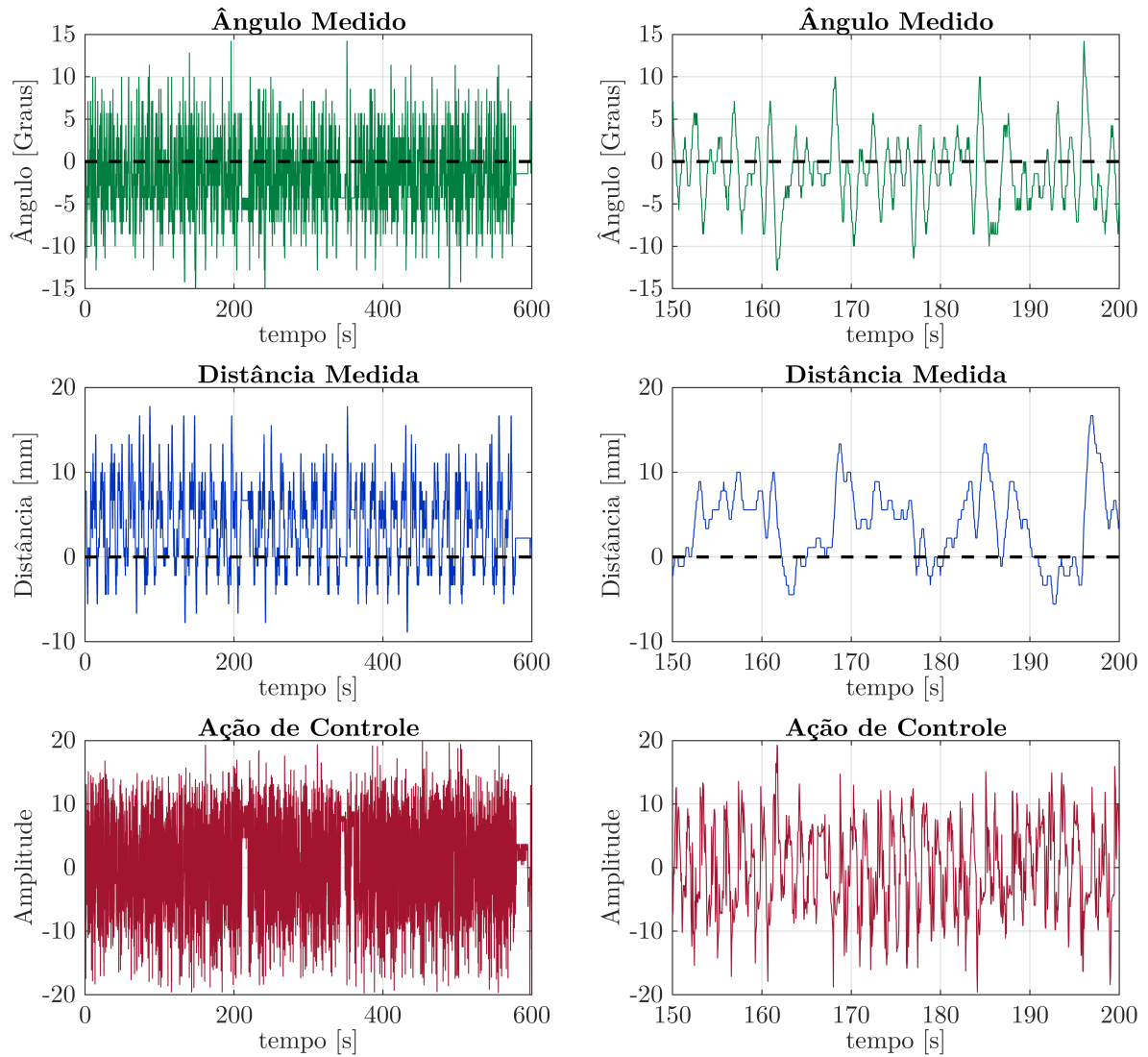
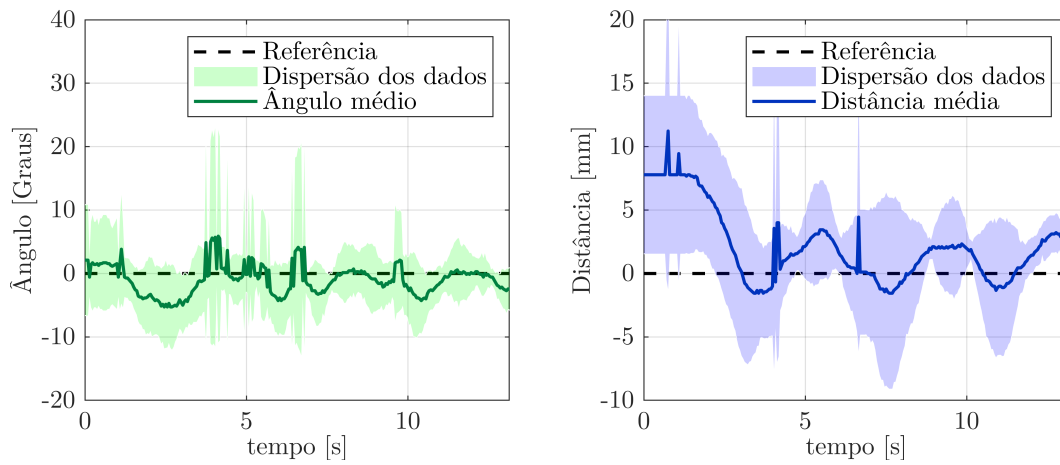


Figura 87 – Resultados do controlador Fuzzy3a da Figura 40(a). AGV com carga de 1 *kg* no cenário pista retangular.

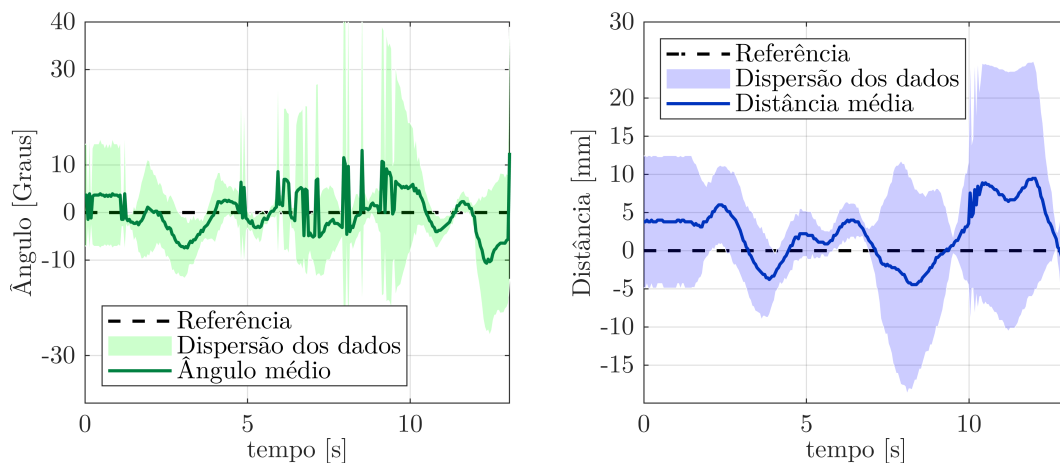
5.3.2.6 Fuzzy3b

Adicionando-se o controle de velocidade dos motores ao controlador anterior, temos o Fuzzy3b, que é a implementação da versão da Figura 40(b). Para os ensaios no cenário pista reta, Figuras 88 e 89, para o AGV a vazio e com carga de 1 *kg* são observadas as maiores dispersões dos dados dos ensaios, principalmente para a distância. Nesses ensaios também houve maior presença de ruído de medição do ângulo. O comportamento médio para a condição de 1 *kg* sugere, até mesmo, que o AGV poderia entrar em instabilidade, ou seja, sair da pista caso o percurso fosse mais longo. Para as cargas de 2 a 4 *kg*, a dispersão dos dados foi bem próxima ao comportamento médio, apresentando pouca oscilação no ângulo de orientação.

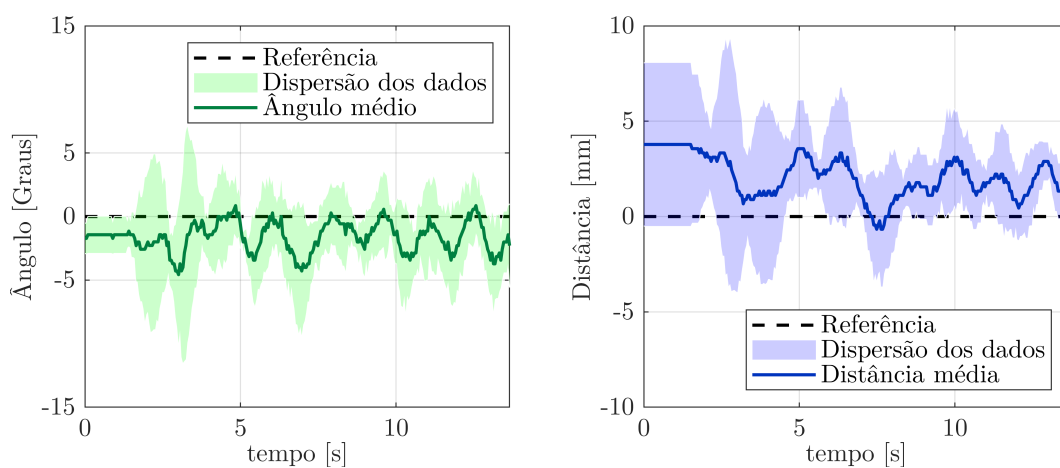
Os resultados para os ensaios realizados na pista retangular são mostrados nas Figuras de 90 a 94. A Figura 93 mostra dois ensaios distintos para carga de 3 *kg*. Em ambos



(a) AGV a vazio.

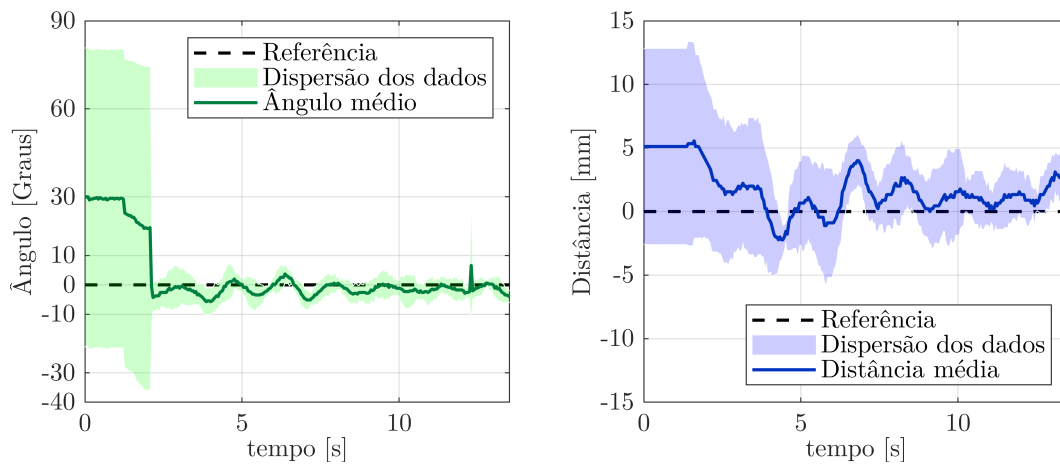


(b) AGV com carga de 1 kg.

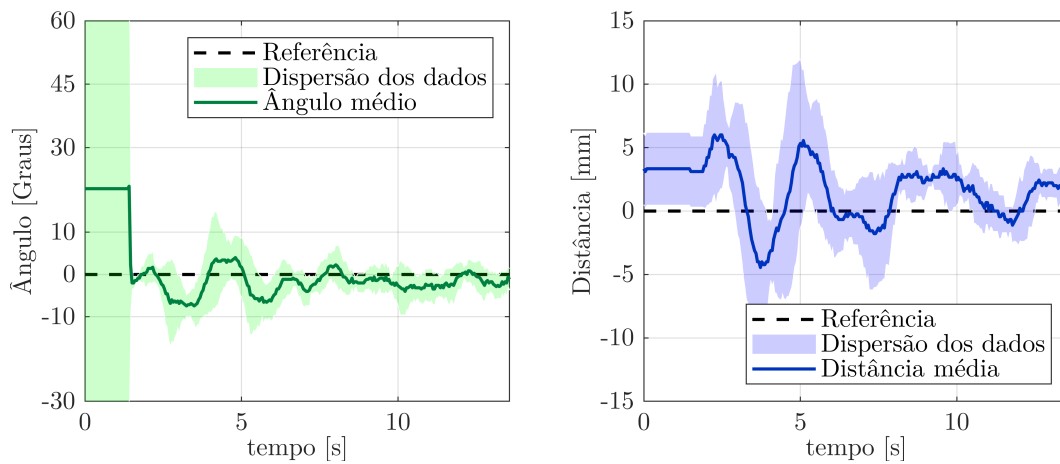


(c) AGV com carga de 2 kg.

Figura 88 – Resultados dos experimentos com Fuzzy3b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.



(a) AGV com carga de 3 kg.



(b) AGV com carga de 4 kg.

Figura 89 – Resultados dos experimentos com Fuzzy3b na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

os ensaios, com tempo similar inclusive, o AGV inicia a execução do controle e, após alguns segundos, entra em uma oscilação crescente até perder a referência da faixa guia e interromper a execução do sistema de controle. O mesmo controlador embarcado, para essa condição de carga, apresenta uma situação de instabilidade. Devido à posição da carga de 3 kg concentrada na parte frontal do veículo, levanta-se a hipótese de que essa condição é a que causa maior impacto no sistema dinâmico devido ao maior esforço exigido dos dois rodízios localizados na parte frontal do veículo e por deslocar mais o centro de massa do veículo. Com o aumento da carga concentrada nos rodízios, surgem novas forças no sistema, como o atrito das rodas com o chão e o atrito do rolamento do rodízio. O comportamento para cargas de 4 kg, apesar de similar, tem menor impacto pois a carga está mais distribuída sob a plataforma do AGV.

Os resultados para a condição de carga de 4 kg, mostrados na Figura 94 mostra que uma oscilação demasiada próximo aos 100 s do experimento causou a perda da referên-

cia, embora o comportamento do sistema até esse ponto tenha se mostrado similar ao comportamento para condição de cargas mais leves.

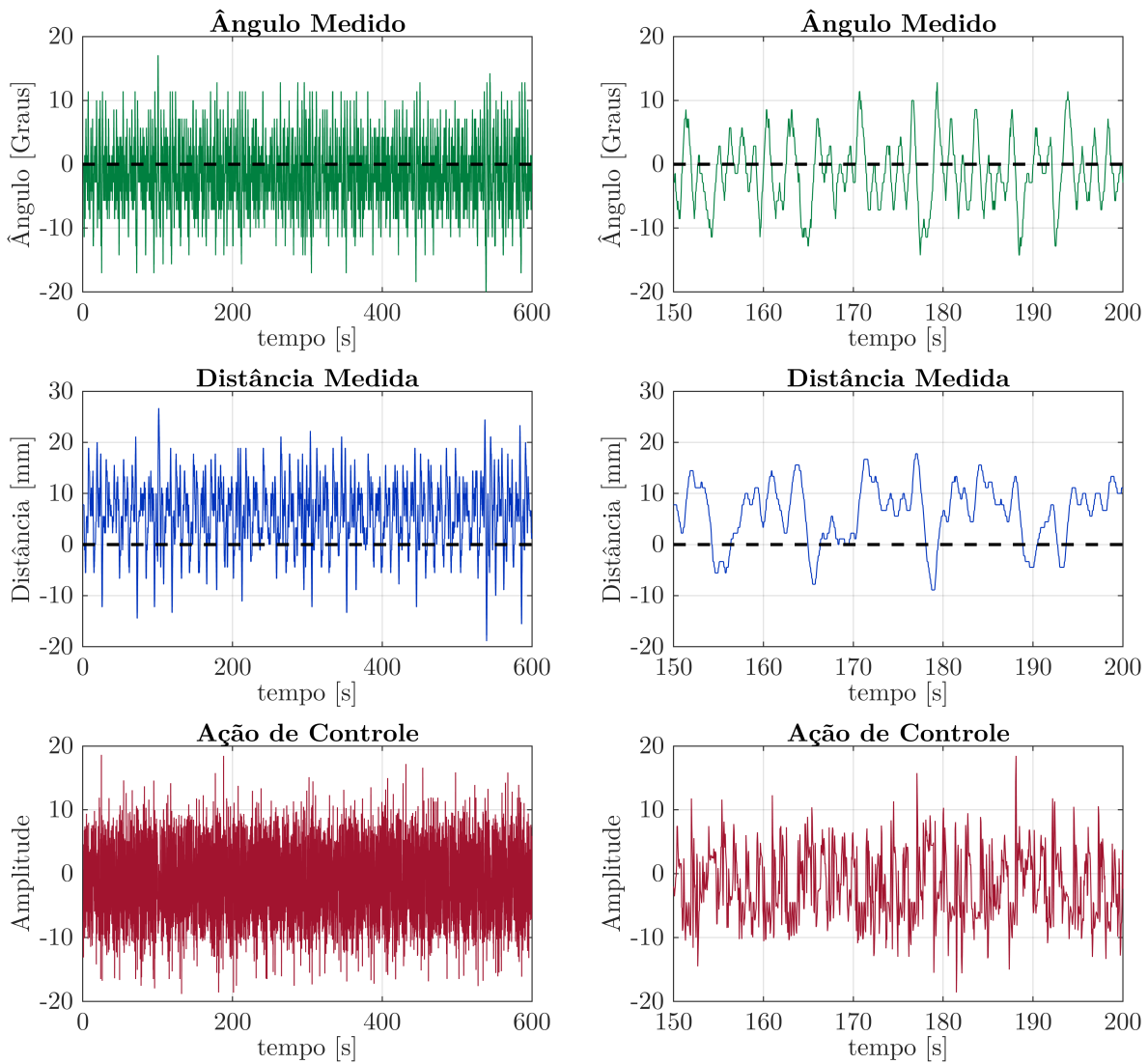


Figura 90 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV a vazio no cenário pista retangular.

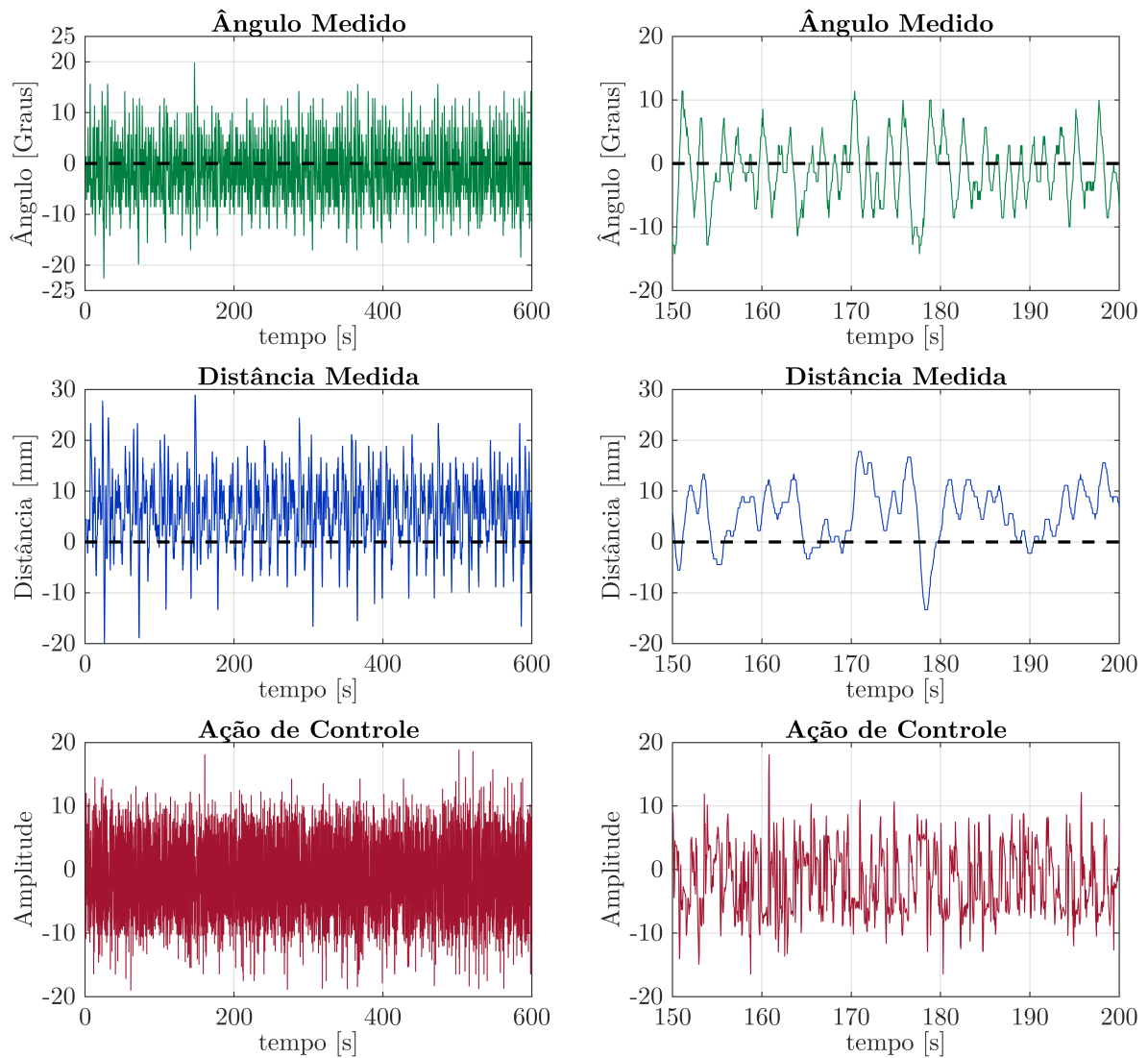


Figura 91 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 1 kg no cenário pista retangular.

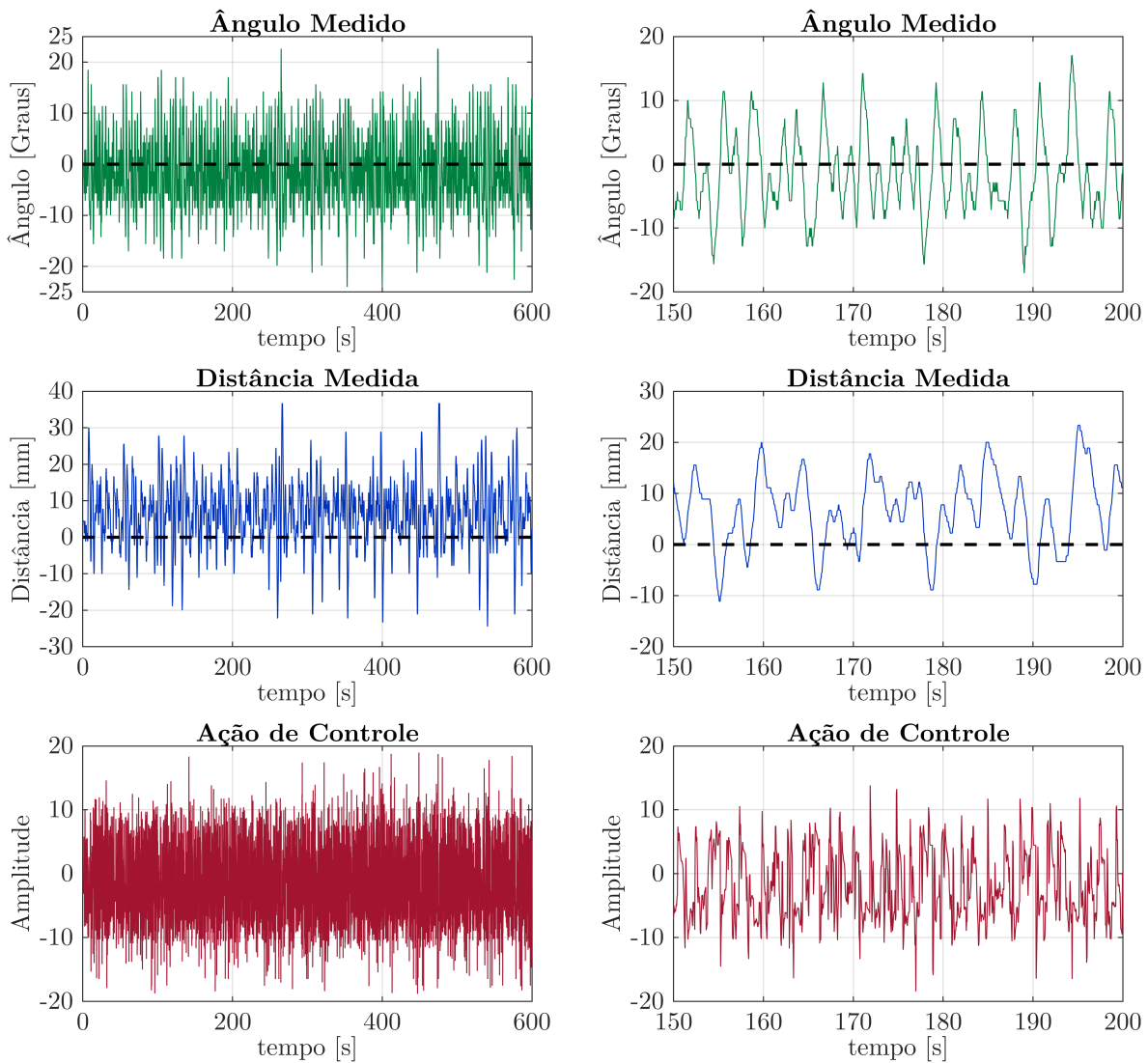


Figura 92 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 2 kg no cenário pista retangular.

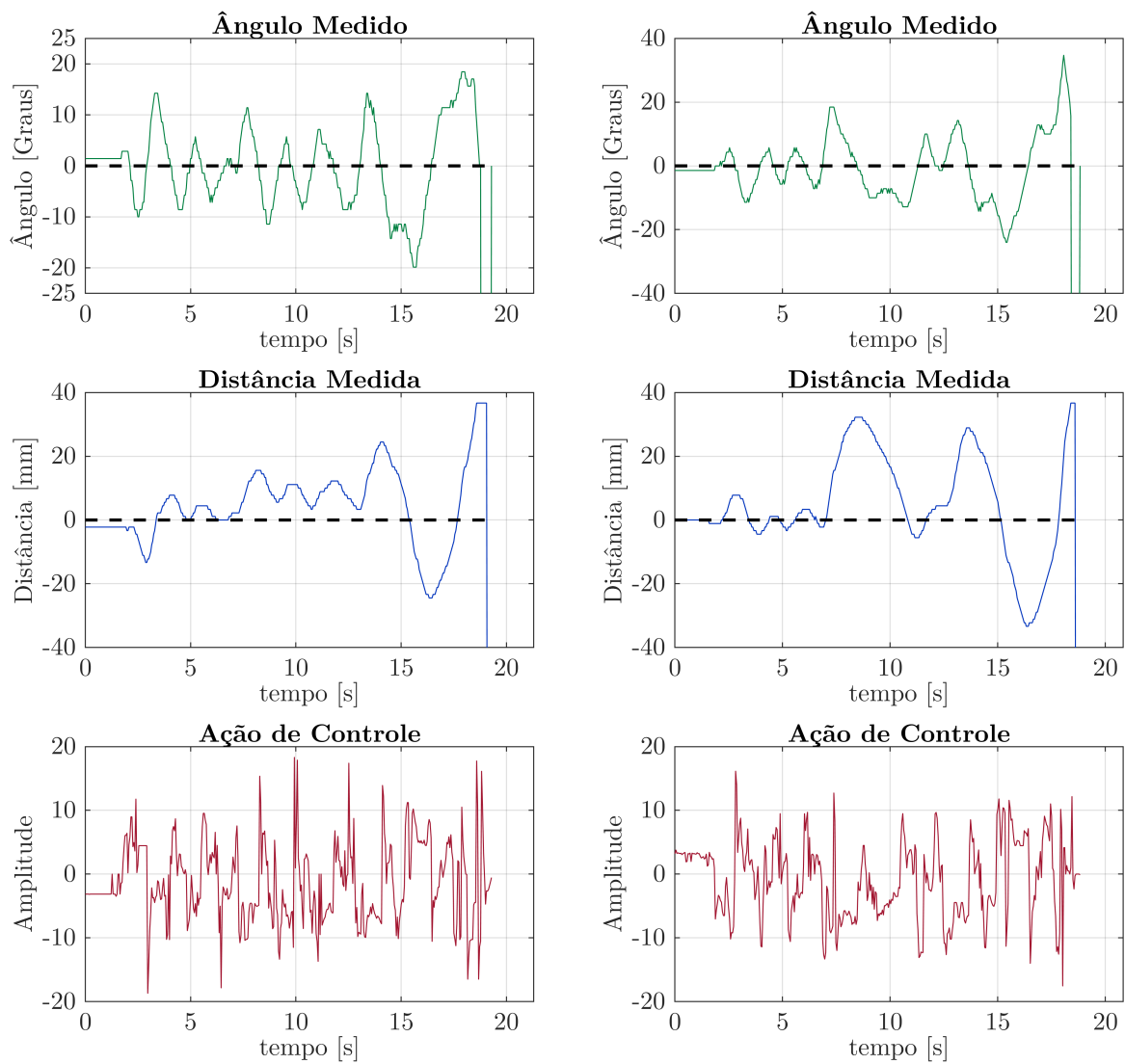


Figura 93 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 3 kg no cenário pista retangular. A figura mostra dois ensaios diferentes com a mesma carga para mostrar o comportamento típico do veículo.

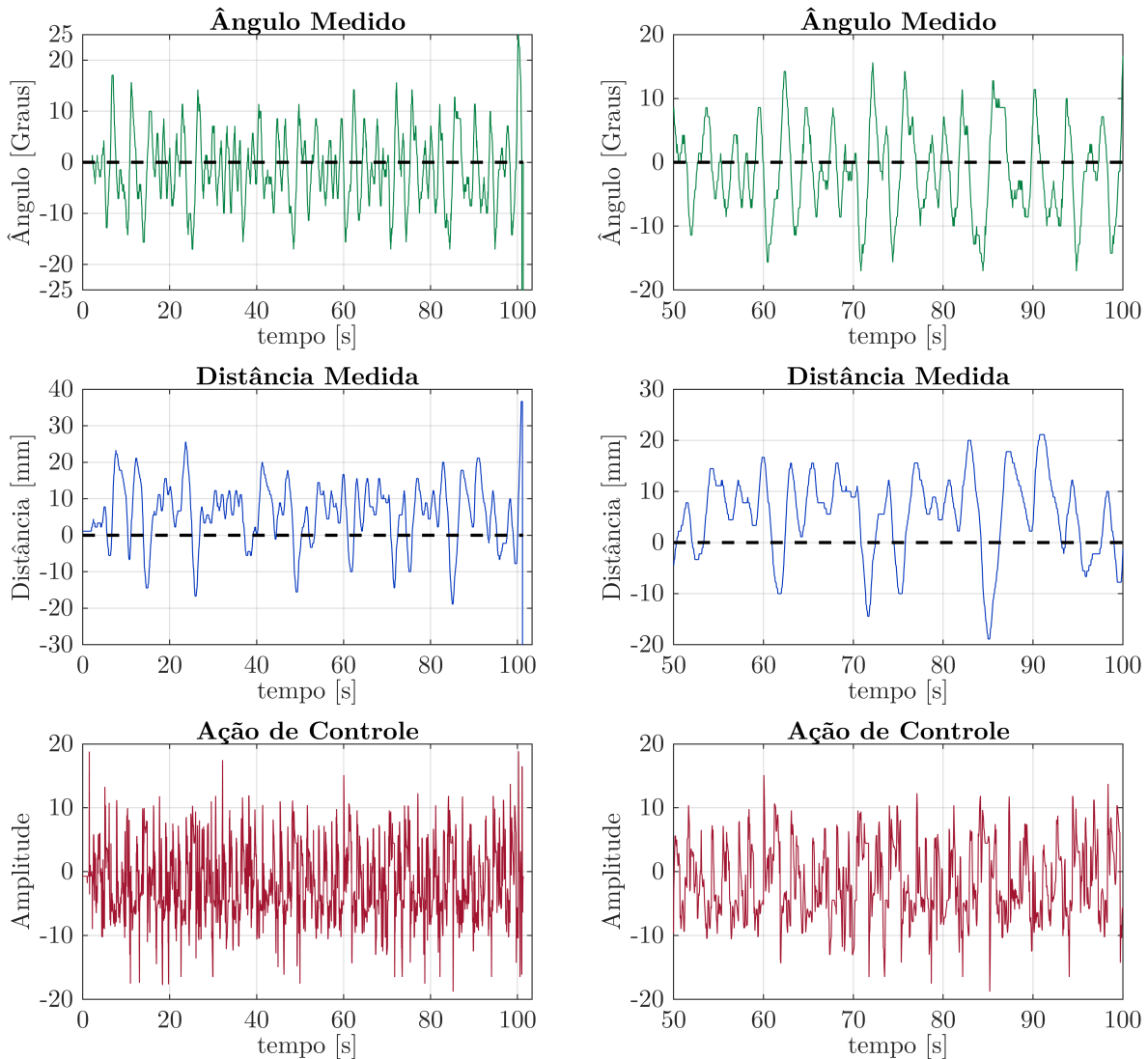


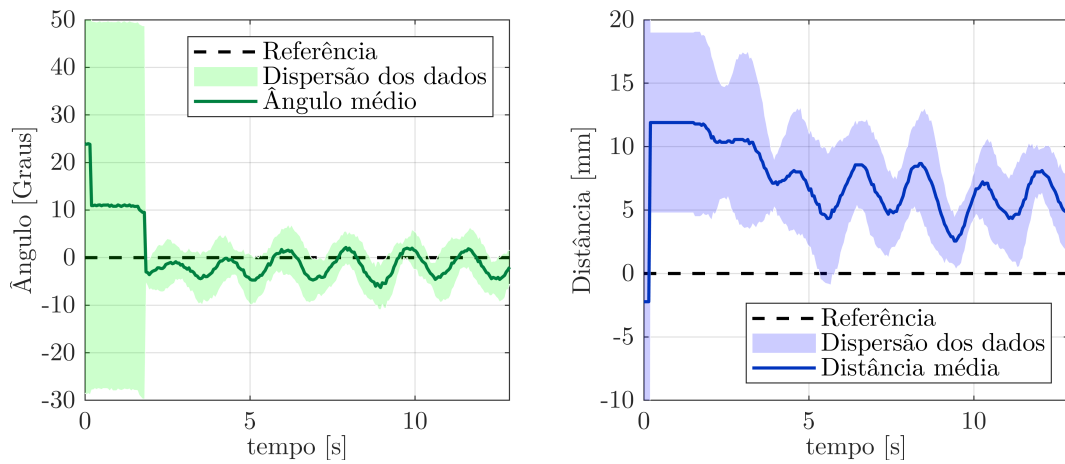
Figura 94 – Resultados do controlador Fuzzy3b da Figura 40(b), com malha de controle de velocidade dos motores. AGV com carga de 4 kg no cenário pista retangular.

5.3.2.7 Fuzzy4

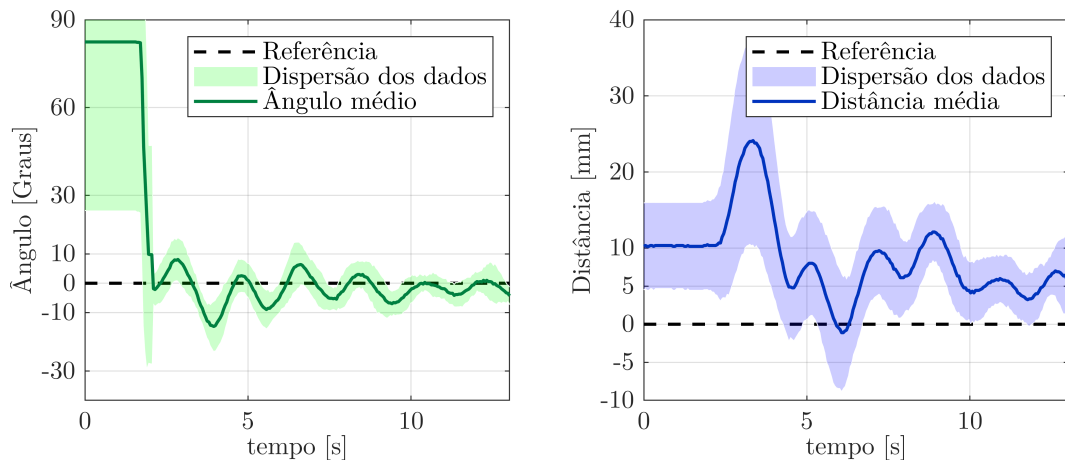
Por fim, os resultados da proposta principal da tese, o controlador fuzzy-adaptativo em cascata e multissensores, são apresentados. A implementação do sistema de controle da Figura 42 envolve a cascata dos FIS1, FIS2, FIS3 e FIS4, para consideração das correntes dos motores para acentuar o comportamento adaptativo do controlador fuzzy. Além disso, de forma a possibilitar os ensaios em todas as condições de carga, apenas a versão com a malha de controle de velocidade foi implementada.

Para a pista reta, cujos resultados são mostrados nas Figuras 95 e 96, o controlador gerou um comportamento médio tanto para ângulo quanto para distância similares para as condições de carga testadas. Para o ângulo, apesar do comportamento oscilatório inerente do sistema de controle, a dispersão dos dados se concentrou na faixa de $\pm 10^\circ$ em todas as condições de carga. Os valores encontrados nesse cenário atendem ao especificado

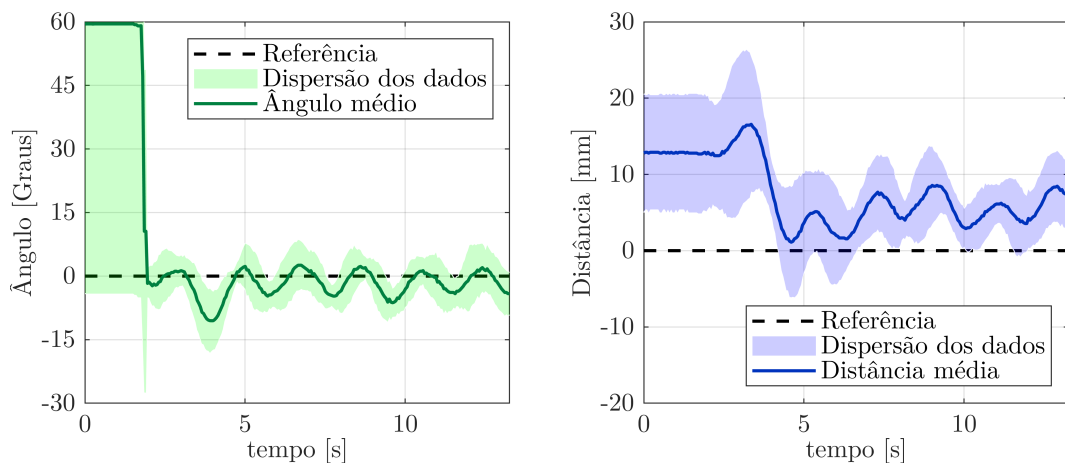
na Seção 3.2 para o regime transitório, com um máximo sobressinal de $\pm 15^\circ$, mas não atendem à especificação para o regime permanente de 2° .



(a) AGV a vazio.



(b) AGV com carga de 1 kg.



(c) AGV com carga de 2 kg.

Figura 95 – Resultados dos experimentos com Fuzzy4 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

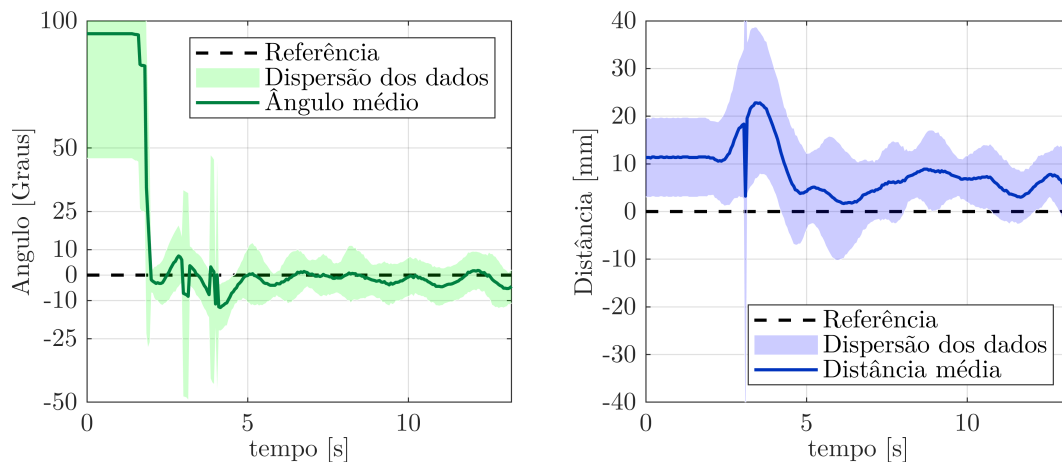
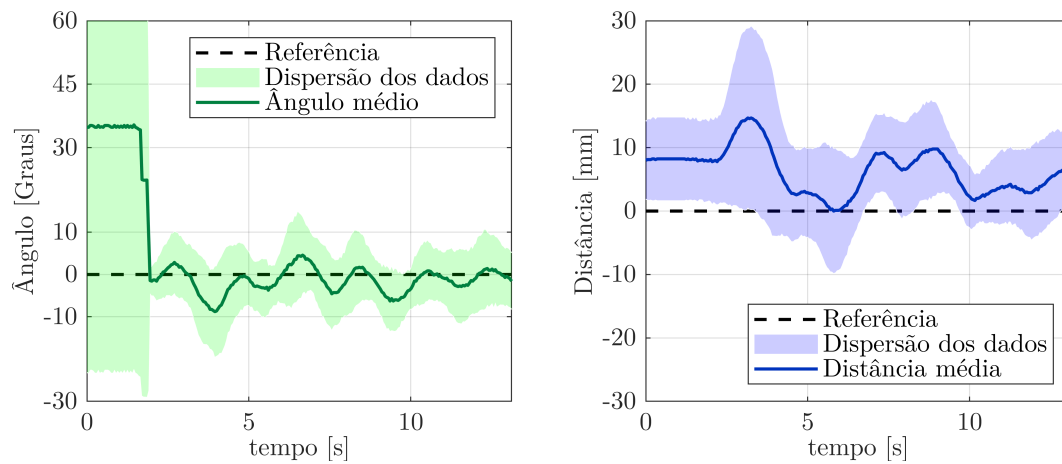
(a) AGV com carga de 3 *kg*.(b) AGV com carga de 4 *kg*.

Figura 96 – Resultados dos experimentos com Fuzzy4 na pista reta, os resultados representam a média e a dispersão dos dados de 10 experimentos para cada condição de carga.

Em relação à distância medida, o maior desvio em relação à distância desejada ocorreu com o AGV a vazio. Para as demais condições de carga, o valor médio e a dispersão ficaram próximos dos valores estabelecidos na Seção 3.2 de erro em regime permanente de ± 10 *mm* e máximo sobressinal de 30 *mm* em regime transitório.

A análise dos gráficos das Figuras de 97 a 101 mostra um desempenho de controle do ângulo de orientação do AGV similar aos controladores implementados anteriormente, mantendo uma variação dentro da faixa de $\pm 20^\circ$ e oscilação também similar. Do ponto de vista do controle de distância do veículo em relação ao centro da faixa guia, o desempenho do controlador foi degradado, com resultados piores se comparado com as demais implementações. Entretanto, a proposta foi capaz de manter o AGV na pista sob todas as condições de carga, mesmo apresentando medições de distância no limite de medição do sensor, como é o caso para a condição de carga de 4 *kg*.

Observando-se a ação de controle é possível perceber a adaptação, com um aumento

na amplitude da ação de controle conforme a carga do AGV aumenta.

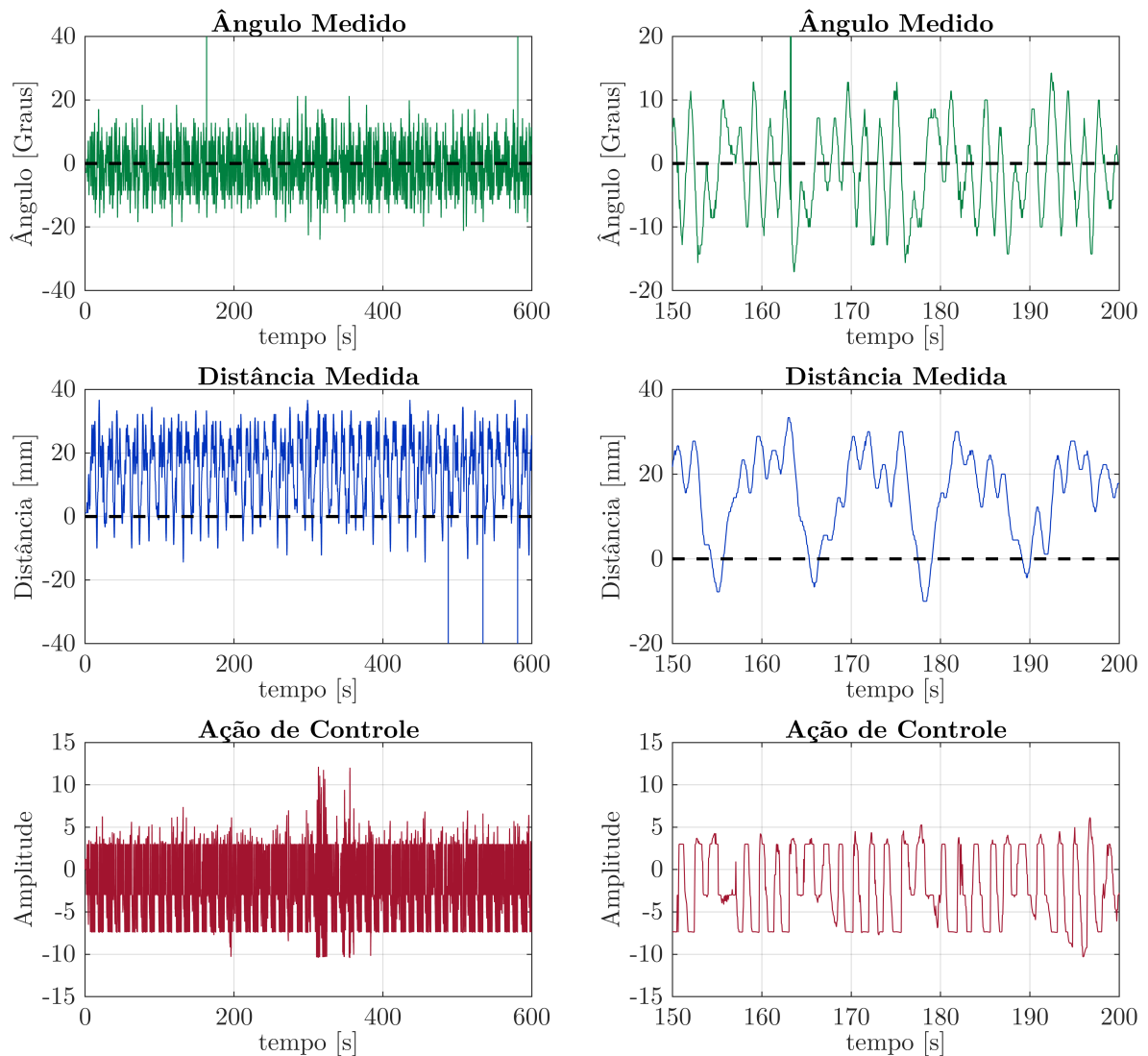


Figura 97 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV a vazio no cenário pista retangular.

5.3.3 Resultados Quantitativos

As Tabelas 16, 17, 18, 19 e 20 a seguir mostram os resultados dos indicadores de desempenho da Seção 5.2.1 para cada faixa de carga. A análise dos dados no sentido das linhas de cada tabela compara os diferentes controladores na mesma condição de carga. No sentido da coluna, nas cinco tabelas, compara-se o desempenho do controlador conforme a carga alocada no AGV aumenta.

Para sistemas de controle sem a malha de controle de velocidade, apenas ensaios de baixa carga foram realizados. Os demais controladores apresentam resultados para todas as faixas de carga. Entretanto, é importante observar que o comportamento do AGV em cada condição de carga foi respeitado, ou seja, os resultados para ensaios que não

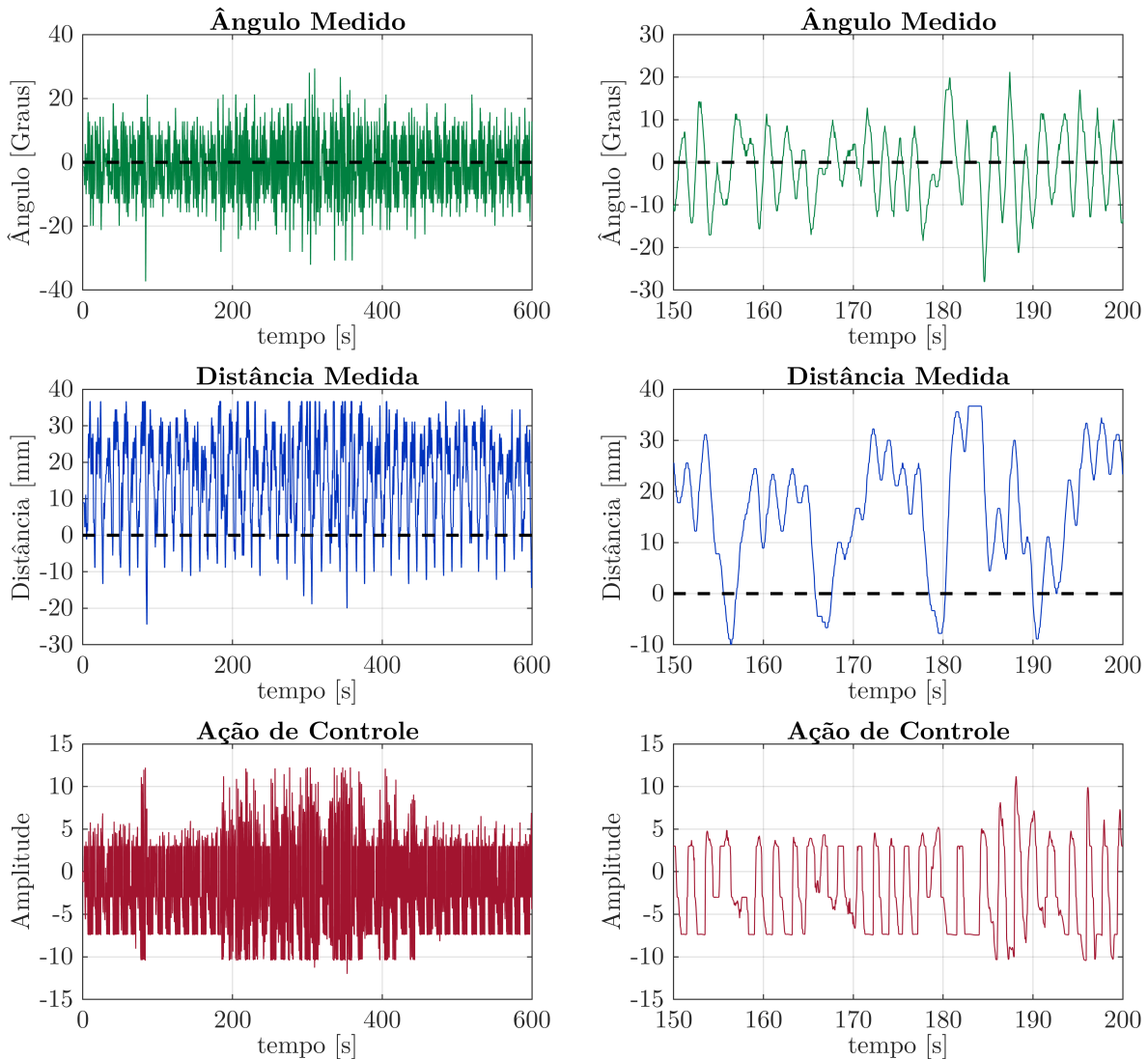


Figura 98 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV com carga de 1 kg no cenário pista retangular.

foram bem sucedidos, ou seja, o AGV não permaneceu na linha durante o tempo de ensaio também foram incluídos. Esses valores foram incluídos por, para essas condições, o comportamento típico do veículo ter sido o mesmo nas diversas tentativas.

Nesses casos, é importante perceber que os valores dos indicadores que utilizam a soma sucessiva dos error, a integral ou que penalizam no tempo serão discrepantes se comparados com ensaios bem sucedidos e de longa duração. Por esse motivo, os melhores valores não foram destacados na tabela, pois os valores precisam de uma contextualização maior do que puramente sua representação.

A Tabela 21 mostra os valores de período de amostragem, ou tempo de ciclo, e da taxa de FPS resultante de cada controlador implementado. Esses dados são importantes no caso de um sistema embarcado que tem um gargalo no tempo de processamento.

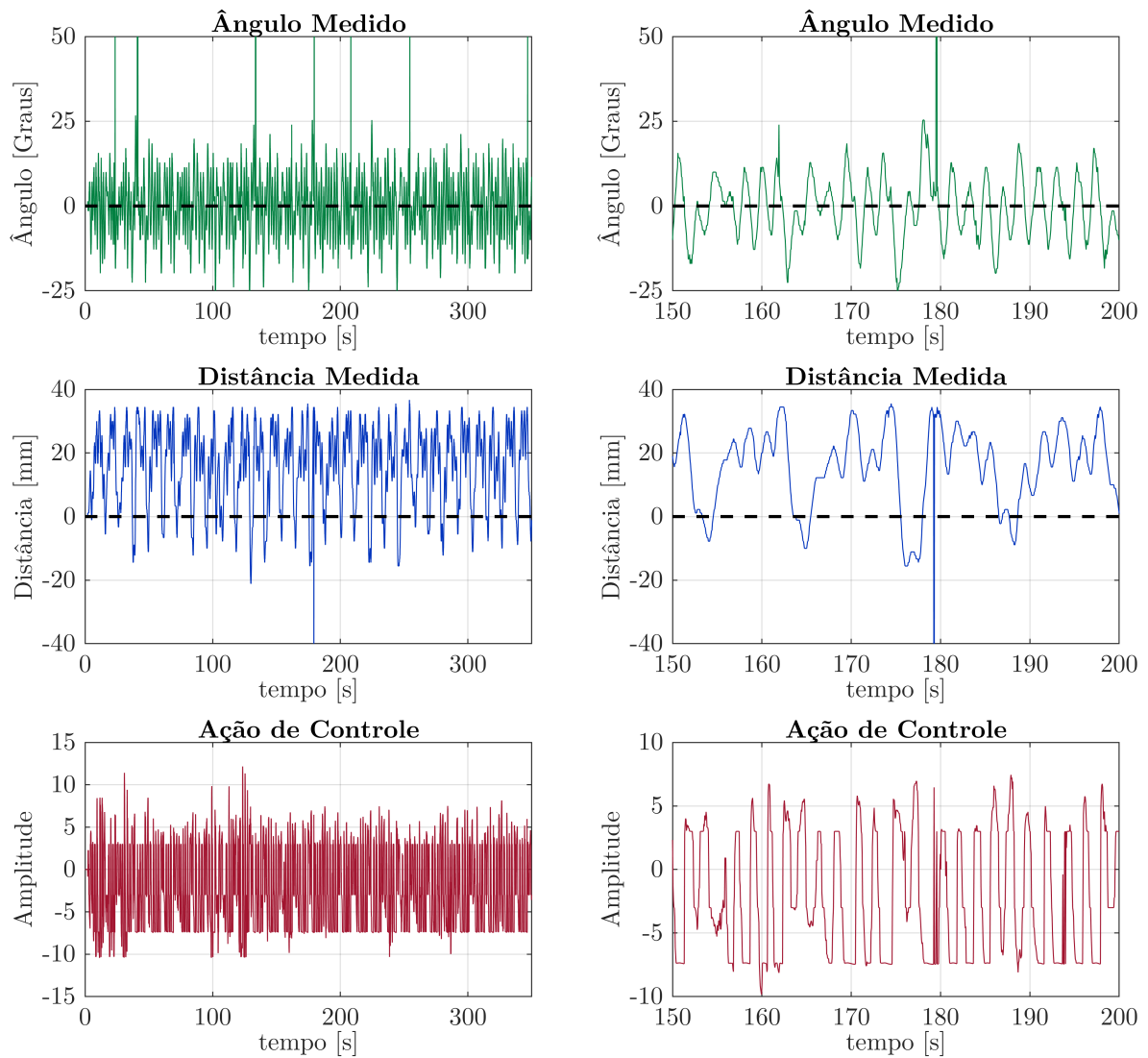


Figura 99 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV com carga de 2 kg no cenário pista retangular.

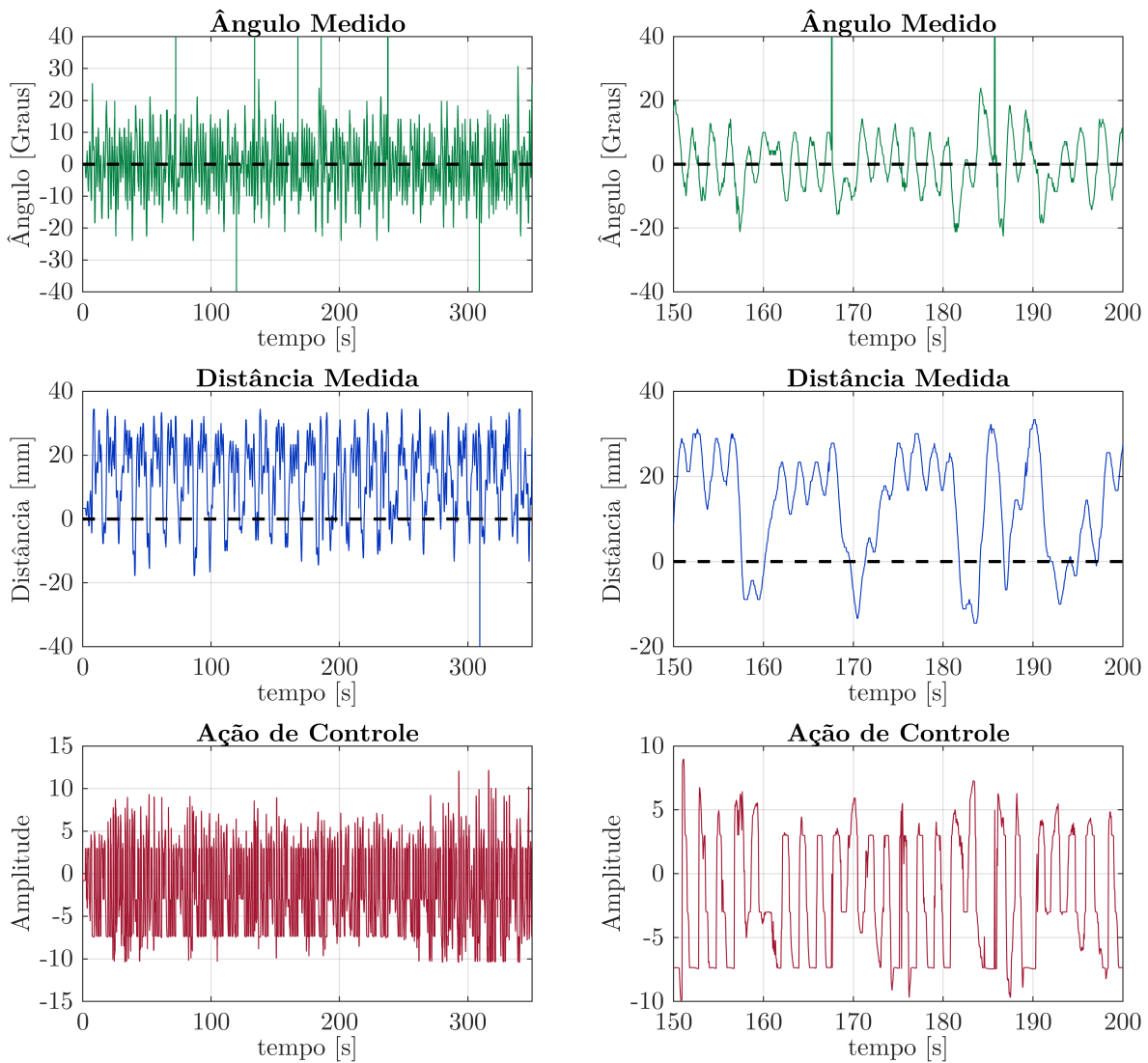


Figura 100 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV com carga de 3 kg no cenário pista retangular.

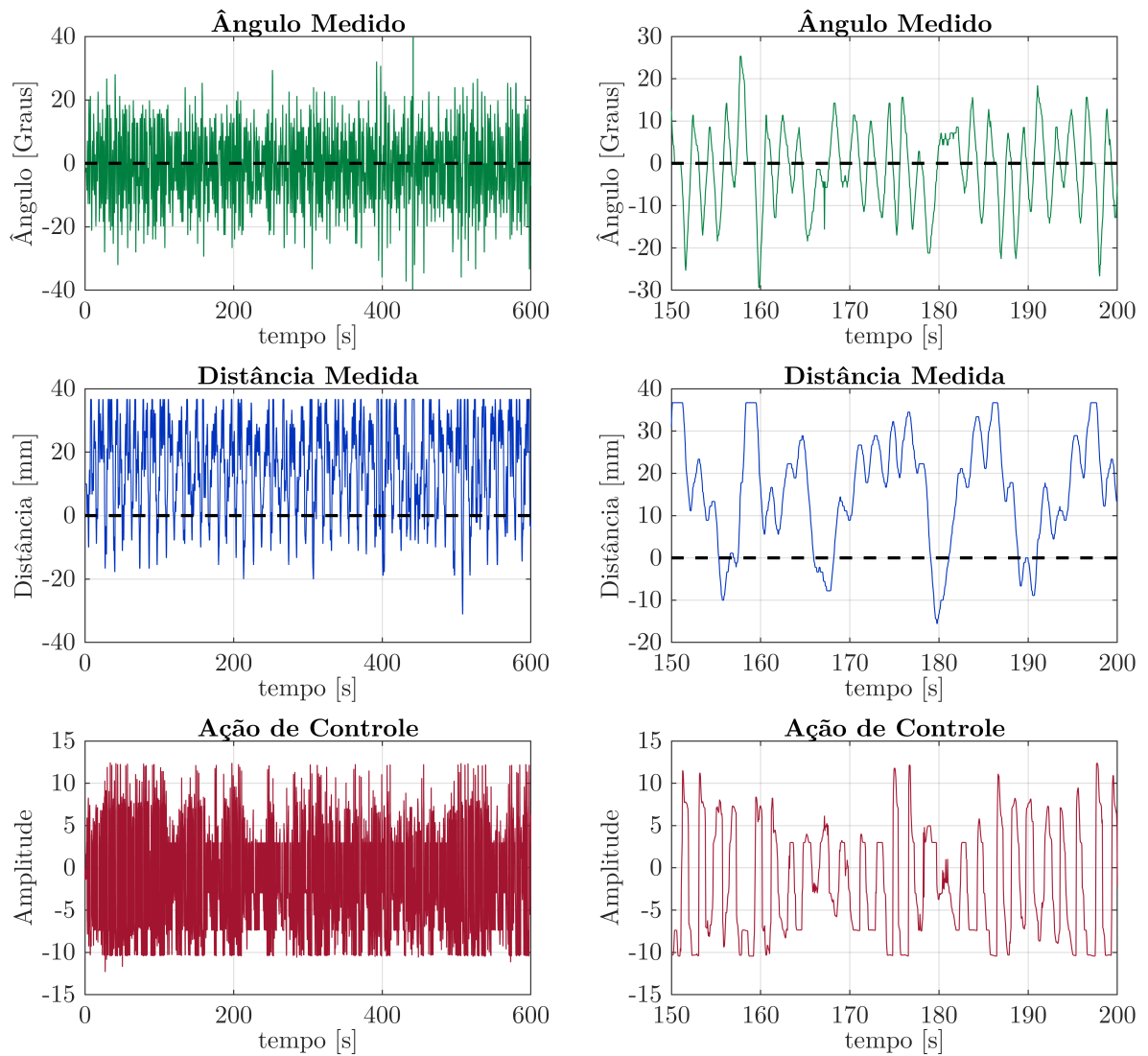


Figura 101 – Resultados do controlador fuzzy-adaptativo em cascata da Figura 42. AGV com carga de 4 kg no cenário pista retangular.

Tabela 16 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV a vazio.

Erro	Indicador	Controladores, condição de carga: 0 kg										Unidades	
		PID1	PID2	PID3	PID4	Fuzzy1a	Fuzzy1b	Fuzzy2a	Fuzzy2b	Fuzzy3a	Fuzzy3b		Proposta
<i>Ângulo</i>	μ_e	3,0697	1,8898	1,4114	1,257	1,9297	1,4555	1,3644	1,2508	1,3819	1,4325	0,90443	° [graus]
	s_e	12,329	6,1251	8,477	4,2792	6,741	5,1661	4,9935	5,1765	5,2128	5,2629	7,2136	° [graus]
	<i>MSE</i>	161,42	41,086	73,849	19,89	49,163	28,806	26,795	28,36	29,081	29,748	52,85	-
	<i>RMSE</i>	12,705	6,4099	8,5936	4,4599	7,0116	5,3671	5,1764	5,3254	5,3926	5,4542	7,2698	° [graus]
	<i>MAE</i>	41,11	19,85	30,75	17,061	19,85	15,658	19,852	17,061	19,852	21,239	23,99	° [graus]
	<i>ISE</i>	81836	24666	44311	11940	29496	17273	16083	17010	17441	17848	31717	-
	<i>IAE</i>	5000,9	2881	4202,9	2061,5	3105,2	2592,9	2378,7	2564,1	2615,2	2592	3536	-
	<i>ITSE</i>	1,3227	0,576	1,192	0,2779	0,70801	0,39303	0,36507	0,36638	0,22059	0,23467	0,3826	$\times 10^{11}$
	<i>ITAE</i>	0,083164	0,068311	0,10519	0,047813	0,072333	0,059111	0,053111	0,055721	0,033522	0,033531	0,042485	$\times 10^{11}$
<i>Distância</i>	μ_e	-0,21461	-0,88283	1,0961	1,0005	-5,3172	-9,3178	-3,7292	-5,9395	-5,3873	-6,0825	-14,982	<i>mm</i>
	s_e	14,619	10,57	11,542	10,148	12,294	6,0259	3,6477	5,1805	6,7236	6,3401	11,07	<i>mm</i>
	<i>MSE</i>	213,76	112,51	134,41	103,98	179,42	123,13	27,212	62,114	74,226	77,19	347,01	-
	<i>RMSE</i>	14,621	10,607	11,593	10,197	13,395	11,096	5,2166	7,8812	8,6155	8,7858	18,628	<i>mm</i>
	<i>MAE</i>	45,592	32,248	36,696	30,024	43,368	21,128	18,904	26,688	32,248	26,688	36,696	<i>mm</i>
	<i>ISE</i>	108290	67304	80433	62345	107480	73760	16321	37174	44553	46318	208120	-
	<i>IAE</i>	5915,3	5122,8	5754,2	5016,2	6876,2	5860,6	2534,8	3927	4162,6	4424,8	9570,8	-
	<i>ITSE</i>	2,0561	1,6371	2,0771	1,3321	2,3548	1,6816	0,37921	0,76916	0,52796	0,60662	2,5679	$\times 10^{11}$
	<i>ITAE</i>	0,10643	0,123	0,14136	0,11185	0,15534	0,13417	0,057137	0,084122	0,051742	0,056832	0,11594	$\times 10^{11}$

Tabela 17 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV com carga 1 kg.

Erro	Indicador	Controladores, condição de carga: 1 kg										Unidades	
		PID1	PID2	PID3	PID4	Fuzzy1a	Fuzzy1b	Fuzzy2a	Fuzzy2b	Fuzzy3a	Fuzzy3b		Proposta
<i>Ângulo</i>	μ_e	3,3946	1,5563	1,3756	1,2251	5,5835	1,3464	2,8161	1,1969	1,5372	1,3543	1,1335	° [graus]
	s_e	23,963	6,0011	11,008	5,4037	5,8887	6,1296	6,1806	5,314	4,2123	5,7164	8,5131	° [graus]
	<i>MSE</i>	585,61	38,434	123,05	30,7	65,836	39,384	46,122	29,67	20,106	34,509	73,751	-
	<i>RMSE</i>	24,199	6,1995	11,093	5,5407	8,1139	6,2756	6,7913	5,447	4,4839	5,8744	8,5878	° [graus]
	<i>MAE</i>	41,11	21,239	36,01	26,72	12,838	22,62	30,753	18,46	15,658	22,62	37,299	° [graus]
	<i>ISE</i>	57058	29302	24905	18417	3414,8	23609	5982	17809	12065	20702	44229	-
	<i>IAE</i>	2043,8	3814,9	1847	2615,5	351,46	3082,2	652,79	2622,6	2136,8	2842,2	4199,4	-
	<i>ITSE</i>	0,052833	0,76224	0,073984	0,4084	0,00097722	0,52255	0,0097263	0,38136	0,14041	0,27076	0,51219	$\times 10^{11}$
	<i>ITAE</i>	0,0016193	0,099213	0,0051767	0,059096	8,6909E-05	0,068962	0,00088138	0,057407	0,025681	0,037078	0,049955	$\times 10^{11}$
<i>Distância</i>	μ_e	4,9423	-14,392	-0,01569	2,4323	-3,4644	-8,7087	-3,5975	-5,5463	-3,815	-6,1335	-15,837	mm
	s_e	17,031	9,7124	13,366	11,07	6,8177	6,7794	4,6735	4,9142	4,627	6,8363	12,456	mm
	<i>MSE</i>	314,4	301,47	178,62	128,45	58,461	121,8	34,779	54,911	35,962	84,351	405,97	-
	<i>RMSE</i>	17,731	17,363	13,365	11,334	7,646	11,036	5,8974	7,4102	5,9968	9,1843	20,149	mm
	<i>MAE</i>	37,81	36,696	33,36	35,584	18,904	26,688	32,25	23,352	17,792	28,912	36,696	mm
	<i>ISE</i>	30084	229520	35823	76798	3024,8	72966	4235,1	32896	21576	50602	243560	-
	<i>IAE</i>	1433,1	11440	2211,1	5419,2	316,34	5632	608,8	3659,9	2878,8	4562	10401	-
	<i>ITSE</i>	0,018526	5,8772	0,097405	1,6729	0,00026073	1,6351	0,0046848	0,71509	0,2486	0,62961	2,8427	$\times 10^{11}$
	<i>ITAE</i>	0,00087402	0,29466	0,0059063	0,12346	3,6528E-05	0,12655	0,00060537	0,080887	0,034792	0,058395	0,12334	$\times 10^{11}$

Tabela 18 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV com carga 2 kg.

Erro	Indicador	Controladores, condição de carga: 2 kg										Proposta	Unidades
		PID1	PID2	PID3	PID4	Fuzzy1a	Fuzzy1b	Fuzzy2a	Fuzzy2b	Fuzzy3a	Fuzzy3b		
<i>Ângulo</i>	μ_e	-	-	-2,9618	1,1793	-	1,2815	-	1,1808	-	1,3687	-0,11439	° [graus]
	s_e	-	-	13,383	6,1205	-	7,3352	-	6,6722	-	6,7023	11,11	° [graus]
	MSE	-	-	186,88	38,846	-	55,445	-	45,91	-	46,791	123,42	-
	RMSE	-	-	13,67	6,2326	-	7,4462	-	6,7757	-	6,8404	11,11	° [graus]
	MAE	-	-	22,62	23,99	-	25,36	-	26,72	-	23,994	26,72	° [graus]
	ISE	-	-	844,29	6502,3	-	33263	-	27541	-	28060	43223	-
	IAE	-	-	38,799	797,62	-	3677,3	-	3285,5	-	3301,9	2613,3	-
	ITSE	-	-	2,6767E-06	0,014633	-	0,73395	-	0,59807	-	0,37333	0,13942	$\times 10^{11}$
	ITAE	-	-	8,6041E-08	0,0015308	-	0,082715	-	0,072137	-	0,043079	0,010522	$\times 10^{11}$
<i>Distância</i>	μ_e	-	-	-1,1181	-1,7436	-	-7,8922	-	-5,9188	-	-6,5247	-15,459	mm
	s_e	-	-	14,03	13,29	-	8,0592	-	6,7512	-	8,7576	12,769	mm
	MSE	-	-	197	179,62	-	127,23	-	80,609	-	119,26	402,02	-
	RMSE	-	-	14,036	13,402	-	11,28	-	8,9782	-	10,921	20,05	mm
	MAE	-	-	31,14	46,7	-	27,8	-	36,696	-	36,696	36,696	mm
	ISE	-	-	642,75	29812	-	76238	-	48163	-	71537	140750	-
	IAE	-	-	35,185	1772,7	-	5744,4	-	4150,4	-	5298,6	6113,4	-
	ITSE	-	-	2,0954E-06	0,060288	-	1,6727	-	1,0408	-	0,96158	0,58177	$\times 10^{11}$
	ITAE	-	-	7,383E-08	0,0032826	-	0,129	-	0,090455	-	0,068914	0,025204	$\times 10^{11}$

Tabela 19 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV com carga 3 kg.

Erro	Indicador	Controladores, condição de carga: 3 kg										Proposta	Unidades
		PID1	PID2	PID3	PID4	Fuzzy1a	Fuzzy1b	Fuzzy2a	Fuzzy2b	Fuzzy3a	Fuzzy3b		
<i>Ângulo</i>	μ_e	-	-	-0,54481	0,97235	-	1,2033	-	1,6346	-	2,9416	0,32778	° [graus]
	s_e	-	-	14,44	7,3031	-	8,8777	-	10,795	-	20,335	10,486	° [graus]
	<i>MSE</i>	-	-	208,11	54,238	-	80,252	-	119,18	-	421,73	110,06	-
	<i>RMSE</i>	-	-	14,426	7,3646	-	8,9584	-	10,917	-	20,522	10,491	° [graus]
	<i>MAE</i>	-	-	21,24	18,46	-	25,36	-	26,72	-	19,85	30,75	° [graus]
	<i>ISE</i>	-	-	1525,1	1706,5	-	19317	-	18215	-	8076,2	38607	-
	<i>IAE</i>	-	-	70,052	166,87	-	1716,4	-	1036,7	-	182,93	2535,2	-
	<i>ITSE</i>	-	-	8,3199E-06	0,00015978	-	0,076336	-	0,057006	-	0,00028025	0,21613	$\times 10^{11}$
<i>ITAE</i>	-	-	3,2094E-07	1,1419E-05	-	0,0065339	-	0,0019001	-	4,2892E-06	0,010776	$\times 10^{11}$	
<i>Distância</i>	μ_e	-	-	-10,118	-3,567	-	-7,5492	-	-6,192	-	-2,8741	-13,048	mm
	s_e	-	-	12,749	9,3744	-	9,8143	-	8,1256	-	20,955	12,204	mm
	<i>MSE</i>	-	-	264,36	100,53	-	153,3	-	104,35	-	448,03	319,16	-
	<i>RMSE</i>	-	-	16,259	10,027	-	12,381	-	10,215	-	21,125	17,865	mm
	<i>MAE</i>	-	-	27,8	26,69	-	28,91	-	36,696	-	36,696	34,47	mm
	<i>ISE</i>	-	-	1760,8	2939,4	-	36662	-	15914	-	8089,2	111490	-
	<i>IAE</i>	-	-	93,238	236,75	-	2462	-	1168,1	-	229,39	5353,7	-
	<i>ITSE</i>	-	-	1,0058E-05	0,00034318	-	0,13469	-	0,030062	-	0,00024335	0,44505	$\times 10^{11}$
<i>ITAE</i>	-	-	4,1053E-07	2,1216E-05	-	0,0089277	-	0,0019292	-	4,935E-06	0,021336	$\times 10^{11}$	

Tabela 20 – Indicadores de desempenho calculados para os ensaios na pista retangular com o AGV com carga 4 kg.

Erro	Indicador	Controladores, condição de carga: 4 kg										Unidades	
		PID1	PID2	PID3	PID4	Fuzzy1a	Fuzzy1b	Fuzzy2a	Fuzzy2b	Fuzzy3a	Fuzzy3b		Proposta
<i>Ângulo</i>	μ_e	-	-	1,6295	1,2754	-	1,0476	-	1,3957	-	1,5431	1,2131	° [graus]
	s_e	-	-	10,865	9,2229	-	7,8747	-	8,575	-	9,4087	10,657	° [graus]
	MSE	-	-	120,66	86,649	-	63,023	-	75,471	-	90,863	115,02	-
	RMSE	-	-	10,984	9,3085	-	7,9387	-	8,6874	-	9,5322	10,725	° [graus]
	MAE	-	-	28,07	22,62	-	23,994	-	26,72	-	17,06	36,01	° [graus]
	ISE	-	-	7461,2	4760,8	-	1202,7	-	17935	-	9205,4	68958	-
	IAE	-	-	551,25	298,62	-	117,41	-	1440,9	-	601,64	4927,9	-
	ITSE	-	-	0,0019787	0,0019425	-	2,8012E-05	-	0,10922	-	0,0066832	0,91362	$\times 10^{11}$
	ITAE	-	-	0,00013726	6,7279E-05	-	2,9452E-06	-	0,0057234	-	0,00026467	0,060643	$\times 10^{11}$
<i>Distância</i>	μ_e	-	-	2,0919	-1,5689	-	-8,0287	-	-5,9085	-	-5,713	-15,756	mm
	s_e	-	-	13,616	14,423	-	10,971	-	7,5552	-	10,581	14,292	mm
	MSE	-	-	189,7	210,4	-	184,67	-	91,985	-	144,55	452,49	-
	RMSE	-	-	13,773	14,505	-	13,589	-	9,5909	-	12,023	21,272	mm
	MAE	-	-	35,58	36,696	-	29,81	-	36,696	-	25,58	36,696	mm
	ISE	-	-	11484	11475	-	3261,4	-	21732	-	14191	271270	-
	IAE	-	-	663,11	633,48	-	198,66	-	1715,1	-	907,7	10867	-
	ITSE	-	-	0,0026588	0,0028602	-	8,662E-05	-	0,10312	-	0,0077607	3,4059	$\times 10^{11}$
	ITAE	-	-	0,00015501	0,00013727	-	4,8806E-06	-	0,0064943	-	0,00035343	0,13287	$\times 10^{11}$

Tabela 21 – Intervalo de amostragem e taxa de quadros por segundo (FPS) de cada controlador embarcado e ensaiado no AGV.

Controlador	Período <i>ms</i>	FPS
PID1	25	40
PID2	25	40
PID3	26	38
PID4	26	38
Fuzzy1a	26	38
Fuzzy1b	26	38
Fuzzy2a	26	38
Fuzzy2b	28	35
Fuzzy3a	47	21
Fuzzy3b	47	21
Fuzzy4	50	20

5.4 Discussão

A análise do impacto que os sensores utilizados no desempenho do sistema de controle pode ser realizado de acordo com os objetivos específicos do trabalho.

Do ponto de vista do (OE1), que propõe a investigação de quais sensores, dentre os embarcados no veículo, são necessários para o domínio do problema, seguem os seguintes pontos de discussão.

O uso de mais sensores medindo diferentes variáveis aumenta a fonte de informações sobre o comportamento do AGV. A implementação mostrou que o uso de sensores com medição redundante foi importante para perceber e entender o comportamento de um sensor específico. Quando o valor de velocidade angular estimada a partir da medição do ângulo de orientação realizado pela câmera foi comparado com os valores de velocidade angular para o mesmo eixo medidas pelas centrais inerciais, pode-se perceber o tempo morto inerente do sensor. Assim, durante o desenvolvimento do AGV, mesmo que o número de sensores embarcados seja limitado, ter outras fontes de validação dos dados e do comportamento do veículo é importante. Além disso, informações redundantes podem ser utilizadas no caso de falhas de sensores.

Para o AGV desenvolvido, a câmera é o sensor principal. Esse é o único sensor embarcado no AGV capaz de detectar e medir a faixa guia, que é a referência de posição do veículo. Assim, os demais sensores são utilizados a fim de melhorar o desempenho do sistema, partindo das informações de ângulo e distância medidos pela câmera, e usando dados que a câmera não é capaz de estimar ou medir. O uso de mais informações estimadas pela câmera se mostrou benéfica para o desempenho do sistema, comparando os controladores Fuzzy1a e Fuzzy1b com os controladores Fuzzy2a e Fuzzy2b. Utilizar as taxas de variação das variáveis já medidas pelo sensor melhorou os indicadores de desempenho por faixa de carga, exceto o máximo erro absoluto, que apresentou alguns valores

piores se comparado com os controladores Fuzzy1 (considerando ensaios de mesmo tempo de duração).

O uso das centrais inerciais, apesar de básico por usados dados brutos em apenas um eixo, foi importante para entender a característica da câmera e, dada essa característica, buscar antecipar as oscilações do veículo causadas pelo atraso amostral. O uso dos dados brutos não é necessário ao domínio de problema do AGV seguidor de linha, embora o uso da estimação dos estados do veículo para uma navegação inercial operando em paralelo com a referência da faixa guia possa ser benéfico para o sistema. Os resultados dos controladores Fuzzy3a e Fuzzy3b foram similares aos demais controladores. O compromisso da comunicação do hardware com os sensores e do processamento dos dados gerou um controlador com o desempenho similar ao controlador Fuzzy1b, que utiliza apenas dados da câmera. Ainda assim, o Fuzzy3b apresenta valores mais baixos do que o Fuzzy1b para o erro de ângulo e distância nos indicadores *ISE*, *IAE*, *ITSE* e *ITAE* para as condições em que há carga no AGV (considerando ensaios de mesmo tempo de duração).

Os encoders mostraram-se sensores essenciais para o AGV proposto. Sua utilização se deu principalmente para fechar a malha de realimentação de velocidade dos motores, tornando capaz o transporte de cargas mais pesadas pelo AGV. Devido às características do AGV, foi necessário que a operação ocorresse em baixa velocidade, o que significa baixa tensão de atuação para os motores. Assim, a malha de controle dos motores foi fundamental para compensar o peso extra das cargas no veículo. Em aplicações industriais, os próprios *drivers* de potência de motores de corrente contínua (sejam motores *brushless*, servomotores, etc) têm essa função. Os resultados confirmam que é muito importante essa malha de controle no domínio do problema e, especialmente, em casos que o veículo não tem uma relação potência x carga desproporcional, ou seja, *drivers* e atuadores superdimensionados para o peso e a amplitude de carga que o veículo irá transportar.

A leitura das correntes dos motores do AGV é uma forma indireta de se estimar a condição de carga do veículo, embora ofereça desafios para sua medição e interpretação, já que a própria operação do veículo causa variações na corrente dos motores. Para o sistema de controle desenvolvido, a medição das correntes dos motores contribuiu para o funcionamento do veículo em todas as condições de carga, mesmo que o desempenho final não tenha apresentado os melhores indicadores. Os resultados apontam que, apesar de não ser estritamente necessária para o domínio de problema, a medição da corrente pode contribuir para o sistema de controle, além de poder integrar outros módulos do AGV, como sistemas de segurança e proteção dos componentes embarcados.

O (OE2) propõe examinar qual a relação dos sensores embarcados com a estratégia de controle proposta sob os pontos de vista da aplicação adequada ao problema e dos requisitos do sistema de controle. A avaliação dos resultados por essa perspectiva deve considerar a diminuição do desempenho do sistema com o aumento do período de amostragem a cada inclusão de novos serviços e softwares para processamento de sensores. Como

a câmera é o sensor principal do veículo, o FPS é um fator decisivo para o desempenho do controlador. Nesse sentido, os requisitos do sistema de controle definidos na Seção 3.2 não foram plenamente atendidos. Entretanto, o uso de mais informações sobre o veículo possibilitou maior entendimento sobre seu funcionamento e detecção de falhas em outros sensores.

Por fim, o (OE3) foi definido de forma a avaliar o uso de mais variáveis do AGV e a diversidade dessas grandezas como entradas do controle de posição a fim de examinar seu impacto na exatidão e/ou precisão e no desempenho do sistema de controle. Somando às discussões já realizadas, a avaliação quantitativa absoluta do impacto na exatidão e/ou precisão do controle de posição do veículo não pode ser realizada visto que outros fatores, além da consideração de novas variáveis incluídas no sistema de controle, afetam o desempenho do sistema. Entretanto, uma análise qualitativa a partir dos resultados obtidos é possível, considerando a evolução gradual dos controladores até chegar na configuração da proposta da Tese.

Comparando os resultados entre os controladores PID, a consideração de duas variáveis do sistema contribuiu para o aumento relativo da exatidão do sistema. Considerando os controlador PID2 e PID4, os resultados mostram uma menor variabilidade dos dados comparando-se com os controladores PID1 e PID3 que tem como entrada apenas o erro de distância. Essa menor variabilidade é apontada pelo valores dos indicadores tanto do erro do ângulo quanto do erro de distância das Tabelas 16 e 17, na comparação entre os quatro controladores para ensaios bem sucedidos, e para os resultados gráficos apresentados para os ensaios na pista reta. Assim, pode-se classificar o AGV nessas configurações como exato e não preciso, como definido na Figura 2.

O (OE4) do trabalho foi desenvolver um controlador fuzzy-adaptativo em cascata para diferentes condições de carga considerando variáveis dinâmicas do AGV, isto é, as correntes dos motores. Esse objetivo tem relação direta com a hipótese principal do trabalho. A construção do controlador fuzzy-adaptativo em cascata passou pela implementação de cada sistema de inferência que, associados em cascata, formaram a proposta do trabalho.

Comparados com os controladores PID, os controladores Fuzzy apresentam indicadores piores na condição a vazio, porém, com a mudança da carga, a variação nos mesmos indicadores é bem menor do que a variação dos indicadores dos controladores PID. Isso mostra a adaptabilidade dos controladores Fuzzy, mesmo daqueles que não foram projetados para se adaptar de acordo com a carga do veículo. Esse comportamento contribui para a manutenção da exatidão do veículo.

Sobre os resultados da proposta, o controlador Fuzzy4, sua implementação considerou todos os demais controladores implementados e, dadas as condições, demandou que todos os sistemas já sintonizados fossem revistos, pois a taxa de FPS foi a mais baixa. Nesse caso, a sintonia do controlador se tornou complexa, pois muitos parâmetros foram revistos para ajustar a melhor resposta. Ainda assim, foram realizados experimentos de forma a

ajustar a ação de controle de cada FIS no período de amostragem de 50 *ms*. Conforme os experimentos foram realizados, ficou clara a degradação o sistema de controle, sendo difícil obter resultados melhores do que os outros sistemas Fuzzy com tempo de amostragem menor.

Mesmo com essa influência, o controlador Fuzzy4 demonstrou sua capacidade de adaptação, mantendo o AGV, mesmo que com uma amplitude de erro de distância grande, na faixa guia para todas as condições de carga. E apesar de não serem os melhores resultados, para condições de cargas diferentes o controlador apresenta indicadores similares, apontando que o efeito principal do controlador, melhorar a exatidão do sistema de controle diante da variação de carga, pode ser atingido com menor influência do tempo de processamento e do atraso amostral da câmera.

Em última análise, a Tabela 21 apresenta os valores de de período de amostragem e de FPS para cada controlador. A inclusão no software de controle embarcado de novos sensores e novos serviços ou softwares da SOA causa um aumento na necessidade de processamento fazendo com que o hardware embarcado não consiga manter o mesmo intervalo de processamento. O impacto dessa variação na malha de controle digital é significativa. No caso do Fuzzy4, somando ao aumento do período de amostragem para 50 *ms*, o atraso de amostras da câmera gera um atraso para o sistema de controle de até 0,5 *s*. Ou seja, o ângulo e a distância medidos levam muito tempo para serem processados, o que acaba causando um erro grande em relação à referência além de dificultar a sintonia do controlador.

5.5 Considerações Finais

Neste Capítulo foi descrito o método experimental utilizado no trabalho, foram apresentados os resultados de cada controlador embarcado no AGV, em meio gráfico e quantitativo, e foram apresentadas as discussões sobre os resultados obtidos de acordo com os objetivos específicos definidos no Capítulo 1. Os métodos descritos incluem os indicadores de desempenho utilizados para análise dos dados obtidos e a descrição do ambiente de ensaios e condições ensaiadas, além de definir a apresentação dos dados medidos nos experimentos. A discussão dos resultados se baseou nos objetivos específicos e na hipótese da Tese para avaliar se as perguntas de pesquisa que deram origem à esses pontos puderam ser respondidas. Além dos fatores que foram inicialmente determinados como pontos de interesse de pesquisa, ao longo do desenvolvimento, outros aspectos tiveram forte influência nos resultados da proposta. As perguntas de pesquisa iniciais visaram avaliar quais sensores e quais grandezas, quando utilizadas no controle de posição do AGV são necessárias ao domínio de problema (OE1), são adequadas ao sistema de controle e colaboram para atender os requisitos do sistema (OE2) e quais influenciam o desempenho do sistema de controle do ponto de vista da exatidão/precisão do controle de posição (OE3). Além

disso, a hipótese inicial do trabalho era de que o uso de mais variáveis do sistema contribui para o aumento da exatidão/precisão do sistema, sendo o desenvolvimento de tal controlador o objetivo (OE4). Entretanto, outros fatores importantes precisam ser considerados nos resultados, principalmente, a influência da reduzida capacidade de processamento do hardware embarcado e da característica de atraso da câmera. Os resultados, apesar de não validar totalmente a hipótese, apontam que o uso de mais variáveis do sistema pode contribuir para um melhor desempenho do sistema de controle, principalmente, nos casos em que a condição de carga do AGV é compensada na ação do controlador.

Conclusões

Síntese da proposta e dos objetivos

AGVs são sistemas conhecidos e aplicados na indústria de manufatura desde a década de 1950. Entretanto, as novas demandas do mercado e as novas tecnologias tornam necessária a pesquisa contínua do domínio de problema. Sobre os sensores utilizados para o sistema de controle de posição de um AGV, é comum o uso de apenas um sensor em veículos comerciais, como sensores magnéticos. Entretanto, a tecnologia dos sensores embarcados no AGV tem grande impacto no desempenho do controle de posição do AGV em relação à exatidão e precisão. Soma-se, ainda, a contribuição de um controle de posição adequado para o desempenho do sistema de produção e para segurança dos colaboradores e da instalação.

Partindo desse contexto, o objetivo principal do estudo foi implementar um controlador fuzzy-adaptativo em cascata utilizando múltiplos sensores de forma a aumentar a exatidão e/ou precisão do controle de posição do AGV seguidor de linha em comparação com a literatura. Esse objetivo geral englobou os objetivos específicos de (OE1) investigar, dentre os sensores propostos no projeto do AGV, quais sensores necessários e seus impactos para o domínio do problema, (OE2) examinar qual a relação desses sensores com a estratégia de controle proposta, (OE3) avaliar o uso de mais variáveis do AGV e a diversidade das grandezas consideradas no controle de posição, examinando seu impacto na exatidão e/ou precisão e no desempenho do sistema, (OE4) desenvolver um controlador fuzzy-adaptativo em cascata para diferentes condições de carga considerando a medição do nível de corrente dos motores de tração do veículo e (OE5) desenvolver uma arquitetura de software que permita o fácil entendimento por meio de documentação padronizada e o reuso de software.

Para a realização do estudo, um AGV diferencial foi desenvolvido com diferentes sensores para o estudo de acordo com os objetivos específicos listados anteriormente. O desenvolvimento do AGV envolveu a montagem mecânica e eletrônica do veículo e a implementação dos módulos de software necessários para a leitura dos sensores, a comu-

nicação com dispositivos externos ao processador principal, o comando dos atuadores e a operação dos controladores. A implementação da proposta foi realizada de forma gradual, criando sistemas de inferência dedicados à um tipo de sensor e associando-os em cascata de forma a atingir o controlador proposto no objetivo principal do trabalho.

Com os resultados apresentados somados aos resultados anteriores (OLIVEIRA; REIS; MORANDIN JUNIOR, 2019), pode-se concluir que o uso de câmeras como sensores de posição de AGVs seguidores de linha é adequado desde que se observe o impacto do tempo do processamento de imagem e da taxa de FPS resultante desse processo na malha de controle. Os experimentos com a câmera embarcada no AGV mostram ainda que o atraso amostral pode ser uma característica intrínseca do sensor e ter uma influência relacionada com a taxa de FPS.

Por conta da limitação de capacidade de processamento, apenas dados brutos das centrais inerciais foram usados. A aplicação desse dados na proposta contribuiu para o sistema de controle. Na medida em que foi considerada apenas a medição da velocidade angular $\dot{\Theta}$ por esses sensores, os dados foram usados de forma redundante para melhorar a resposta do controle e diminuir as oscilações do veículo.

Entretanto, o uso de filtros e técnicas de estimação da posição e ângulo de orientação do veículo a partir das centrais inerciais pode fornecer mais variáveis para o sistema, a ponto de se poder se comparar a distância medida pela câmera com o deslocamento no eixo y estimado pelo sistema inercial. Outro ponto de destaque é que a medição das mesmas grandezas por sensores diferentes podem revelar comportamentos inesperados no sistema.

Para um veículo cuja operação envolve a mudança na condição de carga, o controle de velocidade se mostrou necessário, no sentido de projetar sistemas cujo conjunto de tração, que inclui motores e circuitos de acionamento, não sejam superdimensionados, o que resulta em um custo elevado. Ainda sobre a variação de carga, a medição da corrente dos motores para consideração no controle gerou resultados que apontam a adaptação do controle de acordo com a carga alocada no AGV.

O desenvolvimento dos sistemas de controle mostrou que melhorar a exatidão do sistema de controle é mais simples do que sua precisão. Com a melhoria da exatidão, restringe-se a variação de posição do AGV à uma região de tolerância, que pode ser definida de acordo com as características construtivas do veículo. Já o aumento da precisão implica, no domínio do problema do AGV seguidor de linha com tração diferencial, na utilização de sensores, atuadores e sistema de processamento em conjunto com o sistema de controle embarcado que seja capaz de levar o erro de posição em relação à linha próximo de zero.

Contribuições e delimitações

A principal contribuição do trabalho foi a investigação do método para implementação dos controladores fuzzy, em cascata, considerando sensores diversos embarcados no veículo e a avaliação da medida em que o aumento do número de variáveis de entrada impacta na exatidão do controlador proposto.

Como contribuições secundárias do trabalho, pode-se citar o desenvolvimento do AGV e a implementação e testes da arquitetura de software baseada em SOA proposta utilizando o padrão fachada de desenvolvimento. O veículo propicia uma plataforma de ensaios para futuras pesquisas e o projeto dessa primeira versão será utilizado para o desenvolvimento de outras versões a partir de sua melhoria. O método de desenvolvimento de software idealizada no laboratório TEAR tem o objetivo de tornar todo o desenvolvimento futuro reutilizável, evitando a perda de conhecimento ao final dos períodos de pesquisa de graduandos, mestrandos e doutorandos, sendo este o primeiro trabalho totalmente desenvolvido por esse método.

Quanto às delimitações identificadas, além das citadas na Seção 1.6, o desempenho dos controladores embarcados foi limitado pelas características do hardware utilizado, não sendo de todo possível compensar essas características na sintonia dos controladores. Essa limitação de processamento também diminuiu as implementações possíveis para o processamento dos dados da leitura de sensores.

Até o momento, as seguintes contribuições diretamente ligadas ao trabalho da tese foram publicadas:

- ❑ Avaliação do uso da câmera como sensor de posição do AGV, avaliando o impacto das configurações parâmetros do processamento de imagem e da velocidade do AGV na resposta do sensor e no desempenho do controlador (OLIVEIRA; REIS; MORANDIN JUNIOR, 2019) e (REIS; OLIVEIRA; MORANDIN JUNIOR, 2019).
- ❑ As análises da revisão sistemática sobre o uso de sensores e técnicas de sensoriamento no problema de controle de posição de AGVs (REIS; MORANDIN JUNIOR, 2021).
- ❑ As análises e mapeamento das estratégias de controle utilizadas no problema de controle de posição de AGVs apresentados em Reis, Couto e Morandin Junior (2022a).
- ❑ Um conjunto de dados para modelagem de motores de corrente contínua (REIS; COUTO; MORANDIN JUNIOR, 2022b) e a proposta de plataforma para aquisição dos dados utilizando o Arduino (REIS; COUTO; JUNIOR, 2023).

Além disso, ao longo do período do doutorado as seguintes contribuições indiretamente ligadas ao trabalho da tese foram publicadas:

- ❑ Avaliação do impacto da configuração dos parâmetros do pacote de localização adaptativa usando algoritmo de Monte Carlos do ROS (*Robot Operating System*) na lo-

calização de um AGV em um mapa determinístico (REIS; MORANDIN JUNIOR; VIVALDINI, 2019) e (REIS *et al.*, 2021).

Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros podem se divididos em:

- ❑ Discussão e revisão do projeto mecânico e eletrônico do AGV AD02;
- ❑ Avaliação de outras estratégias e métodos para o sistema de controle embarcado;
- ❑ Exploração das agendas de pesquisa identificadas nas revisões sistemáticas da literatura publicadas; e,
- ❑ Projetos derivados que foram identificados durante o período da pesquisa.

O AGV desenvolvido para os experimentos da tese é uma versão inicial e, após os ensaios e os resultados obtidos, passará por um estudo de melhorias. Nesse sentido, alguns trabalhos futuros devem ser endereçados para determinar novas características construtivas do AGV, novos sensores ou novas formas de processamento dos dados dos sensores. Esses estudos são necessários pois a plataforma foi desenvolvida para ser uma plataforma de testes duradoura, que possa ser usada em diferentes pesquisas, com reuso de código e fácil incorporação de novos serviços e softwares majoritários.

A câmera embarcada no veículo foi escolhida, inicialmente, por ter conexão simples com a Raspberry Pi e apresentar uma alta taxa de FPS em comparação com outras câmeras USB. Apesar de não ser necessário para o projeto do AGV, manter uma câmera RGB foi pensado para possibilitar, no futuro, pesquisas sobre a influência de diferentes cores de iluminação na pista para a identificação da faixa guia na utilização ou filtragem por canal de cor RGB. Entretanto, o atraso de amostras identificado degradou muito o desempenho do controlador. Assim, será necessário o estudo e modificações no projeto para instalar uma nova câmera RGB ou outro modelo, como uma câmera de disparo global.

Após os ensaios, foi identificado que a posição da câmera no eixo das rodas para o tamanho do AGV pode causar distúrbios desnecessários na medição, o que poderia ser mitigado se a câmera estivesse mais afastada do eixo dos motores. Assim, um trabalho futuro é investigar qual a melhor posição da câmera em relação aos motores de um AGV diferencial e qual o impacto da posição tanto na medição quanto no desempenho do controlador.

Sobre o hardware de processamento embarcado, hoje ele já representa um gargalo para o software embarcado e par ao número de sensores que se deseja utilizar. Assim, uma versão futura do AGV precisa de uma avaliação da necessidade de troca do hardware ou

da utilização de diferentes processadores para tarefas, ou seja, ter mais microprocessadores embarcados dedicados a tarefas específicas, como o processamento de imagem. E nessa linha, soma-se a necessidade de estudar os protocolos de comunicação ou modos de comunicação entre os processadores que ofereçam o menor impacto para a malha de controle.

Ainda sobre a plataforma, dois projetos de pesquisa já estão sendo realizados no sentido de desenvolver serviços a serem incorporados no veículo. Os projetos de pesquisa foram aprovados em edital de pesquisa institucional no IFRJ e implementam serviços de processamento de imagem. Um serviço tem o objetivo de detectar e identificar etiquetas com QR Codes localizadas na pista que serão utilizadas para navegação e localização do veículo, contendo informações como posição de estações de trabalho, comandos para diminuição ou aumento da velocidade e indicação de curvas, bifurcação ou cruzamentos. O segundo projeto tem o objetivo de implementar um serviço de medição do estado de conservação da pista, identificando nível de desgaste e falhas na pista durante a operação do veículo.

Sobre o sistema de controle e as estratégias e métodos para desenvolvimento e sintonia de controladores, alguns pontos principais emergiram para futuras investigações.

Apenas um tipo de sistema fuzzy foi utilizado no trabalho, com limitação na granularidade das funções de pertinência e na base de regras, de forma simplificar os ajustes pelo especialista. Entretanto, outras formatações dos sistemas podem ser mais adequadas ao problema ou obter melhores resultados em condições específicas, como a condição de variação de carga. Assim, a pesquisa indica que examinar o desempenho de outros sistema fuzzy deve ser um trabalho futuro. O veículo foi desenvolvido para trabalhar com múltiplos sensores, cada um com seus erros e incertezas características. Há muitas formas de tratar essas incertezas e uma delas é a utilização de sistemas fuzzy Tipo-2 intervalar. Assim, as incertezas dos sensores podem ser tratadas nas manchas de incerteza (*Footprint Of Uncertainty* - FOU) desses sistemas de inferência.

Além de controladores fuzzy, a aplicação de outros controladores deve ser alvo de investigação no futuro.

Durante os ensaios para sintonia dos controladores elaborados e testados na tese, foi identificada a dificuldade de sintonia dos muitos parâmetros do sistema para a estabilidade e melhora no desempenho do controle de posição do veículo. Com o acoplamento em cascata e vários sistemas de inferência fuzzy e com as mudanças no período de amostragem do sistema embarcado, a cada configuração, novos ajustes foram necessários. Com um espaço de busca tão vasto, pontos de sintonia melhores do que os apresentados podem nem ter sido explorados. Assim, um sistema de sintonia inteligente dos parâmetros do controlador do AGV é um tema para futura investigação e implementação. Inicialmente, para utilizar o *know-how* do laboratório de pesquisa TEAR, pretende-se explorar o uso de Algoritmos Genéticos para essa sintonia.

Na atual estrutura de hardware, esse sistema deverá ser separado ao sistema embarcado, compartilhando dos dados medidos pelo sistema principal e alterando parâmetros em ensaios específicos para sintonia. Há, ainda, uma ramificação para essa linha, alinhada com a Indústria 4.0, que é concentrar os dados de operação do AGV na nuvem para processamento assíncrono desses dados utilizando ferramentas de aprendizagem de máquina. Assim, durante a execução do AGV esse sistema poderia propor alterações nos parâmetros do veículo para melhor desempenho, compensar falhas, prever comportamentos e necessidade de manutenção, por exemplo.

A quantidade de ensaios que foram necessários para sintonia dos parâmetros do veículo apontam para a necessidade de virtualização do processo, utilizando simuladores. Considerando, principalmente, o processo de sintonia de veículos maiores, que demandam mais espaço para simulação e podem ser mais perigosos se apresentarem falhas durante os experimentos, a criação de um ambiente de simulação com uma boa representação da realidade para ensaios de AGVs é uma necessidade futura. O laboratório já conta com um AGV de tração omnidirecional com rodas tipo mecanum modelado no ambiente Unity. O simulador conta com motores de física para representação do mundo real.

Maiores investigações são necessárias para configurar os elementos já presentes no software, como conjuntos massa-mola-amortecedor para representação de rodas de veículos, e também para representar itens mecânicos mais específicos à AGVs e robôs móveis. Além disso, a simulação de sensores ainda é limitada, o que aponta para uma linha de modelagem e implementação futura. Alguns simuladores de robótica já possuem sensores simulados, porém, a maior parte dos simuladores tem uma representação limitada dos fenômenos físicos, não sendo possível alterar, por exemplo, a interação entre dois materiais diferentes.

Ainda sobre simuladores, com representação de fenômenos físicos do Unity 3D e o compartilhamento dos dados do AGV real com um AGV simulado, pode-se, futuramente, explorar os testes de AGVs utilizando o método *hardware-in-the-loop* (HIL). Dessa forma, partes do controle, sensoriamento e atuação do veículo poderiam ser testadas sem a necessidade de colocar o AGV no chão ou precisar de um espaço muito grande para os testes.

Ambas as revisões sistemáticas realizadas propuseram uma agenda de pesquisa a partir da leitura dos textos selecionados e da identificação de tendências ou necessidades futuras de pesquisa. Para os tópicos listados em Reis e Morandin Junior (2021), destaca-se a necessidade de pesquisa em sensores de visão de máquina com o foco em soluções padronizadas e em sensores inteligentes para conexão de sistemas de AGV na Indústria 4.0. Como identificado por Ullrich (2015), sistemas de visão de máquina fazem parte da nova era de sensores para AGV, mas ainda estão em desenvolvimento. Dessa forma, a pesquisa é indispensável de forma a desenvolver sensores que atendam normas regulatórias e a aceitação do mercado.

Dentre os tópicos listados em Reis, Couto e Morandin Junior (2022a), destaca-se a necessidade de investigação na aplicação de fusão de sensores para o domínio de problema e a carência de métodos de validação e métricas de performance para AGVs. Os resultados da revisão apontaram que apenas três artigos empregavam alguma técnica de fusão de sensores, sendo mais aplicados a sensores mais comumente relacionados em propostas na literatura, como centrais inerciais e scanners laser. Dessa forma, um trabalho futuro é a investigação das vantagens e desvantagens da aplicação de técnicas de fusão de sensores e o impacto na exatidão/precisão dos sistemas de controle.

Sobre os métodos de validação e métricas, não foi identificada uma referência no desenho de experimentos para o domínio do problema, apesar de vários estudos publicados apresentarem métricas para sistemas de AGVs ou para sistema de navegação de AGVs. Os métodos apresentados nas publicações são limitados a análises gráficas e de estatística básica, não proporcionando a capacidade de comparação, já que não existem padrões. Por isso, um estudo futuro é a busca por métricas e desenhos de experimento que possibilitem a comparação de diferentes abordagens, de forma que a área de pesquisa possa evoluir.

Por fim, alguns estudos derivados foram identificados ao longo da pesquisa. Recentemente, o uso de robôs móveis autônomos (AMR - Autonomous Mobile Robots) para aplicações de intra logística têm se intensificado. A principal diferença desses veículos para AGVs é o método de guiamento. Entende-se que a utilização de um tipo ou outro de guia ou navegação para os veículos depende da aplicação. Durante a revisão da literatura, não foi identificado um veículo híbrido, que utilize cada tipo de abordagem dependendo do ambiente. Para o caso do veículo trocar de ambientes, por exemplo, transitar entre galpões de produção passando por um trecho de ambiente externo, a característica de AMRs é interessante. Entretanto, no interior de cada galpão, em um ambiente controlado e de layout menos dinâmico, o utilização de faixas guia pode representar maior exatidão.

Referências

ABDELHAKIM, G.; ABDELOUAHAB, H. A new approach for controlling a trajectory tracking using intelligent methods. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, Springer, v. 14, n. 3, p. 1347–1356, 2019.

ALAKSHENDRA, V.; CHIDDARWAR, S. S. A robust adaptive control of mecanum wheel mobile robot: simulation and experimental validation. In: IEEE. **2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**. [S.l.], 2016. p. 5606–5611.

ALBERTOS, P.; ANTONIO, S. **Multivariable control systems: an engineering approach**. Londres: Springer, 2006.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. **Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**. [S.l.], 2020. Rev. 19.

AMAYA, A. J. R. *et al.* Comparison of defuzzification methods: Automatic control of temperature and flow in heat exchanger. **Automation Control Theory and Practice; Rodic, AD, Ed.; Books on Demand: Norderstedt, Germany**, p. 77–88, 2009.

AMMAR, H. H.; AZAR, A. T. Robust path tracking of mobile robot using fractional order pid controller. In: SPRINGER. **International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications**. [S.l.], 2019. p. 370–381.

ANDREEV, A. S.; PEREGUDOVA, O. A. On global trajectory tracking control for an omnidirectional mobile robot with a displaced center of mass. **Nelineinaya Dinamika [Russian Journal of Nonlinear Dynamics]**, Steklov Mathematical Institute of Russian Academy of Sciences, v. 16, n. 1, p. 115–131, 2020.

ARKIN, R. C. **Behavior-based robotics**. [S.l.]: MIT press, 1998.

ARMESTO, L. *et al.* Duality-based nonlinear quadratic control: Application to mobile robot trajectory-following. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, IEEE, v. 23, n. 4, p. 1494–1504, 2015.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. The future of pid control. **Control engineering practice**, Elsevier, v. 9, n. 11, p. 1163–1175, 2001.

- _____. Revisiting the ziegler–nichols step response method for pid control. **Journal of process control**, Elsevier, v. 14, n. 6, p. 635–650, 2004.
- BAI, G. *et al.* Path tracking of wheeled mobile robots based on dynamic prediction model. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 39690–39701, 2019.
- BAI, H. *et al.* Model predictive visual trajectory-tracking control of wheeled mobile robots. In: IEEE. **2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**. [S.l.], 2019. p. 569–574.
- BASCETTA, L. *et al.* Design and implementation of the low-level control system of an all-terrain mobile robot. In: IEEE. **2009 International Conference on Advanced Robotics**. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- BAŞÇI, A.; DERDIYOK, A. Real-time velocity and direction angle control of an automated guided vehicle. **Int J Robot Autom**, v. 29, p. 227–233, 2014.
- BOSTELMAN, R.; HONG, T.; EASTMAN, R. Safety and performance standard developments for automated guided vehicles. In: **Mobile Service Robotics**. [S.l.]: World Scientific, 2014. p. 487–494.
- BOUKENS, M.; BOUKABOU, A.; CHADLI, M. Robust adaptive neural network-based trajectory tracking control approach for nonholonomic electrically driven mobile robots. **Robotics and Autonomous Systems**, Elsevier, v. 92, p. 30–40, 2017.
- BRADSKI, G. The OpenCV Library. **Dr. Dobb’s Journal of Software Tools**, 2000.
- BRÄUNL, T. **Embedded Robotics-From Mobile Robots to Autonomous Vehicles with Raspberry Pi and Arduino**. [S.l.]: Springer, 2022.
- BROOKS, R. A robust layered control system for a mobile robot. **IEEE journal on robotics and automation**, IEEE, v. 2, n. 1, p. 14–23, 1986.
- BUI, T. L. Decentralized motion control for omnidirectional mobile platform—tracking a trajectory using pd fuzzy controller. In: **AETA 2015: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences**. [S.l.]: Springer, 2016. p. 803–819.
- CAMPOS, M. M. de; SAITO, K. **Sistemas inteligentes em controle e automação de processos**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2004.
- CARIDÁ, V. F. **Modelo fuzzy cascata multiatributos e preditivo para despacho de AGVs em FMS**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Departamento de Computação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Maio 2016.
- CHANDRAMOHAN, A.; RAO, M.; ARUMUGAM, M. S. Two new and useful defuzzification methods based on root mean square value. **Soft computing**, Springer, v. 10, n. 11, p. 1047–1059, 2006.
- CHEE, W. Yaw rate estimation using two 1-axis accelerometers. In: IEEE. **Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005**. [S.l.], 2005. p. 423–428.
- CHEN, P.-J. *et al.* Slip estimation and compensation control of omnidirectional wheeled automated guided vehicle. **Electronics**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 7, p. 840, 2021.

- CHEN, R.; HAO, F.; FEI, Z. Design of magnetic navigation automatic guided vehicle system. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2019. v. 1311, n. 1, p. 012040.
- CHEN, Z. *et al.* Real-time predictive sliding mode control method for agv with actuator delay. **Advances in Manufacturing**, Springer, v. 7, n. 4, p. 448–459, 2019.
- _____. Adaptive neural network-based trajectory tracking control for a nonholonomic wheeled mobile robot with velocity constraints. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, 2020.
- CHO, H. *et al.* Improved positioning method for magnetic encoder type agv using extended kalman filter and encoder compensation method. **International Journal of Control, Automation and Systems**, Springer, v. 15, n. 4, p. 1844–1856, 2017.
- CHUN-FU, W. *et al.* Research on visual navigation algorithm of agv used in the small agile warehouse. In: IEEE. **2017 Chinese Automation Congress (CAC)**. [S.l.], 2017. p. 217–222.
- CUPEK, R. *et al.* Autonomous guided vehicles for smart industries—the state-of-the-art and research challenges. In: SPRINGER. **International Conference on Computational Science**. [S.l.], 2020. p. 330–343.
- DAS, A.; KASEMSINSUP, Y.; WEILAND, S. Optimal trajectory tracking control for automated guided vehicles. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 303–308, 2017.
- DIAN, S. *et al.* Double closed-loop general type-2 fuzzy sliding model control for trajectory tracking of wheeled mobile robots. **International Journal of Fuzzy Systems**, Springer, v. 21, n. 7, p. 2032–2042, 2019.
- DOBROSIELSKI, W. T. *et al.* Triangular expanding, a new defuzzification method on ordered fuzzy numbers. In: **Advances in Fuzzy Logic and Technology 2017**. [S.l.]: Springer, 2017. p. 605–619.
- DOMBI, J.; TÓTH-LAUFER, E. Reducing the computational requirements in the mamdani-type fuzzy control. **Acta Polytechnica Hungarica**, v. 17, n. 3, 2020.
- DÒRIA-CEREZO, A. *et al.* Sliding mode control of a differential-drive mobile robot following a path. In: IEEE. **2019 18th European Control Conference (ECC)**. [S.l.], 2019. p. 4061–4066.
- DU, E.; REN, Y. Research on control algorithm for laser guided agv based on proximal policy. In: IEEE. **2020 Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC)**. [S.l.], 2020. p. 1–7.
- DUDEK, G.; JENKIN, M. **Computational principles of mobile robotics**. [S.l.]: Cambridge university press, 2010.
- ELLIS, G. **Observers in control systems: a practical guide**. Londres: Elsevier, 2002.
- _____. **Control system design guide: using your computer to understand and diagnose feedback controllers**. 4. ed. Oxford: Elsevier, 2012.

- ERL, T. **Service-oriented architecture**. Upper Saddle River: Pearson Education Incorporated, 2009.
- FATEH, M. M.; ARAB, A. Robust control of a wheeled mobile robot by voltage control strategy. **Nonlinear Dynamics**, Springer, v. 79, n. 1, p. 335–348, 2015.
- FELEDY, C. **A State of the Art Map of the AGVS Technology and a Guideline for How and Where to Use It**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade de Lund, Lund, Maio 2017.
- FENG, T.; JIAO, B. Research on agv trajectory tracker based on fuzzy control. In: **Intelligent Computing, Networked Control, and Their Engineering Applications**. [S.l.]: Springer, 2017. p. 23–32.
- FU, J. *et al.* Motion tracking control design for a class of nonholonomic mobile robot systems. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems**, IEEE, v. 50, n. 6, p. 2150–2156, 2020.
- GOLDBERG, D. Huxley: A flexible robot control architecture for autonomous underwater vehicles. In: IEEE. **OCEANS 2011 IEEE-Spain**. [S.l.], 2011. p. 1–10.
- GONZÁLEZ, S. R. *et al.* Manufacturing control architecture for fms with agv: A state-of-the-art. In: **Advances in Automation and Robotics Research in Latin America**. [S.l.]: Springer, 2017. p. 157–172.
- GOSWAMI, N. K.; PADHY, P. K. Gain tuning of lyapunov function based controller using pso for mobile robot control. In: IEEE. **2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)**. [S.l.], 2016. p. 295–299.
- HAN, Y.; CHENG, Y.; XU, G. Trajectory tracking control of agv based on sliding mode control with the improved reaching law. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 20748–20755, 2019.
- HANG, C. C.; ÅSTRÖM, K. J.; HO, W. K. Refinements of the ziegler–nichols tuning formula. In: IET. **IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)**. [S.l.], 1991. v. 138, n. 2, p. 111–118.
- HASAN, S. F.; ALWAN, H. M. Design of hybrid controller for the trajectory tracking of wheeled mobile robot with mecanum wheels. **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**, v. 43, n. 5, p. 400–414, 2020.
- HOODA, D.; RAICH, V. **Fuzzy logic models and fuzzy control: an introduction**. Oxford: Alpha Science International, 2016.
- HWANG, C.-L.; YANG, C.-C.; HUNG, J. Y. Path tracking of an autonomous ground vehicle with different payloads by hierarchical improved fuzzy dynamic sliding-mode control. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, IEEE, v. 26, n. 2, p. 899–914, 2018.
- IBRAHIM, K.; SHARKAWY, A. B. A hybrid pid control scheme for flexible joint manipulators and a comparison with sliding mode control. **Ain Shams Engineering Journal**, Elsevier, v. 9, n. 4, p. 3451–3457, 2018.

- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos Fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. Duque de Caxias: INMETRO, 2012.
- INVENSENSE INC. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification**. [S.l.], 2013. Rev. 3.4.
- IVANJKO, E.; KOMSIC, I.; PETROVIC, I. Simple off-line odometry calibration of differential drive mobile robots. In: **Proceedings of 16th Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region-RAAD**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 164–169.
- IVANJKO, E.; PETROVIC, I.; PERIC, N. An approach to odometry calibration of differential drive mobile robots. In: **EDPE'03, International Conference on Electrical Drives and Power Electronics**. [S.l.: s.n.], 2003. p. 519–523.
- JACOBS, L. *et al.* H_∞ controller synthesis for agv trajectory tracking using a linearized kinematic model. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier, v. 52, n. 15, p. 61–66, 2019.
- JANG CHUEN-TSAI SUN, E. M. J.-S. R. **Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.
- JOSUTTIS, N. M. **SOA in Practice: The Art of Distributed System Design**. Sebastopol: O'Reilly Media, 2007. (Theory in Practice).
- KANJANAWANISHKUL, K.; PHOOHUENGKAEAO, R.; KUMSON, A. Development of an automated guided vehicle with omnidirectional mobility for transportation of lightweight loads. In: EDP SCIENCES. **MATEC Web of Conferences**. [S.l.], 2015. v. 34, p. 05003.
- KAR, A. K. *et al.* Trajectory tracking by automated guided vehicle using ga optimized sliding mode control. In: IEEE. **2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)**. [S.l.], 2016. p. 71–76.
- _____. Relative vehicle displacement approach for path tracking adaptive controller with multisampling data transmission. **IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence**, IEEE, v. 3, n. 4, p. 322–336, 2019.
- KIM, D. H.; KIM, S. B. Path following control of automated guide vehicle using camera sensor. In: SPRINGER. **International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications**. [S.l.], 2020. p. 932–938.
- KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, n. 2004, p. 1–26, 2004.
- KORTENKAMP, D.; SIMMONS, R.; BRUGALI, D. Robotic systems architectures and programming. In: **Springer Handbook of Robotics**. [S.l.]: Springer, 2016. p. 283–306.
- LASATER, C. G. *et al.* **Design patterns**. [S.l.]: Jones & Bartlett Publishers, 2006.
- LEWIS, F. L.; GE, S. S. **Autonomous mobile robots: sensing, control, decision making and applications**. [S.l.]: CRC Press, 2018.

- LEWIS, H. W. **The foundations of fuzzy control**. Nova Iorque: Springer Science & Business Media, 1997. v. 10.
- LI, G.; TSANG, K. M. Concurrent relay-pid control for motor position servo systems. **International Journal of Control, Automation, and Systems**, Institute of Control, Robotics and Systems, v. 5, n. 3, p. 234–242, 2007.
- LI, R. *et al.* Landmark assisted stereo visual odometry. In: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS RESTON, VA. **International Conference on Transportation and Development 2019: Innovation and Sustainability in Smart Mobility and Smart Cities**. [S.l.], 2019. p. 46–53.
- LI, X. *et al.* A fuzzy pid controller applied in agv control system. In: IEEE. **2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)**. [S.l.], 2016. p. 555–560.
- LI, Y. *et al.* Tracking control algorithm based on fuzzy logic for batch-feeding agv. In: SPRINGER. **Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics**. [S.l.], 2020. p. 564–573.
- LI, Z. *et al.* Trajectory-tracking control of mobile robot systems incorporating neural-dynamic optimized model predictive approach. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, IEEE, v. 46, n. 6, p. 740–749, 2015.
- LIAO, J.; CHEN, Z.; YAO, B. Model-based coordinated control of four-wheel independently driven skid steer mobile robot with wheel-ground interaction and wheel dynamics. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, v. 15, n. 3, p. 1742–1752, 2018.
- LIENDRO, T.; ZUDAIRE, S. Hybrid control from scratch: A design methodology for assured robotic missions. **arXiv preprint arXiv:2004.11258**, 2020.
- LIMA, I.; PINHEIRO, C. A.; SANTOS, F. A. O. **Inteligência artificial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- LIN, M.; YONGSHENG, Y.; JUN, Z. Design and simulation of trajectory tracking controller based on fuzzy sliding mode control for. In: IEEE. **2018 International Symposium in Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)**. [S.l.], 2018. p. 1–5.
- LIU, K. *et al.* Adaptive sliding mode based disturbance attenuation tracking control for wheeled mobile robots. **International Journal of Control, Automation and Systems**, Springer, v. 18, n. 5, p. 1288–1298, 2020.
- LIU, W.; WANG, X.; LIANG, S. Trajectory tracking control for wheeled mobile robots based on a cascaded system control method. In: IEEE. **IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S.l.], 2020. p. 396–401.
- LIU, W. *et al.* Yaw stability control of automated guided vehicle under the condition of centroid variation. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Springer, v. 44, n. 1, p. 1–15, 2022.
- LYNCH, L. *et al.* Automated ground vehicle (agv) and sensor technologies-a review. In: IEEE. **2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST)**. [S.l.], 2018. p. 347–352.

- MAHDIANI, H. R.; BANAIYAN, A.; FAKHRAIE, S. M. Hardware implementation and comparison of new defuzzification techniques in fuzzy processors. In: IEEE. **2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems**. [S.l.], 2006. p. 4–pp.
- MALU, S. K.; MAJUMDAR, J. Kinematics, localization and control of differential drive mobile robot. **Global Journal of Research In Engineering**, 2014.
- MARLIN, T. E. **Process Control Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance**. 2. ed. Ontario: McGraw-Hill, 2015.
- MATARIĆ, M. J. **Introdução à robótica**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2014.
- MOHAMMADZADEH, A. *et al.* **Modern Adaptive Fuzzy Control Systems**. [S.l.]: Springer, 2023. v. 421. (Studies in Fuzziness and Soft Computing, v. 421).
- NOVALES, C.; MOURIOUX, G.; POISSON, G. A multi-level architecture controlling robots from autonomy to teleoperation. In: **First National Workshop on Control Architectures of Robots, Montpellier**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 6.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- OLIVEIRA, D. P. d. **Estratégia de modelagem da dinâmica de controladores para controle de AGV**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Departamento de Computação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Novembro 2018.
- OLIVEIRA, D. P. de. **Estratégia De Modelagem Da Dinâmica De Controladores Para Controle De AGV**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PPGCC), Departamento de Computação - DC, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, 2018.
- OLIVEIRA, D. P. de; REIS, W. P. N. dos; MORANDIN JUNIOR, O. A qualitative analysis of a usb camera for agv control. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 19, p. 4111, 2019.
- OLIVEIRA, L. B. R. *et al.* A systematic review on service-oriented robotic systems development. São Carlos, SP, Brasil., 2012.
- OLIVEIRA, L. B. R. de. **Architectural design of service-oriented robotic systems**. 216 p. Tese (Doutorado) — Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC - USP e Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires - IRISA-UBS, july 2015.
- OMRON. **Incremental 40-mm-dia. Rotary Encoder E6B2-C**. [S.l.], 2017.
- OYEKANLU, E. A. *et al.* A review of recent advances in automated guided vehicle technologies: Integration challenges and research areas for 5g-based smart manufacturing applications. **IEEE Access**, IEEE, v. 8, p. 202312–202353, 2020.
- PAPAZOGLU, M. P. *et al.* Service-oriented computing: a research roadmap. **International Journal of Cooperative Information Systems**, World Scientific, v. 17, n. 02, p. 223–255, 2008.

- PATKI, V.; SONAWANE, D.; INGOLE, D. D. Design and implementation of discrete augmented ziegler-nichols pid control. In: SPRINGER. **International Conference on Advances in Information Technology and Mobile Communication**. [S.l.], 2012. p. 262–268.
- PAZDERSKI, D.; KOZŁOWSKI, K.; GAWRON, T. A unified motion control and low level planning algorithm for a wheeled skid-steering robot. In: IEEE. **2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)**. [S.l.], 2015. p. 1–8.
- PENG, S.; SHI, W. Adaptive fuzzy output feedback control of a nonholonomic wheeled mobile robot. **IEEE Access**, IEEE, v. 6, p. 43414–43424, 2018.
- PRATAMA, P. S. *et al.* Positioning and obstacle avoidance of automatic guided vehicle in partially known environment. **International Journal of Control, Automation and Systems**, Springer, v. 14, n. 6, p. 1572–1581, 2016.
- QI, J.; WU, Y. Trajectory tracking control for double-steering automated guided vehicle based on model predictive control. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2020. v. 1449, n. 1, p. 012107.
- QI, R.; TAO, G.; JIANG, B. Fuzzy system identification and adaptive control. Springer, Cham, 2019.
- REIS, W. P. N. d.; COUTO, G. E.; MORANDIN JUNIOR, O. Automated guided vehicles position control: a systematic literature review. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, p. 1–63, 2022a.
- _____. Direct current geared motor data: Voltage, current, and speed measured under different experimental conditions. **Data in Brief**, v. 40, p. 107802, 2022b. ISSN 2352-3409. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340922000142>>.
- REIS, W. P. N. d. *et al.* An extended analysis on tuning the parameters of adaptive monte carlo localization ros package in an automated guided vehicle. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 117, p. 1975–1995, 2021.
- REIS, W. P. N. dos; COUTO, G. E.; JUNIOR, O. M. Proposta de plataforma didática para identificação e modelagem de motores de corrente contínua usando arduíno para aquisição dos dados. **Revista Valore**, v. 8, p. 8031, 2023.
- REIS, W. P. N. dos; MORANDIN JUNIOR, O. Sensors applied to automated guided vehicle position control: a systematic literature review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, p. 1–14, 2021.
- REIS, W. P. N. dos; MORANDIN JUNIOR, O.; VIVALDINI, K. C. T. A quantitative study of tuning ros adaptive monte carlo localization parameters and their effect on an agv localization. In: IEEE. **2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)**. [S.l.], 2019. p. 302–307.
- REIS, W. P. N. dos; OLIVEIRA, D. P. de; MORANDIN JUNIOR, O. Evaluating the rgb camera image resolution variation impact on the performance of an agv position control system. In: IEEE. **IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S.l.], 2019. v. 1, p. 5610–5615.

REN, C. *et al.* Extended state observer-based sliding mode control of an omnidirectional mobile robot with friction compensation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 66, n. 12, p. 9480–9489, 2019.

RODRIGUES JUNIOR, F. A. **Análise de desempenho de trajetória de AGV seguidor de linha usando controle Fuzzy adaptativo**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência da COmputação, Departamento de Computação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Agosto 2017.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 2. ed. Chichester: Wiley Online Library, 2004.

ROSSOMANDO, F. G.; SORIA, C. M. Identification and control of nonlinear dynamics of a mobile robot in discrete time using an adaptive technique based on neural pid. **Neural Computing and Applications**, Springer, v. 26, n. 5, p. 1179–1191, 2014.

ROY, S. *et al.* Robust control of nonholonomic wheeled mobile robot with past information: Theory and experiment. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 231, n. 3, p. 178–188, 2017.

SAADE, J. J.; DIAB, H. B. Defuzzification methods and new techniques for fuzzy controllers. **IRANIAN JOURNAL OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (IJECE)**, 2004.

SAKIR, R. K. A. *et al.* Movement control algorithm of weighted automated guided vehicle using fuzzy inference system. In: IEEE. **2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)**. [S.l.], 2017. p. 135–139.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. B. Metodologia de pesquisa. McGraw Hill-Penso, Porto Alegre, v. 5, 2013.

SANGTUNGTONG, W.; DADTHUYAWAT, W. The two parallel pid controllers with their output-weighting adaptation. In: IEEE. **2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology**. [S.l.], 2013. p. 1–5.

SEN, C. *et al.* On active disturbance rejection control for path following of automated guided vehicle with uncertain velocities. In: IEEE. **2019 American Control Conference (ACC)**. [S.l.], 2019. p. 2446–2451.

SEPTYAN, M.; AGUSTINAH, T. Trajectory tracking automated guided vehicle using fuzzy controller. In: IEEE. **2019 International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIIIT)**. [S.l.], 2019. p. 169–174.

SETIAWAN, Y. D. *et al.* Path tracking controller design of four wheel independent steering automatic guided vehicle. **International Journal of Control, Automation and Systems**, Springer, v. 14, n. 6, p. 1550–1560, 2016.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to autonomous mobile robots**. [S.l.]: MIT press, 2011.

- SIERRA-GARCIA, J. E.; SANTOS, M. Combining reinforcement learning and conventional control to improve automatic guided vehicles tracking of complex trajectories. **Expert Systems**, Wiley Online Library, p. e13076, 2022.
- SILVA, E. L. d.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 3. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- SIVASHANKAR, N.; ULSOY, A. Yaw rate estimation for vehicle control applications. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, v. 120, p. 267–274, 1998.
- SOLÁ, J. M. **Indoor Localization of AGVs: A Ground Texture Based Solution**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Sistemas Autônomos, Escola de Engenharia Elétrica, Universidade de Aalto, Espoo, Novembro 2020.
- SOLOMAN, S. **Sensors and control systems in manufacturing**. 2. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Education, 2010.
- SØRAA, R. A.; FOSTERVOLD, M. E. Social domestication of service robots: The secret lives of automated guided vehicles (agvs) at a norwegian hospital. **International Journal of Human-Computer Studies**, Elsevier, v. 152, p. 102627, 2021.
- ST MICROELECTRONICS. **Automotive fully integrated H-bridge motor driver**. [S.l.], 2013. Rev. 9.
- STRICKLAND, J. R. Meet wiringpi. In: **Raspberry Pi for Arduino Users**. [S.l.]: Springer, 2018. p. 179–211.
- SUN, Y.-P.; LIANG, Y.-C. Vector field path-following control for a small unmanned ground vehicle with kalman filter estimation. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, SAGE Publications Sage UK: London, England, p. 0954405420977347, 2020.
- TALPUR, N.; SALLEH, M. N. M.; HUSSAIN, K. An investigation of membership functions on performance of anfis for solving classification problems. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2017. v. 226, n. 1, p. 012103.
- TEBALDI, L. *et al.* Economic evaluation of automated guided vehicles usage in a food company. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 180, p. 1034–1041, 2021.
- TEXAS INSTRUMENTS. **ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator**. [S.l.], 2018.
- THI, K. D. H. *et al.* Trajectory tracking control for four-wheeled omnidirectional mobile robot using backstepping technique aggregated with sliding mode control. In: IEEE. **2019 First International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP)**. [S.l.], 2019. p. 131–134.
- TRAMONTE, S. *et al.* Acceptability study of a3-k3 robotic architecture for a neurorobotics painting. **Frontiers in neurorobotics**, Frontiers, v. 12, p. 81, 2019.
- TZAFESTAS, S. G. **Introduction to mobile robot control**. [S.l.]: Elsevier, 2013.

ULLRICH, G. Automated guided vehicle systems: A primer with practical applications. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.

USHIKOSHI, T. d. A. *et al.* Fuzzy maneuvering controller applied to a dynamic model of a differential drive mobile robot. In: IEEE. **2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)**. [S.l.], 2018. p. 1–8.

UTKIN, V.; LEE, H. Chattering problem in sliding mode control systems. In: IEEE. **International Workshop on Variable Structure Systems, 2006. VSS'06**. [S.l.], 2006. p. 346–350.

UZAYR, S. bin. **Software Design Patterns: The Ultimate Guide**. Boca Raton: CRC Press, 2023.

VELAGIC, J.; LACEVIC, B.; PERUNICIC, B. A 3-level autonomous mobile robot navigation system designed by using reasoning/search approaches. **Robotics and Autonomous Systems**, Elsevier, v. 54, n. 12, p. 989–1004, 2006.

VILANOVA, R.; VISIOLI, A. **PID control in the third millennium**. Londres: Springer, 2012.

WANG, C. *et al.* Development of a vision navigation system with fuzzy control algorithm for automated guided vehicle. In: IEEE. **2015 IEEE International Conference on Information and Automation**. [S.l.], 2015. p. 2077–2082.

WANG, D. *et al.* A robust model predictive control strategy for trajectory tracking of omni-directional mobile robots. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, Springer, v. 98, n. 2, p. 439–453, 2020.

WANG, T. *et al.* Research on stability design of differential drive fork-type agv based on pid control. **Electronics**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 7, p. 1072, 2020.

WAZLAWICK, R. S. **Metodologia de pesquisa para ciência da computação**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

WECKX, S. *et al.* Open experimental agv platform for dynamic obstacle avoidance in narrow corridors. In: IEEE. **2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)**. [S.l.], 2020. p. 844–851.

WU, D.; MENDEL, J. M. Recommendations on designing practical interval type-2 fuzzy systems. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Elsevier, v. 85, p. 182–193, 2019.

WU, X. *et al.* Backstepping trajectory tracking based on fuzzy sliding mode control for differential mobile robots. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, Springer, v. 96, n. 1, p. 109–121, 2019.

WU, X.; YANG, Y. Path tracking controller design of automatic guided vehicle based on four-wheeled omnidirectional motion model. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 17, n. 2, p. 7996–8010, 2020.

- YAN, Q. F. *et al.* Path tracking of ins agv corrected by double magnetic nails based on fuzzy controller. In: IEEE. **2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)**. [S.l.], 2019. p. 1732–1735.
- YILDIZ, H. *et al.* Sliding mode control of a line following robot. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Springer, v. 42, n. 11, p. 1–13, 2020.
- YIN, P.; LI, W.; DUAN, Y. Combinatorial inertial guidance system for an automated guided vehicle. In: IEEE. **2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)**. [S.l.], 2018. p. 1–6.
- YIN, X.-H.; YANG, C.; XIONG, D. Bio-inspired neurodynamics-based cascade tracking control for automated guided vehicles. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 74, n. 1-4, p. 519–530, 2014.
- YU, R. *et al.* A novel trajectory tracking control of agv based on udwadia-kalaba approach. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, IEEE, 2016.
- ZANGINA, U. *et al.* Non-linear pid controller for trajectory tracking of a differential drive mobile robot. **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**, v. 43, n. 7, p. 255–270, 2020.
- ZARZYCKI, H. *et al.* Center of circles intersection, a new defuzzification method for fuzzy numbers. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences**, v. 68, n. 2, 2020.
- ZENG, W. *et al.* Learning from adaptive neural network output feedback control of a unicycle-type mobile robot. **ISA transactions**, Elsevier, v. 61, p. 337–347, 2016.
- ZHANG, H. *et al.* Research on guide line identification and lateral motion control of agv in complex environments. **Machines**, MDPI, v. 10, n. 2, p. 121, 2022.
- ZHANG, X.; HUO, L. A vision/inertia integrated positioning method using position and orientation matching. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2017, 2017.
- ZHANG, X. *et al.* Fault-tolerant dynamic control of a four-wheel redundantly-actuated mobile robot. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 157909–157921, 2019.
- ZHOU, X.; CHEN, T.; ZHANG, Y. Research on intelligent agv control system. In: IEEE. **2018 Chinese Automation Congress (CAC)**. [S.l.], 2019. p. 58–61.
- ZHOU, X.; ZHANG, Y.; CHEN, T. Agv controller based on improved particle swarm optimization. In: IEEE. **2018 Chinese Automation Congress (CAC)**. [S.l.], 2019. p. 207–210.

APÊNDICE A

Conceitos de Sistemas de Controle

Um sistema de controle em malha fechada básico é composto por um controlador, um conversor de potência, pela própria planta que está sendo controlada e por um sensor de realimentação, como mostrado na Figura 102. A partir de um sinal de referência $r(t)$ e da medição $m_y(t)$ da saída $y(t)$ do sistema pelo sensor é possível determinar um valor de erro $e(t)$, ou seja, uma medida do desvio do valor de operação da planta em relação ao valor desejado. Por essa característica, o sistema é chamado de malha fechada por realimentação negativa.

O controlador é um algoritmo, para sistemas de controle digitais, que calcula um valor de correção $u(t)$ a fim de que o erro $e(t)$ tenda a zero. Como, na maioria dos casos, o controlador não tem potência suficiente para alterar o valor do estímulo para a planta, um conversor de potência é usado para fazer com que o nível de controle possa ser adequado ao nível de estímulo que modifique o funcionamento da planta.

Na Figura 102 um ganho K_{cp} representa essa conversão e a entrada S representa a alimentação de potência do conversor, que pode estar em um nível de tensão superior ao do sistema de controle. O sinal $K_{cp}u(t)$ é, então, o sinal de controle aplicado à planta para controlar seu valor de saída.

Entretanto, esse não é o único estímulo que a planta recebe. Durante sua operação a planta pode ter outros sinais de entrada que são considerados distúrbios ou perturbações, representado pelo sinal d , que pode não estar em função do tempo. Assim, o controlador também deve ser capaz de atuar quando distúrbios imprevistos alteram o estímulo do sistema controlado.

Segundo Ellis (2002), sistemas convencionais de controle, como o exemplificado na Figura 102, dependem significativamente da qualidade do sensor. Para essas aplicações, os sensores devem ser responsivos de acordo com a necessidade da planta, ter alto grau de

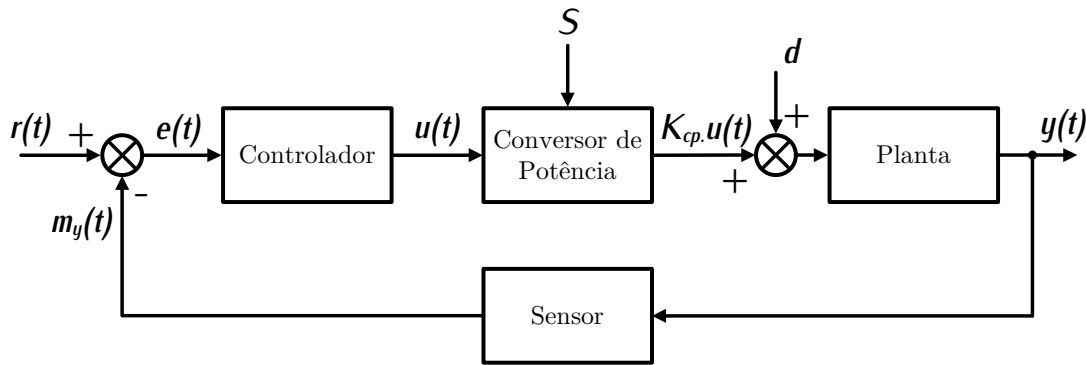


Figura 102 – Representação dos elementos básicos de uma malha de controle em malha fechada.

Fonte: Adaptado de Ellis (2002).

exatidão e baixo grau de ruído na medição. Enquanto para a planta e para o conversor de potência são toleradas irregularidades, como distorções e ruído, essas características afetam muito a qualidade do sensor (ELLIS, 2002).

As principais fontes de erro de um sensor, segundo Ellis (2002), são representadas na Figura 103. O sensor real é representado por um sensor ideal, ou seja, perfeito, que tem à sua medição somados sinais de ruído que degradam sua qualidade. O erro sistemático ocorre devido à imperfeições na fabricação do sensor, por exemplo. São erros que se repetem ao longo do tempo, podendo até mesmo serem modelados. A entrada de ruído no sensor representa sinais estocásticos e aleatórios que são induzidos no sinal medido, como ruído térmico e ruído eletromagnético. O bloco filtro intrínseco de um sensor introduz atraso no ramo de realimentação. Para todos os sensores existem valores de frequência para as quais o sensor não pode responder plenamente (ELLIS, 2002). Dessa forma, o sensor deve ser escolhido adequadamente para que atenda aos requisitos de restrições e de desempenho do controle da planta mesmo com suas incerteza de medição.

Soloman (2010) cita pontos importantes na avaliação da escolha de um sensor. Dentre eles o intervalo de medição necessário para cobrir as possíveis variações da planta, o ambiente de operação do sensor, considerando o quão sujo e ruidoso ele é e se há variação na iluminação que afete o sensor, características elétricas e mecânicas, como frequência de medição, blindagem a ruídos eletromagnéticos, intervalo de temperatura de operação, classe de proteção, por exemplo.

Assim como o sensor, o controlador deve ser adequado ao domínio de problema. Para a escolha da técnica ou algoritmo de controle, o hardware de processamento também deve ser considerado, analisando questões como as especificações do hardware dados os requisitos do sistema de controle, área de aplicação e regime de trabalho, entre outros pontos. Da perspectiva conceitual, o controlador deve ser adequado à variação de operação da planta. Por exemplo, controladores lineares podem ser aplicados a sistemas não-lineares, entretanto, trabalharão em um intervalo de operação estreito, que foi linearizado.

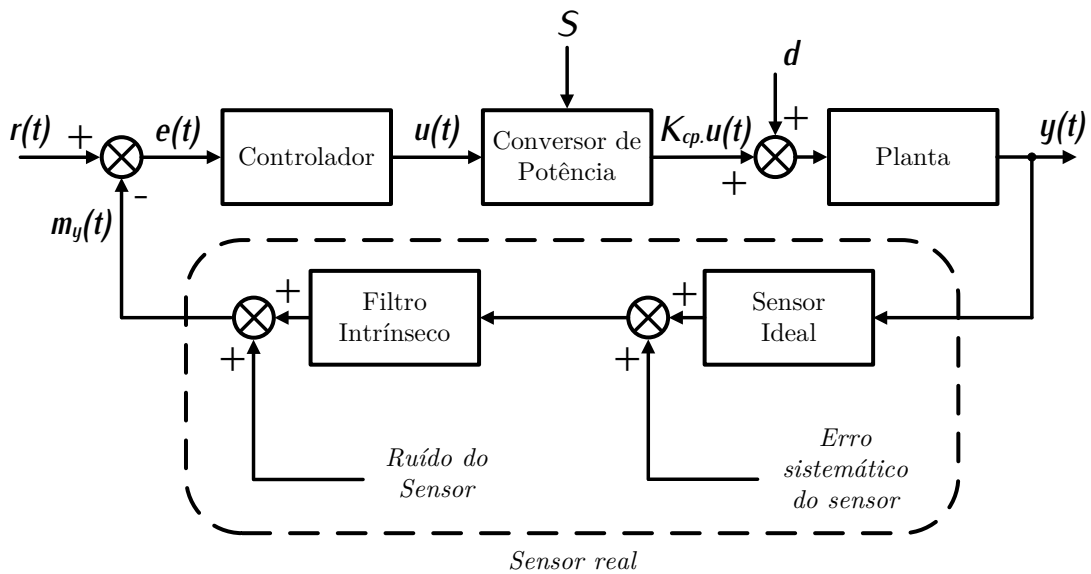


Figura 103 – Representação de um sensor real como a combinação de um sensor ideal e suas fontes de erro, como o erro sistemático de medição, ruídos do sensor, como ruído térmico, e um filtro intrínseco ao sensor relacionado à faixa de frequência de operação do sensor.

Fonte: Adaptado de Ellis (2002).

Portanto, o controlador deve ser integrado aos sensores disponíveis, considerando suas incertezas e características de medição, atendendo aos requisitos do sistema de controle da planta, como máximo erro em regime, tempo de acomodação após uma perturbação, máximo sobressinal permitido, entre outros.

Especificamente no domínio de problema de que trata este trabalho, controladores puramente cinemáticos e linearizados ainda são bastante utilizados para o controle de posição de AGVs (REIS; COUTO; MORANDIN JUNIOR, 2022a). Entretanto, AGVs são sistemas dinâmicos não-lineares e tais controladores, usualmente, não medem variações dinâmicas da planta pois não são aplicados sensores para tal. Em alguns casos, há justificativa. Por exemplo, Chen *et al.* (2019) discute sobre a importância de se considerar a dinâmica no projeto do controlador, entretanto, o atuador do AGV utilizado no trabalho tem sinais de entrada e saída restritos não permitindo um controle dinâmico do veículo.

Além disso, os resultados em Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) mostram que o problema de controle de posição de AGVs é, essencialmente, um problema multivariável. Em geral, o número de sensores não necessita ser o igual ao número de variáveis controladas, embora quanto mais sensores aplicados, melhor, segundo Albertos e Antonio (2006). Dessa forma, o projeto do sistema de controle também deve considerar o uso de controladores *single-input single-output* (SISO) ou *multiple-input multiple-output* (MIMO), e MISO. No caso do AGV seguidor de linha as duas principais variáveis medidas e controladas são a distância em relação à guia e o ângulo de orientação do veículo.

A.1 Sistemas de Controle Fuzzy

Sistemas de controle fuzzy baseiam-se nos princípios da Lógica Fuzzy introduzidos por Lotfi Zadeh e seu trabalho discutindo a teoria dos conjuntos difusos ou *fuzzy*, em 1965 (QI; TAO; JIANG, 2019; CAMPOS; SAITO, 2004). Conjuntos fuzzy são uma generalização da teoria dos conjuntos convencional em que os elementos tem apenas dois estados de pertinência em relação ao conjunto em relação ao seu pertencimento, por exemplo, 0 ou 1 , *falso* ou *verdadeiro*. Em conjuntos fuzzy, esse valor pode variar entre 0 e 1 . Segundo Campos e Saito (2004), conforme a complexidade de um sistema aumenta, a capacidade de se tomar decisões ao mesmo tempo precisas e significativas tendem a diminuir até um ponto no qual precisão e relevância são quase termos excludentes entre si.

Assim, o objetivo dos conjuntos fuzzy é possibilitar uma descrição de conhecimentos complexos, incertos, contraditórios e incompletos com formalismo matemático e lógica (HOODA; RAICH, 2016; CAMPOS; SAITO, 2004). Aplicada ao controle de sistemas, a Lógica Fuzzy possibilita modelar o controlador de acordo com a forma que um ser humano controlaria esse sistema, descrevendo os estímulos e ações resultantes em uma linguagem mais simples do que a descrição matemática do sistema a ser controlado.

A descrição de conjuntos fuzzy pode ser dividida em conjuntos intervalares tipo 1, conjuntos do tipo 2, conjuntos \mathbb{L} -fuzzy e conjuntos fuzzy de nível 2 (HOODA; RAICH, 2016). A discussão das diferenças entre cada uma das descrições não é foco desse trabalho, apenas conjuntos intervalares do tipo 1 serão abordadas. Esse tipo de conjunto pode ser definido como mostrado na Equação 19, sendo A um subconjunto do universo X onde a pertinência de um elemento de X que pertence a A pode variar entre 0 e 1 .

$$A : X \mapsto [0, 1] \quad (19)$$

Assim, uma função de pertinência μ_A associa a cada elemento de X um valor $\mu_A(x)$ compreendido entre 0 e 1 relativo ao grau de pertencimento de x ao subconjunto A , representada na Equação 20.

$$\mu_A : X \mapsto [0, 1] \quad (20)$$

Jang Chuen-Tsai Sun (1997) descrevem as funções de pertinência parametrizadas triangular, trapezoidal, gaussiana, função sino generalizada e função sigmoide, sendo as quatro primeiras mais utilizadas (TALPUR; SALLEH; HUSSAIN, 2017; CAMPOS; SAITO, 2004). As funções de pertinência são usadas, independentemente de seu formato, para caracterizar o comportamento de um conjunto fuzzy e um conjunto de funções de pertinência descrevem a representação de uma variável linguística. Uma variável linguística é definida a partir de uma tripla (V, X, T_V) , onde V é uma variável definida sobre um conjunto universo X e T_V é o conjunto que contém os subconjuntos fuzzy normalizados usados para descrever a variável V .

Por exemplo, dado um universo de discurso X definido pelo intervalo $[0, 100]$, pode-se definir uma variável linguística V que representa a velocidade de um veículo e a ela atribuir

valores linguísticos do conjunto $T_V = \{baixa, media, alta\}$. As funções de pertinência de cada valor linguístico descreverão, então, os subconjuntos de X que são considerados como velocidades baixas, médias e altas. Esse conjunto de funções de pertinência formará a base de conhecimento do sistema fuzzy.

Um sistema de controle fuzzy MISO é mostrado na Figura 104. Os blocos de conversão de escala e normalização são responsáveis por colocar as variáveis no intervalo normalizado apropriado, por exemplo, $[-1, 1]$ ou $[0, 1]$. A partir dos valores de entrada, o bloco de fuzzificação calcula o grau de pertinência de cada variável de acordo com a base de conhecimento do sistema. Esses valores são usados para inferir o estado da planta e determinar a ação de controle a ser tomada usando uma base de regras. A ação de controle definida é, então, traduzida no bloco de defuzzificação e desnormalização para valores adequados ao comando da planta. Esse bloco usa uma base de conhecimento para a saída de forma a converter a variável linguística determinada pelo bloco de inferência em um valor numérico (defuzzificação). A desnormalização se dá por uma função adequada que converte o intervalo normalizado usado no sistema de inferência fuzzy para um sinal de comando para o conversor de potência.

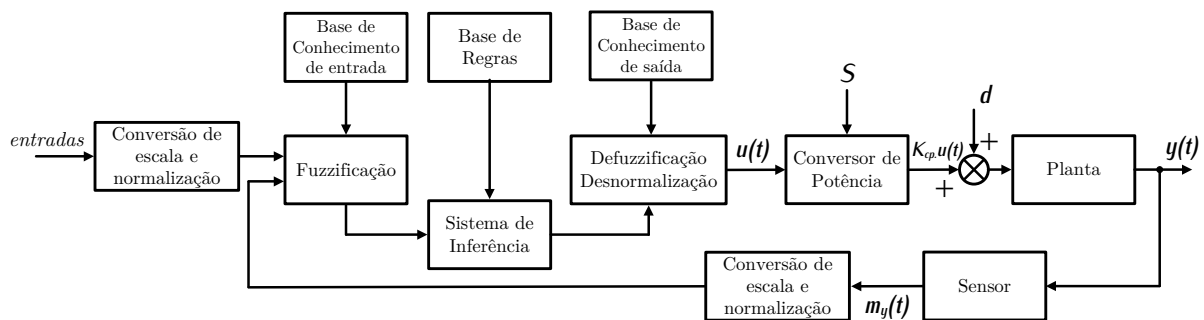


Figura 104 – Representação de um sistema de controle fuzzy simples considerando múltiplas entradas e apenas uma saída.

Fonte: Adaptado de Ross (2004).

Segundo Ross (2004), as etapas para o projeto de um controlador fuzzy podem ser divididas em:

1. Identificar as variáveis de interesse da planta a ser controlada: entradas, saídas e estados.
2. Particionar o universo de discurso em intervalos que representam os subconjuntos determinados pelas variáveis linguísticas, utilizando todos os elementos do universo, para as variáveis de entrada e de saída.
3. Atribuir uma função de pertinência para cada variável definida na etapa anterior. Essa etapa é a criação da base de conhecimento.
4. Determinar as relações entre as entradas ou estados da planta e as saídas na forma de regras *Se-Então*. Essa etapa é a criação da base de regras.

5. Definir fatores de escala adequados para os sinais de entrada e saída.

Pontos sensíveis das etapas de projeto são a escolha da quantidade de funções de pertinência e seu tipo, a divisão no intervalo de discurso das variáveis linguísticas, a determinação da base de regras e o método usado para a defuzzificação, como levantado em Wu e Mendel (2019) para sistemas fuzzy tipo 1 e tipo 2.

Quanto à base de regras, há, basicamente, dois tipos: regras Mamdani e Takagi-Sugeno. O primeiro tipo também é conhecido como regras linguísticas, por ter como saída um variável linguística fuzzy. Regras do tipo Takagi-Sugeno também são chamadas de regras funcionais por ter como saída funções, lineares e não lineares, já descritas por coeficientes não-fuzzy, ou escalar (*crisp*) (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2014; WU; MENDEL, 2019). A Equação 21 exemplifica um regra r_i do tipo Mamdani e a Equação 22 exemplifica uma regra r_i do tipo Takagi-Sugeno, baseadas em (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2014). Considere x_1, x_2, \dots, x_N as entradas, y a saída, $\alpha_i, \beta_i, \phi_i$ e σ_i conjuntos fuzzy e $c_{i,0}, c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,N}$ coeficientes numéricos do tipo escalar.

$$r_i : \text{Se } x_1 = \alpha_i \text{ E } x_2 = \beta_i \text{ E } \dots \text{ E } x_N = \phi_i \text{ Então } y = \sigma_i \quad (21)$$

$$r_i : \text{Se } x_1 = \alpha_i \text{ E } x_2 = \beta_i \text{ E } \dots \text{ E } x_N = \phi_i \text{ Então } y_i = c_{i,0} + c_{i,1}x_1 + c_{i,2}x_2 + \dots + c_{i,N}x_N \quad (22)$$

O sistema de controle proposto nesse trabalho será do tipo Mamdani. O método mais comum para composição da regras ativas no Sistema de Inferência é o método *min-max*. A conjunção é usada nos antecedentes das regras ativas e é realizada pelo valor mínimo entre os conjuntos fuzzy relacionados, enquanto a agregação para determinação do consequente é feita considerando-se o valor máximo a partir dos valores definidos em cada conjunção (CARIDÁ, 2016).

A saída do sistema de inferência, nesse caso, ainda é uma variável fuzzy. Esse valor deve ser defuzzificado e transformado em um valor de comando escalar que será entrada do conversor de potência para se tornar um estímulo à planta. O método mais comumente usado para esse fim é o método do centroide, ou centro de gravidade (DOMBI; TÓTH-LAUFER, 2020; WU; MENDEL, 2019). O método pode ser definido pela Equação 23 (DOMBI; TÓTH-LAUFER, 2020):

$$y_c = \frac{\int_{y \in \mu(y)} \mu(y)y dy}{\int_{y \in \mu(y)} \mu(y) dy} \quad (23)$$

sendo y_c é a saída escalar, y é a saída do sistema de inferência e $\mu(y)$ é o agregado do conjunto de consequentes. A Equação 23 calcula o centro da área formada pela operação de agregação das funções de pertinência dos consequentes dadas as regras ativas.

De acordo com (LEWIS, 1997), apesar de ter um papel essencial no controle fuzzy, a etapa de defuzzificação ainda é guiada mais pela intuição e experiência do que por um procedimento rigoroso. A escolha do método de defuzzificação pode degradar o desempenho do controlador (SAADE; DIAB, 2004; AMAYA *et al.*, 2009).

Novos métodos ainda têm sido propostos. Por exemplo, Dobrosielski *et al.* (2017), Zarzycki *et al.* (2020), Saade e Diab (2004), Chandramohan, Rao e Arumugam (2006) e Mahdiani, Banaiyan e Fakhraie (2006) propõem novas técnicas de defuzzificação, sendo que os últimos quatro comparam com métodos já existentes. Entretanto, não há indicação do melhor método, tendo as propostas resultados similares aos métodos mais comuns, como o método do centroide.

A.2 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

Os resultados da revisão sistemática em Reis, Couto e Morandin Junior (2022a) mostram que o controle PID continua relevante para o domínio de problema tanto como o controlador implementado no sistema de controle quanto o uso da técnica para a comparação de desempenho de outro tipo de controlador proposto. Dadas as características do AGV e do controlador proposto nesse trabalho, o controle PID escalonado sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols será usado para comparação dos resultados experimentais para as variáveis de saída de ângulo de orientação e distância da guia.

Antes de tratar do controlador PID, é válido justificar o não uso do PID multivariável. Como descrito por Albertos e Antonio (2006), duas formas de utilizar o PID em sistemas MIMO são o controle descentralizado e o controle em cascata. No controle descentralizado, o sistema MIMO é decomposto em sistemas SISO e controladores PID independentes são projetados para cada sistema. Assim, a primeira etapa do projeto do controlador é parear as variáveis de entrada e saída de forma a minimizar o risco de baixo desempenho do controlador devido à interferência mútua entre os subsistemas (ALBERTOS; ANTONIO, 2006). Uma operação de desacoplamento é possível para cancelar essa interferência.

Já o controle em cascata, como o nome sugere, coloca controladores mais simples em série. Para isso, o sistema deve oferecer sensores e atuadores intermediários (ALBERTOS; ANTONIO, 2006), de forma que os laços de controle externos sejam referência para laços de controle internos. Assim, o sistema MIMO é, de certa forma, decomposto em sistemas em série dado que o sistema MIMO pode ser descrito por subsistemas cujas variáveis são entradas para os sistemas subsequentes.

Apesar de conter dois atuadores independentes, o AGV não pode ser descrito como sistemas SISO dos casos anteriores por estar fortemente acoplado, tanto nas variáveis de entrada (tensão nos motores), quanto nas variáveis de saída (ângulo de orientação e distância da guia). Além disso, como o foco do trabalho não é um controlador PID multivariável, um PID escalonado SISO será empregado para cada variável de saída e

ensaiado de forma distinta.

O controle PID clássico é composto por três ganhos, proporcional (P), integral (I) e derivativo (D), que atuam distintamente sob o valor do erro. A componente proporcional calcula uma resposta proporcional ao erro, a componente integral integra o erro ao longo do tempo e a componente derivativa atua, principalmente, quando há variações bruscas do erro. Segundo (ELLIS, 2012), o PID é um controlador de duas zonas, pois os ganhos P e D formam uma zona de alta frequência enquanto o ganho I forma uma zona de baixa frequência. A Equação 24 mostra a equação ideal do controlador PID, sendo K_p o ganho proporcional, K_i o integral, K_d o derivativo, T_i é a constante de tempo de integração e T_d é a constante de tempo da derivação (VILANOVA; VISIOLI, 2012).

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \cdot \dot{e}(t) \right), \quad \text{onde} \quad K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad \text{e} \quad K_d = K_p T_d \quad (24)$$

Como o controlador PID será embarcado em um processador, será um controlador digital e deve ser descrito de forma discreta, como mostra a Equação 25:

$$u(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T}{T_i} \sum e(n) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\} \quad (25)$$

onde n é o índice da amostra atual e T é o período de amostragem. Os ganhos K_i e K_d podem ser calculados pela Equação 26.

$$K_i = K_p \frac{T}{T_i} \quad \text{e} \quad K_d = K_p \frac{T_d}{T} \quad (26)$$

E o controlador pode, ainda, ser descrito como uma equação a diferenças para minimizar o uso de computação (PATKI; SONAWANE; INGOLE, 2012). A Equação 27 mostra o algoritmo recursivo do controlador PID discreto:

$$u(n) = u(n-1) + a_0 e(n) + a_1 e(n-1) + a_2 e(n-2) \quad (27)$$

onde $a_0 = K_p + K_i + K_d$, $a_1 = -(K_p + 2K_d)$ e $a_2 = K_d$.

O projeto de um controlador PID tem métodos analíticos de projeto, como o método do lugar das raízes e o método de resposta em frequência (OGATA, 2010). Para ambos os casos, é preciso ter um modelo da planta muito bem descrito ou, no caso do segundo método, a possibilidade de se levantar o Diagrama de Bode da planta de forma experimental, o que nem sempre é viável. Outros métodos são métodos de sintonia empírica, baseados em experimentação e na otimização de certos critérios de desempenho da planta. Vilanova e Visioli (2012) cita centenas de trabalhos que apresentam regras de sintonia de controladores PID dividindo-as de acordo com o modelo do controlador, a técnica experimental usada e os critérios de desempenho minimizados.

Um dos métodos mais populares para sintonia empírica do controlador PID é o método de Ziegler-Nichols (ELLIS, 2012). O método é dividido em dois métodos, o método da resposta ao degrau e o método de malha fechada ou de sensibilidade crítica. O primeiro

método é usado em malha aberta e indicado para sistemas de primeira ordem cuja resposta ao degrau é uma curva em formato de S e com resposta assintótica em regime permanente (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2004).

O segundo método é baseado em um valor crítico K_{cr} do ganho proporcional com $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Esse ganho crítico leva o sistema em malha fechada à oscilação crítica, quando a saída passa a oscilar de forma periódica, gerando um período crítico P_{cr} . Esses dois parâmetros definem um ponto específico na curva de Nyquist. O objetivo da sintonia é obter no máximo 25% de máximo sobressinal na resposta ao degrau (OGATA, 2010).

O método fornece uma boa resposta considerando o ajuste manual, uma vez que o ajuste fino dos ganhos é possível baseado na experiência do operador e seu conhecimento da planta a ser controlada (HANG; ÅSTRÖM; HO, 1991). Como desvantagem, o método leva o sistema à instabilidade marginal, podendo ser perigoso dependendo do sistema que está sendo sintonizado. Além disso, segundo Åström e Hägglund (2001), o método usa poucas informações do processo e pode apresentar resultados insatisfatórios em muitos casos, de forma que, em uma comparação com outro controlador, o controlador PID tenha pior desempenho, embora tivesse um bom desempenho se bem ajustado.

A.3 Pseudo-código do controlador PID Implementado

Algoritmo 1 Pseudo-código do serviço de controle PID.**inclua:** bibliotecas necessárias**variáveis:**

erroAtual // flutuante, erro atual, diferença entre a referência e o valor atual (distância ou ângulo)
 erroPassado // flutuante, erro no instante anterior
 erroPassadoAnterior // flutuante, erro medido há dois instantes anteriores
 valoresAnteriores[] // flutuante, vetor com valores de erro e ação de controle de iterações passadas
 K_p , T_i , T_d // flutuante, ganho proporcional, e constantes de tempo de integração e derivação
 a_0 , a_1 , a_2 // flutuante, constantes do controlador PID Discreto
 T // flutuante, período de amostragem
 açãoControle // flutuante, representa, a ação de controle para correção do movimento
 açãoControleAnterior // flutuante, valor da ação de controle no instante anterior

```

1: construtor ControlePID() // Construtor padrão
2:   ConfiguraValoresAnteriores(0, 0, 0)
3: fim construtor
4: destrutor ControlePID() // Destrutor padrão
5: fim destrutor
6: método CalculaAçãoControle(erroAtual,  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ,  $T$ )
   // Cálculo das constantes do controlador PID Discreto
7:    $K_i \leftarrow K_p \frac{T}{T_i}$ 
8:    $K_d \leftarrow K_p \frac{T_d}{T}$ 
9:    $a_0 \leftarrow K_p + K_i + K_d$ 
10:   $a_1 \leftarrow -(K_p + 2K_d)$ 
11:   $a_2 \leftarrow K_d$ 
   // Atualiza valores com resultados da iteração anterior
12:  valoresAnteriores[]  $\leftarrow$  RetornaValoresAnteriores()
13:  erroPassado  $\leftarrow$  valoresAnteriores[1]
14:  erroPassadoAnterior  $\leftarrow$  valoresAnteriores[2]
15:  açãoControleAnterior  $\leftarrow$  valoresAnteriores[3]
   // Calcula a ação de controle atual
16:  açãoControle  $\leftarrow$  açãoControleAnterior +  $a_0 \times$  erroAtual +  $a_1 \times$  erroPassado +  $a_2 \times$  erroPassadoAnterior
   // Salva valores atuais para a próxima iteração
17:  ConfiguraValoresAnteriores(erroAtual, erroPassado, açãoControle)
   // Limita a ação de controle ao intervalo -100 a +100
18:  se açãoControle > 100 então
19:    açãoControle  $\leftarrow$  +100
20:  senão se açãoControle < -100 então
21:    açãoControle  $\leftarrow$  -100
22:  fim se
23:  retorna açãoControle
24: fim método
25: método ConfiguraValoresAnteriores(erroAtual, erroPassado, açãoControle)
26:  vetorValoresAnteriores[1]  $\leftarrow$  erroAtual // erroPassado
27:  vetorValoresAnteriores[2]  $\leftarrow$  erroPassado // erroPassadoAnterior
28:  vetorValoresAnteriores[3]  $\leftarrow$  açãoControle // açãoControleAnterior
29: fim método
30: método RetornaValoresAnteriores()
31:  retorna vetorValoresAnteriores
32: fim método

```

APÊNDICE B

Estrutura, Serviços e Softwares Majoritários Implementados

B.1 Eletrônica Embarcada

A Figura 105 mostra o esquema de ligação entre os módulos de expansão da GPIO e os conversores de nível lógico utilizados. As expansões dividem-se no lado de tensão 3,3 V e no lado de tensão 5 V. A entrada do primeiro módulo vem do cabo flat conectado na Raspberry Pi. A partir dos conectores de pressão, os pinos utilizados pelos circuitos que trabalham com 5 V são conectados aos conversores. O conversor de nível lógico TXS0108E é utilizado para saídas digitais da Raspberry Pi, responsáveis por controlar os estados do driver do motor DC e a seleção do dispositivo para comunicação SPI. Até o momento, nenhuma entrada digital é necessária no projeto. Os pinos de comunicação I2C e SPI são conectados aos conversores de nível lógico próprios para comunicação I2C (chamados CI2C1, CI2C2 e CI2C3), sendo que um dos 6 pinos está vago (NC - não conectado). Por indicação do datasheet, resistores de *pull up* são utilizados nos pinos da comunicação I2C, para ambos os níveis de tensão.

Os pinos de PWM da GPIO são conectados diretamente ao driver do motor DC, após verificar que o circuito de ponte completa utilizado, VNH2SP30, suporta o nível lógico 3,3 V para o acionamento. Importante notar que ambos os conversores lógicos utilizados não suportam PWM.

Na Figura 106 é mostrado o esquemático de ligação dos sensores e atuadores do AGV. Os pinos da GPIO utilizados estão indicados. Na parte superior é representado um barramento de comunicação I2C em que três dispositivos estão conectados, um conversor analógico/digital de 16 bits ADS1115 e duas centrais inerciais MPU6050. O endereço

de cada dispositivo está representado junto ao seu nome. O conversor A/D converte os sinais analógicos da leitura de corrente, realizada pelos sensores de efeito Hall ACS712, chamados SC1 e SC2. Esses sensores estão em série com os motores do AGV e a saída de potência do driver do motor. Conectados mecanicamente ao eixo posterior de cada motor estão dois encoders rotativos. A leitura dos pulsos é realizada por um contador rápido de encoder de quadratura utilizando dois circuitos integrados LS7366R, com comunicação SPI.

O driver de potência do motor DC, SparkFun Monster Moto Driver, é alimentado com uma tensão de 12 V para os motores e 5 V para o controle e tem suas saídas de potência $A1 - B1$ e $A2 - B2$ conectadas aos motores A e B , respectivamente. As entradas de controle de sentido de giro do motor, $INA1$, $INB1$, $INA2$ e $INB2$, e as entradas de habilitação das saídas de potência, $EN1$ e $EN2$, são conectadas ao módulo de expansão da GPIO de nível 5 V. As entradas de controle de velocidade de giro do motor, $PWM1$ e $PWM2$, estão conectadas ao módulo de expansão da GPIO de nível 3,3 V e correspondem, respectivamente, aos canais de PWM implementados por hardware na Raspberry PI, PWM0 e PWM1.

B.2 Software Majoritário de Odometria dos Encoders

O software majoritário utiliza o Serviço de Comunicação SPI para a leitura dos contadores rápidos de encoder de quadratura. A partir da leitura das contagens em um período fixo e conhecido são calculadas as velocidades relacionadas e o deslocamento do AGV baseado nos dados dos encoders.

Os contadores rápidos são configurados para contar quatro pulsos a cada ciclo da quadratura, de forma que a Equação 6 possa ser aplicada. Para que o registrador não estoure, ou seja, atinja seu limite, a cada leitura, ele é limpo e zerado. Dessa forma, também é simplificada a aplicação da equação, uma vez que o valor passado não é necessário, sendo a própria leitura o valor diferencial da contagem de pulsos no intervalo de tempo definido. A velocidade $\dot{\varphi}$ da Equação 6 é a velocidade no eixo do motor e, por consequência, a velocidade de giro das rodas. Seguindo o modelo cinemático do AGV, a velocidade linear tangencial v_i de cada roda é, sendo $i = \{d, e\}$ representando a roda direita e esquerda, dada pela Equação 28, que depende do raio r das rodas.

$$v_i = r\dot{\varphi}_i \quad (28)$$

Com o valor da contribuição de cada roda, é possível calcular as velocidades linear e angular do AGV, respectivamente v e ω . A velocidade linear descrita na Equação 29 é uma simples média da contribuição de cada roda para o movimento linear no sentido da orientação do AGV, ou seja, quando o AGV se desloca para frente. Entretanto, esse movimento não segue sempre a mesma direção, assim, a velocidade angular do AGV é

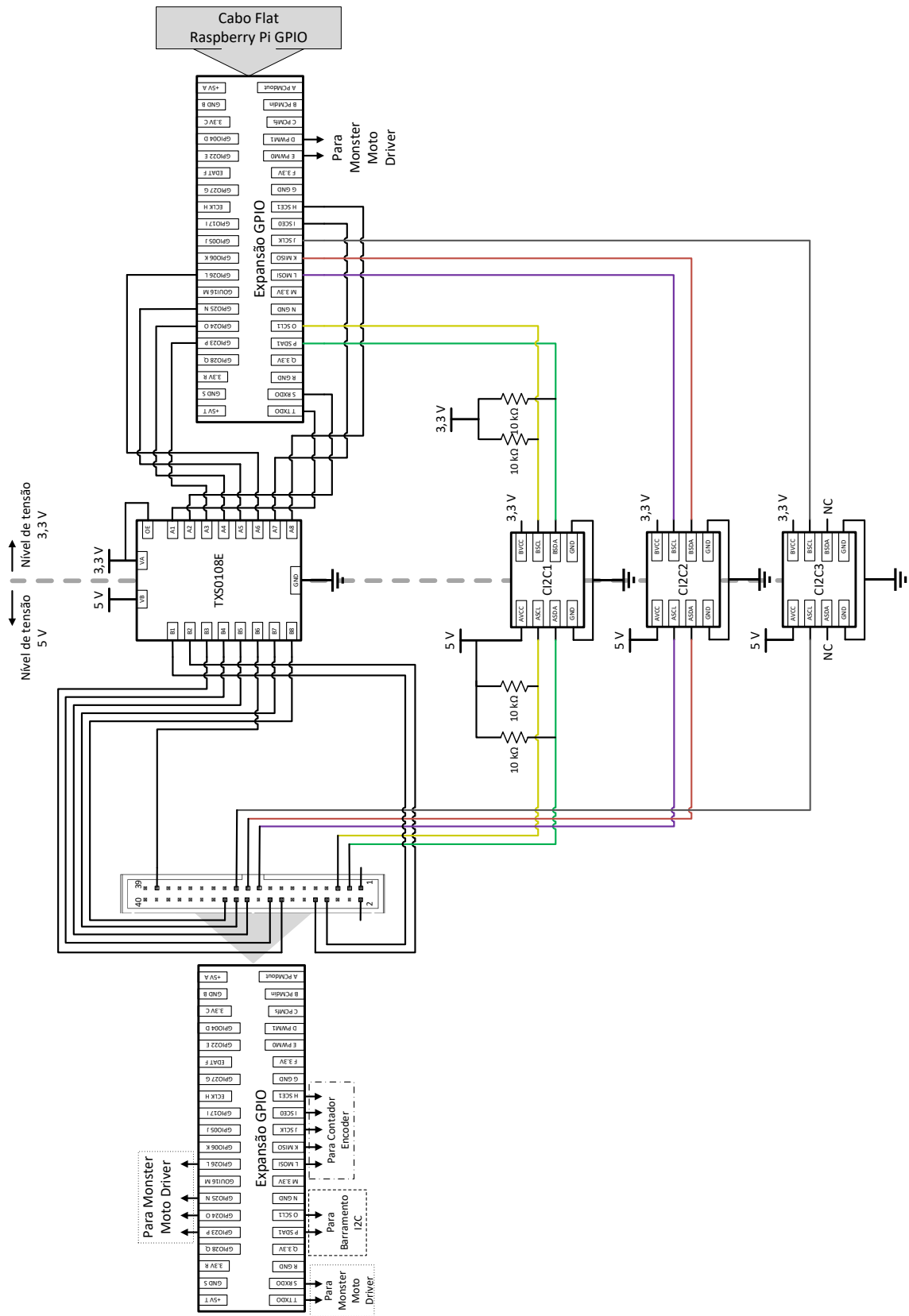


Figura 105 – Esquemático das conexões entre os módulos de expansão da GPIO e os conversores de nível lógico.

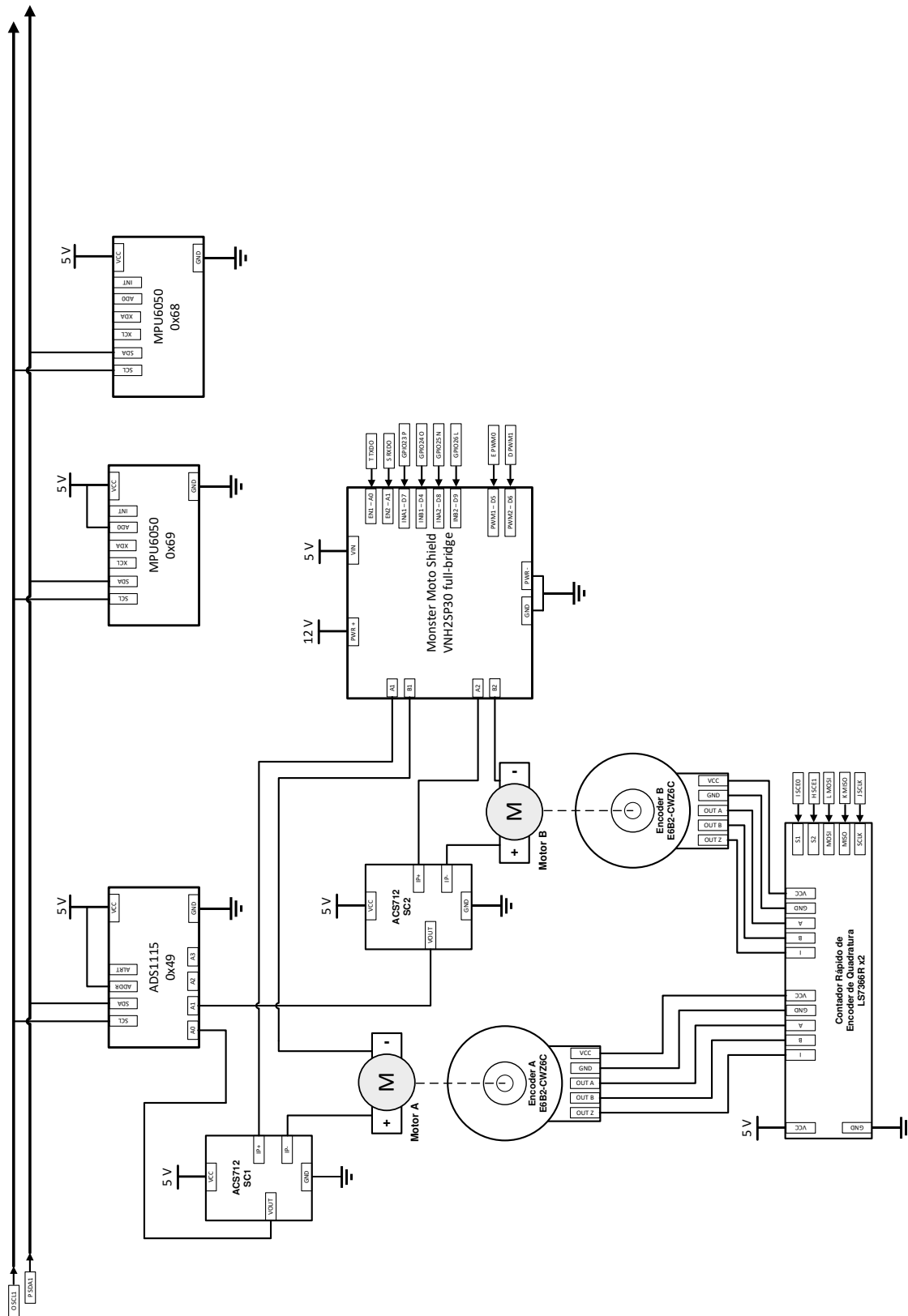


Figura 106 – Esquemático das conexões entre os módulos de expansão da GPIO e os dispositivos do AGV.

descrita na Equação 30, que identifica a contribuição de cada roda para o giro do AGV em relação ao seu centro geométrico.

$$v = \frac{r}{2}(\dot{\varphi}_d + \dot{\varphi}_e) \quad (29)$$

$$\omega = \frac{r}{2\ell}(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_e) \quad (30)$$

Com isso, seguindo o desenvolvimento de Dudek e Jenkin (2010) e Malu e Majumdar (2014), é possível estimar a postura (*pose*) do AGV. A Equação 31 mostra uma integração numérica simples tomando como valores no instante anterior $[x_k, y_k, \theta_k]$, valores no instante atual $[x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1}]$, velocidade linear v_k e velocidade angular ω_k medidas no instante k e T o intervalo de tempo entre o instante atual $k + 1$ e o instante anterior k .

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + v_k T \cos \theta_k \\ y_{k+1} &= y_k + v_k T \sin \theta_k \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + \omega_k T \\ T &= t_{k+1} - t_k \end{aligned} \quad (31)$$

Observe que o deslocamento linear é dado por $\Delta S = v_k T$ e o deslocamento angular é dado por $\Delta\theta = \omega_k T$. Sabendo-se a posição inicial do AGV, tanto em relação ao veículo quanto à referência global, é possível estimar sua posição conforme o mesmo se desloca. Essa estimativa, entretanto, não considera o caso de deslizamento lateral ou derrapagem das rodas e há uma incerteza de medição relacionada. Uma das formas de minimizar esse erro é usando a fusão de sensores.

Todos os cálculos anteriores partem da medição dos pulsos do encoder em um determinado intervalo de tempo. Dessa forma, o Software Majoritário de Odometria dos Encoders é responsável por, através do Serviço de Comunicação SPI, ler a contagem de pulsos dos encoders dos dois motores DC e, a partir delas, estimar as velocidades do veículo e sua posição, a partir de uma posição inicial. Os valores medidos e calculados serão armazenados no Serviço de Armazenamento de Medições, em uma estrutura específica de odometria.

B.2.0.1 Ajuste Fino da Odometria

Diversos fatores afetam a exatidão da odometria a partir dos dados dos encoders, como o uso do valor aproximado do raio das rodas e da distância entre elas, o escorregamento das rodas, ruído de medição, problemas na integração numérica, entre outros (IVANJKO; KOMSIC; PETROVIC, 2007). Para compensar erros sistemáticos, erros gerados na cinemática do AGV, Ivanjko, Petrovic e Peric (2003) e Ivanjko, Komsic e Petrovic (2007) propuseram um método offline de ajuste. Baseando-se nesse método, foram inseridos três parâmetros de ajuste nas equações de odometria: k_1 e k_2 para compensar o erro no valor

do raio medido da roda de tração e k_3 para compensar o erro no valor da distância entre as rodas. Com isso, as Equações 29 e 30 atualizadas são mostradas nas Equações 32 e 33, respectivamente.

$$v = \frac{r}{2}(k_1\dot{\varphi}_d + k_2\dot{\varphi}_e) \quad (32)$$

$$\omega = \frac{r}{2\ell k_3}(k_1\dot{\varphi}_d - k_2\dot{\varphi}_e) \quad (33)$$

O ajuste dos parâmetros foi realizado de forma empírica, com ensaios de movimento em linha reta e movimentos circulares do AGV. Não foi realizado um ajuste ótimo dos parâmetros.

B.2.0.2 Pseudo-código

O pseudo-código descrito no Algoritmo 2 traduz os métodos necessários para os cálculos da odometria do AGV nos diagramas UML anteriormente descritos em uma linguagem mais próxima do código, como uma etapa anterior da codificação.

B.3 Serviço de Correção do Movimento

Algoritmo 2 Pseudo-código do Software Majoritário de Odometria dos Encoders, parte 1.

inclua: biblioteca do Serviço de Comunicação SPI

inclua: biblioteca do Serviço de Armazenamento de Medições

inclua: outras bibliotecas necessárias

defina:

$N \leftarrow \frac{1}{17}$ // relação de redução dos motores

$PPR \leftarrow 1800$ // número de pulsos por rotação do encoder no modo de operação configurado

$R \leftarrow 0.075$ // raio das rodas de tração do AGV, em metros

k_1, k_2, k_3 // parâmetros de ajuste da odometria

variáveis:

posiçãoInicialX, posiçãoInicialY, posiçãoInicial θ // flutuante, posição inicial (x, y, θ) do AGV

t_{k+1_d}, t_{k+1_e} // flutuante, valor do tempo no momento da leitura da contagem dos encoder direito e esquerdo

t_{k_d}, t_{k_e} // flutuante, valor de tempo na última iteração de leitura da contagem

Pulsos $_d$, Pulsos $_e$ // inteiro, valor da contagem atual dos encoder direito e esquerdo

$\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_e$ // flutuante, valor da velocidade de rotação atual dos motores direito e esquerdo

v_d, v_e // flutuante, valor da velocidade tangencial das rodas direita e esquerda

v_k // flutuante, valor da velocidade linear do AGV

ω_k // flutuante, valor da velocidade angular do AGV

$x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1}$ // flutuante, posição do AGV no instante de tempo atual

x_k, y_k, θ_k // flutuante, posição do AGV no instante de tempo passado

1: **construtor** *OdometriaEncoders*(posiçãoInicialX, posiçãoInicialY, posiçãoInicial θ)

2: *ConfiguraçãoPosturaInicial*(posiçãoInicialX, posiçãoInicialY, posiçãoInicial θ)

3: *ConfiguraçãoEncoderBuffer*()

4: **fim construtor**

5: **destrutor** *OdometriaEncoders*()

6: **fim destrutor**

7: **método** *ConfiguraçãoEncoderBuffer*()

8: // Configuração do modo de operação do encoder buffer 1

9: Habilita comunicação SPI com o encoder buffer 1

10: Escreve no registrador de instrução a ação de escrita no registrador de modo de operação

11: Escreve no registrador de modo de operação a configuração

12: Desabilita comunicação SPI com o encoder buffer 1

13: // Configuração do modo de operação do encoder buffer 2

14: Habilita comunicação SPI com o encoder buffer 2

15: Escreve no registrador de instrução a ação de escrita no registrador de modo de operação

16: Escreve no registrador de modo de operação a configuração

17: Desabilita comunicação SPI com o encoder buffer 2

18: // Limpa registrador de contagem do encoder buffer 1

19: Habilita comunicação SPI com o encoder buffer 1

20: Escreve no registrador de instrução a ação de limpeza do registrador de contagem

21: Desabilita comunicação SPI com o encoder buffer 1

22: // Limpa registrador de contagem do encoder buffer 2

23: Habilita comunicação SPI com o encoder buffer 2

24: Escreve no registrador de instrução a ação de limpeza do registrador de contagem

25: Desabilita comunicação SPI com o encoder buffer 2

26: **fim método**

Algoritmo 2 Pseudo-código do Software Majoritário de Odometria dos Encoders, parte 2.

27: **método** *ConfiguraçãoPosturaInicial*(posiçãoInicialX, posiçãoInicialY, posiçãoInicial θ)
 28: Armazena valores iniciais (posiçãoInicialX, posiçãoInicialY, posiçãoInicial θ) na estrutura de odometria do serviço de Armazenamento de medições
 29: Limpa demais valores na estrutura de odometria do serviço de Armazenamento de medições
 30: **fim método**
 31: **método** *AtualizarOdometria*()
 32: $\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_e \leftarrow \text{CalcularVelocidadeMotores}()$
 33: $v_d, v_e \leftarrow \text{CalcularVelocidadeTangencial}(\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_e)$
 34: $v_k \leftarrow \text{CalcularVelocidadeLinear}(\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_e)$
 35: $\omega_k \leftarrow \text{CalcularVelocidadeAngular}(\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_e)$
 36: $x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1} \leftarrow \text{CalcularPosição}(v_k, \omega_k)$
 37: Armazena valores de odometria calculados na estrutura de odometria do serviço de Armazenamento de Medições
 38: **fim método**
 39: **método** *CalcularVelocidadeMotores*()
 40: // Leitura do registrador de contagem do encoder buffer 1
 41: $t_{k+1_e} \leftarrow$ registro do tempo atual do processador
 42: Habilita comunicação SPI com o encoder buffer 2
 43: Escreve no registrador de instrução a ação de Leitura do registrador de contagem
 44: Leitura dos 4 bytes do registrador de contagem
 45: Escreve no registrador de instrução a ação de limpeza do registrador de contagem
 46: Desabilita comunicação SPI com o encoder buffer 2
 47: Pulsos $_e \leftarrow$ Conversão dos 4 bytes lidos em um valor decimal
 48: $\dot{\varphi}_e \leftarrow N \frac{\lfloor \text{Pulsos}_e \rfloor \times \frac{60s}{1min}}{t_{k+1_e} - t_{k_e}}$
 49: $t_{k_e} \leftarrow t_{k+1_e}$
 50: // Leitura do registrador de contagem do encoder buffer 2
 51: $t_{k+1_d} \leftarrow$ registro do tempo atual do processador
 52: Habilita comunicação SPI com o encoder buffer 1
 53: Escreve no registrador de instrução a ação de Leitura do registrador de contagem
 54: Leitura dos 4 bytes do registrador de contagem
 55: Escreve no registrador de instrução a ação de limpeza do registrador de contagem
 56: Desabilita comunicação SPI com o encoder buffer 1
 57: Pulsos $_d \leftarrow$ Conversão dos 4 bytes lidos em um valor decimal
 58: $\dot{\varphi}_d \leftarrow N \frac{\lfloor \text{Pulsos}_d \rfloor \times \frac{60s}{1min}}{t_{k+1_d} - t_{k_d}}$
 59: $t_{k_d} \leftarrow t_{k+1_d}$
 60: **retorna** $\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_e$
 61: **fim método**
 62: **método** *CalcularVelocidadeTangencial*($\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_e$)
 63: $v_d \leftarrow Rk_1 \dot{\varphi}_d$
 64: $v_e \leftarrow Rk_2 \dot{\varphi}_e$
 65: **retorna** v_d, v_e
 66: **fim método**
 67: **método** *CalcularVelocidadeLinear*($\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_e$)
 68: $v_k \leftarrow \frac{R}{2}(k_1 \dot{\varphi}_d + k_2 \dot{\varphi}_e)$
 69: **retorna** v_k
 70: **fim método**

Algoritmo 2 Pseudo-código do Software Majoritário de Odometria dos Encoders, parte 3.

71: **método** *CalcularVelocidadeAngular*($\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_e$)

72: $\omega_k \leftarrow \frac{R}{2\ell k_3}(k_1 \dot{\varphi}_d - k_2 \dot{\varphi}_e)$

73: **retorna** ω_k

74: **fim método**

75: **método** *CalcularPosição*(v_k, ω_k)

76: Lê valores de posição x_k, y_k, θ_k do AGV no instante anterior t_k no serviço de Armazenamento de Medições

77: $t_{k+1} \leftarrow$ registro do tempo atual do processador

78: $T \leftarrow t_{k+1} - t_k$

79: $x_{k+1} \leftarrow x_k + v_k T \cos \theta_k$

80: $y_{k+1} \leftarrow y_k + v_k T \sin \theta_k$

81: $\theta_{k+1} \leftarrow \theta_k + \omega_k T$

82: $t_k \leftarrow t_{k+1}$

83: **retorna** $x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1}$

84: **fim método**

Algoritmo 3 Pseudo-código do serviço de correção do movimento do AGV diferencial.**inclua:** bibliotecas necessárias**variáveis:**

velocidadeBase // inteiro, velocidade base, em percentual, do AGV para movimento retilíneo

velocidadeMotorDireito // flutuante por referência, velocidade do motor direito em PWM

velocidadeMotorEsquerdo // flutuante por referência, velocidade do motor esquerdo em PWM

açãoControle // flutuante, representa, em percentual, a ação de controle para correção do movimento

máximoPWM, mínimoPWM // inteiro, velocidades máxima e mínima em PWM

1: **construtor** *CorreçãoMovimentoConfiguraçãoDiferencial()* // Construtor padrão

2: **fim construtor**

3: **destrutor** *CorreçãoMovimentoConfiguraçãoDiferencial()* // Destrutor padrão

4: **fim destrutor**

5: **método** *CorreçãoVelocidadeConfiguraçãoDiferencial(velocidadeMotorDireito, velocidadeMotorEsquerdo, açãoControle, máximoPWM, mínimoPWM, velocidadeBase)*

// Corrige a velocidade de cada motor a partir da velocidade base e da correção do controlador

// Calcula valor percentual da velocidade dos motores

6: velocidadeMotorDireito \leftarrow velocidadeBase - açãoControle

7: velocidadeMotorEsquerdo \leftarrow velocidadeBase + açãoControle

// Limita a velocidade dos motores ao valor percentual máximo, de acordo com máximoPWM

8: **se** velocidadeMotorDireito > 100 **então**

9: velocidadeMotorDireito = 100

10: **fim se**

11: **se** velocidadeMotorEsquerdo > 100 **então**

12: velocidadeMotorEsquerdo = 100

13: **fim se**

// Limita a velocidade dos motores a valores positivos

14: **se** velocidadeMotorDireito < 0 **então**

15: velocidadeMotorDireito = 0

16: **fim se**

17: **se** velocidadeMotorEsquerdo < 0 **então**

18: velocidadeMotorEsquerdo = 0

19: **fim se**

// Converte os valores calculados, em percentual, para velocidades escalares, usando interpolação

20: velocidadeMotorDireito \leftarrow ((máximoPWM - mínimoPWM)/100) \times velocidadeMotorDireito - mínimoPWM

21: velocidadeMotorEsquerdo \leftarrow ((máximoPWM - mínimoPWM)/100) \times velocidadeMotorEsquerdo - mínimoPWM

22: **fim método**

APÊNDICE C

Sistemas de Inferência Fuzzy

Este Apêndice apresenta os valores das funções de pertinência e a base de regras para os sistemas de inferência para as etapas graduais de implementação da proposta. Além disso, os gráficos de outras variáveis de interesse de cada controlador fuzzy serão apresentados.

C.1 Fuzzy2

Tabela 22 – Base de regras do sistema de inferência fuzzy 1 para os controladores Fuzzy2a e Fuzzy2b.

Regra	Antecedentes		Consequente	Peso
	Ângulo	Distância	Saída de Controle	
1	N	N	CAD	1
2	N	Z	CD	0,25
3	N	P	F	1
4	Z	N	CAD	0,01
5	Z	Z	F	1
6	Z	P	CAE	0,01
7	P	N	F	,
8	P	Z	CE	0,25
9	P	P	CAE	1

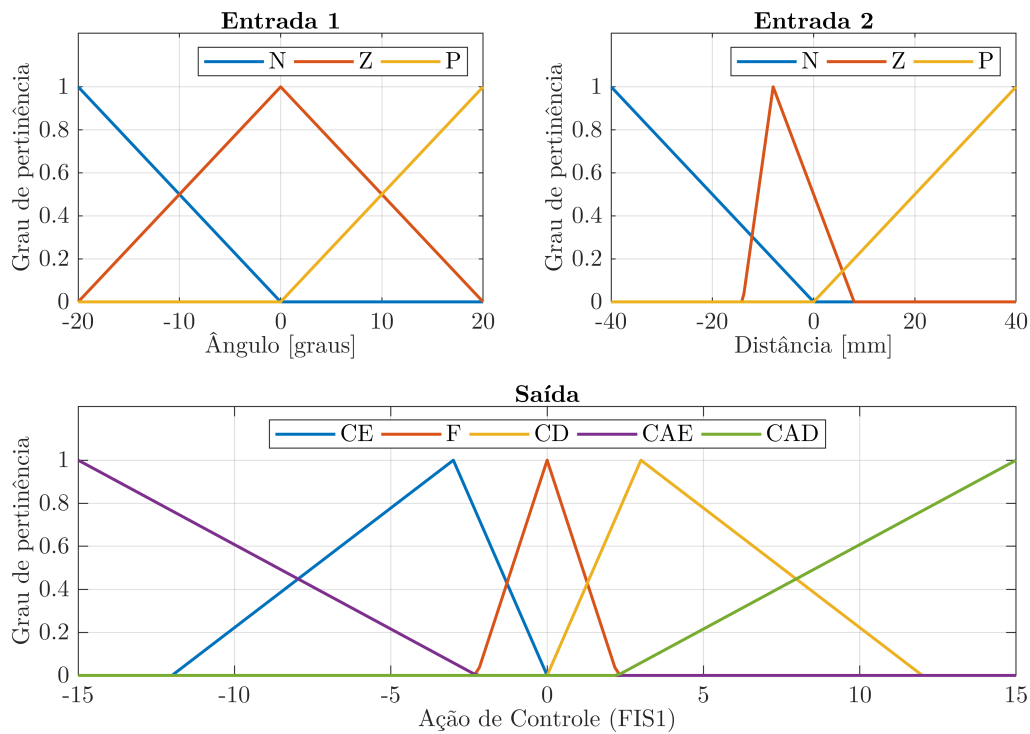


Figura 107 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 1 para os controladores Fuzzy2a e Fuzzy2b.

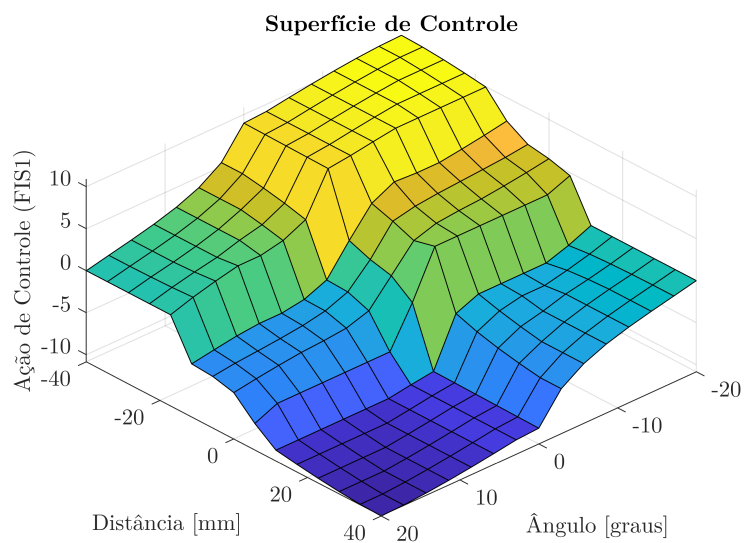


Figura 108 – Superfície de controle do sistema de inferência fuzzy 1 para os controladores Fuzzy2a e Fuzzy2b.

C.1.1 Fuzzy2a - Outras variáveis medidas

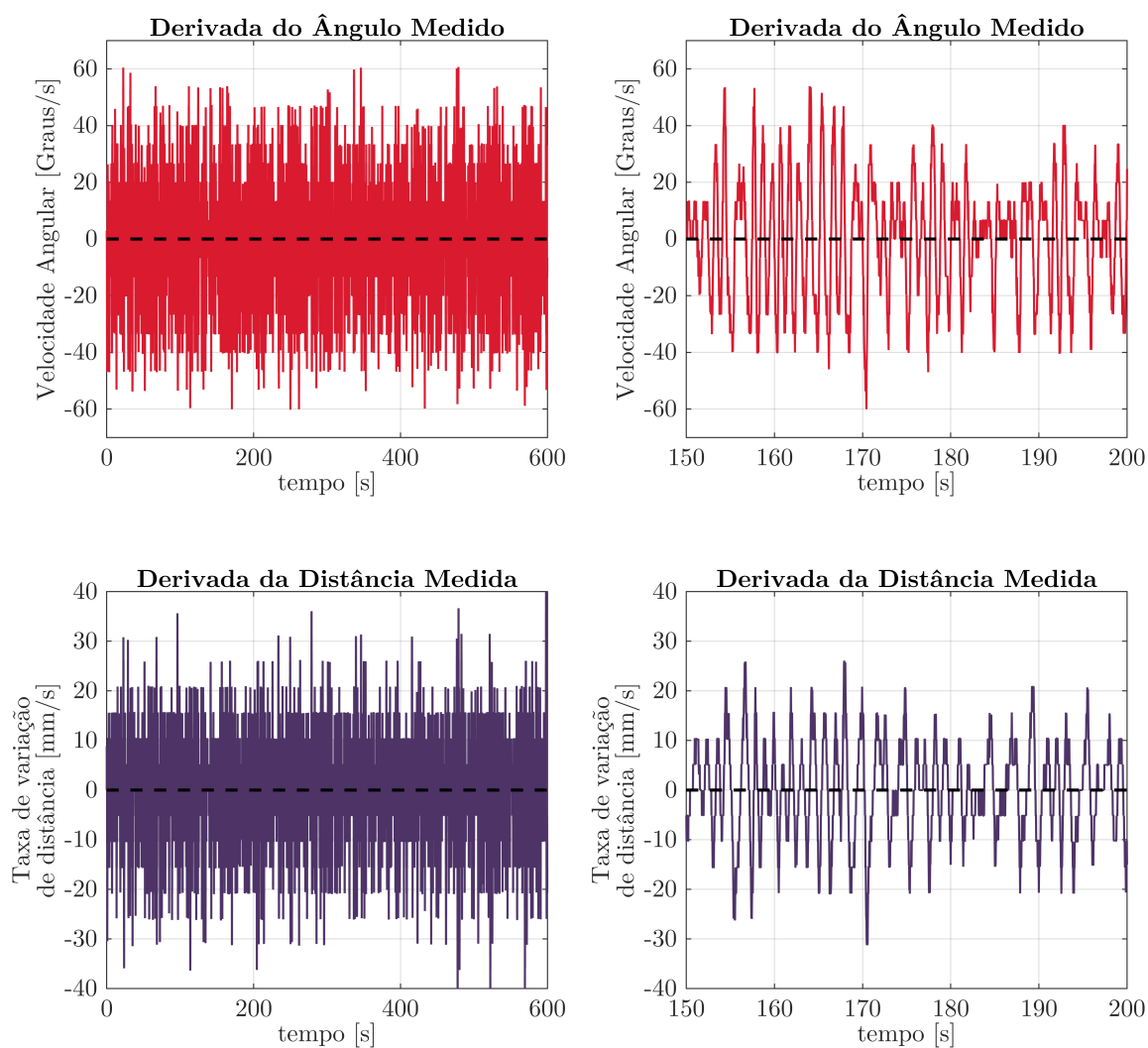


Figura 109 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 kg .

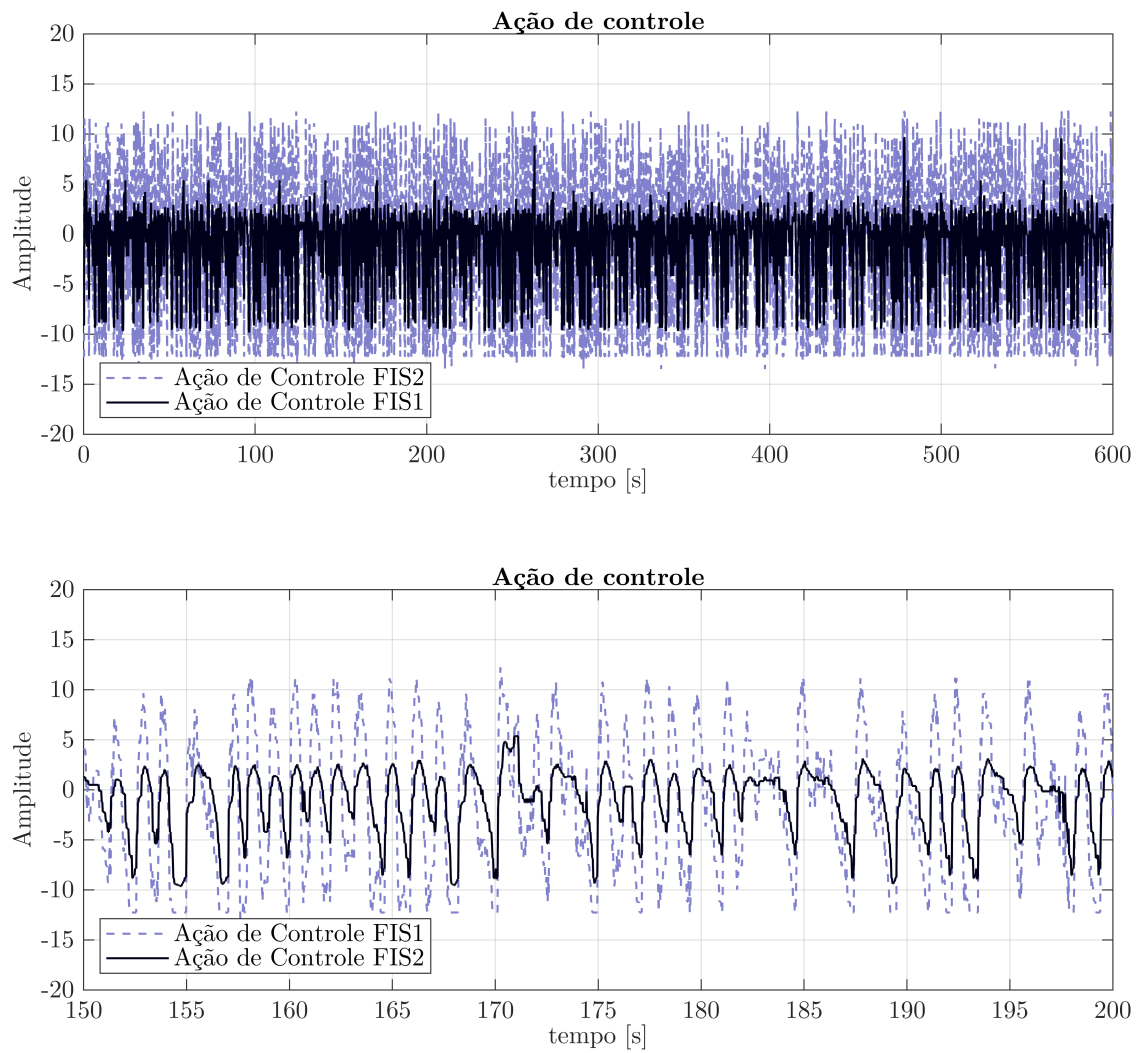


Figura 110 – Ações de controle dos FIS1 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 0 kg.

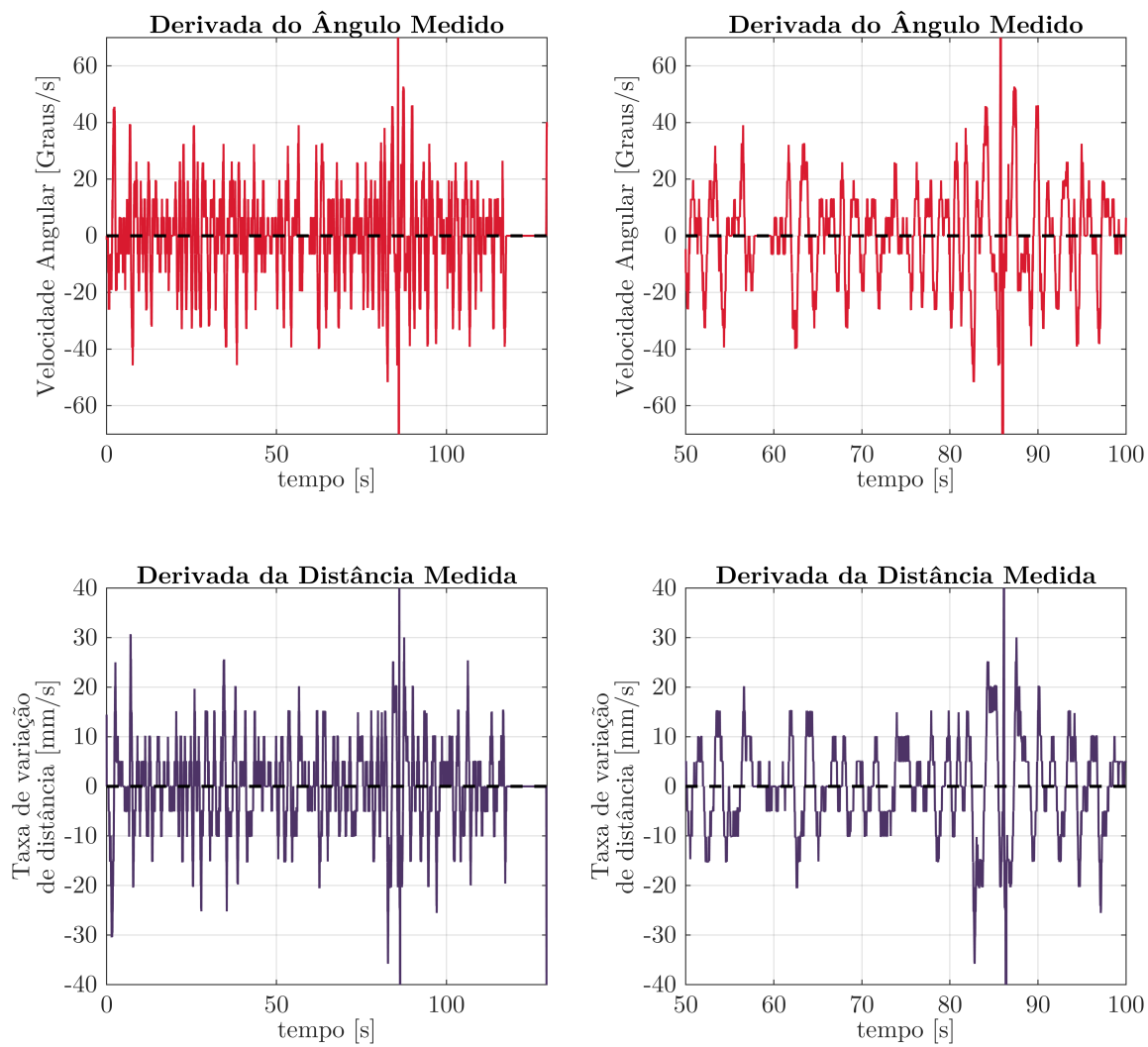


Figura 111 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 kg.

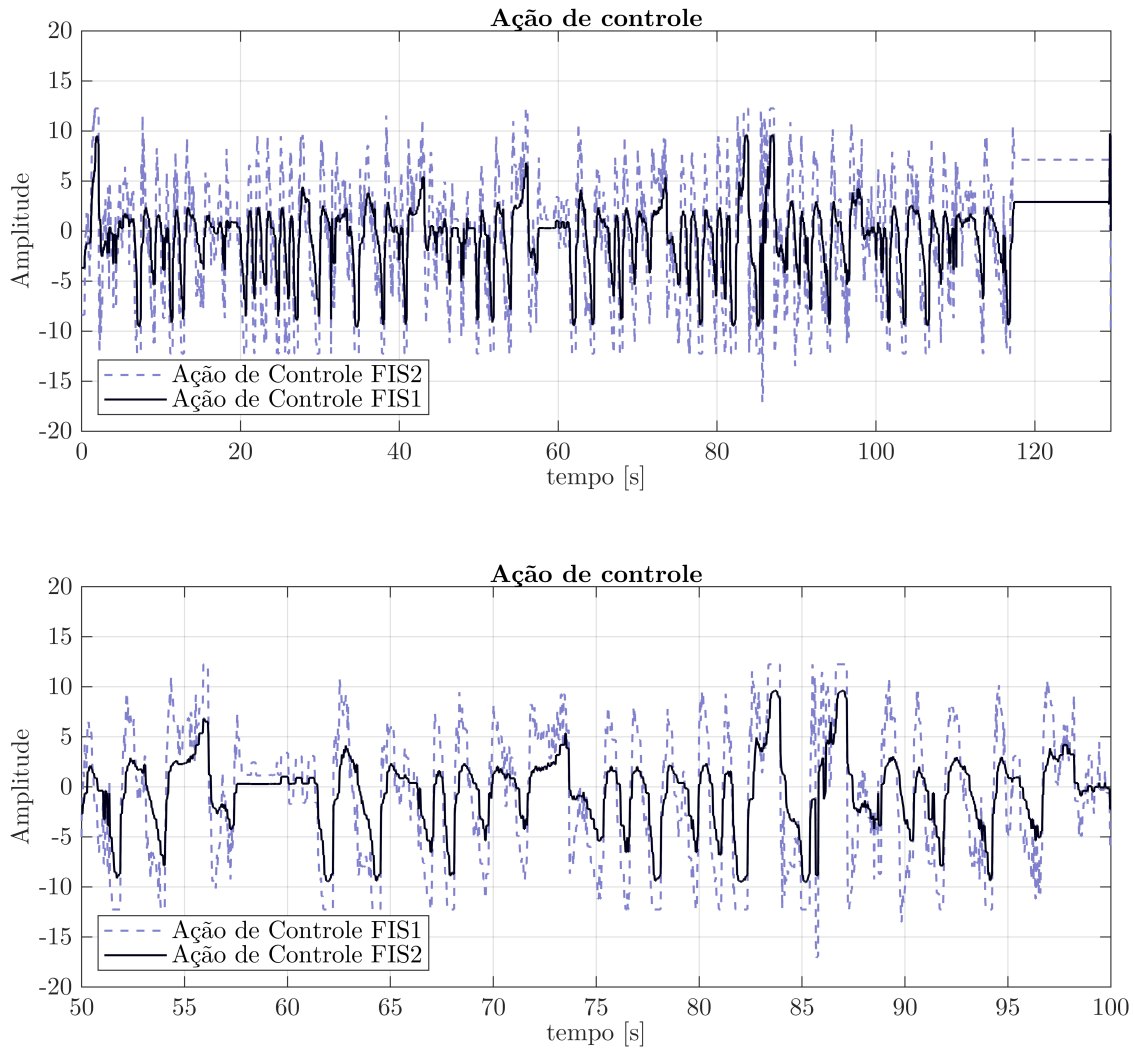


Figura 112 – Ações de controle dos FIS1 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 1 kg.

C.1.2 Fuzzy2b - Outras variáveis medidas

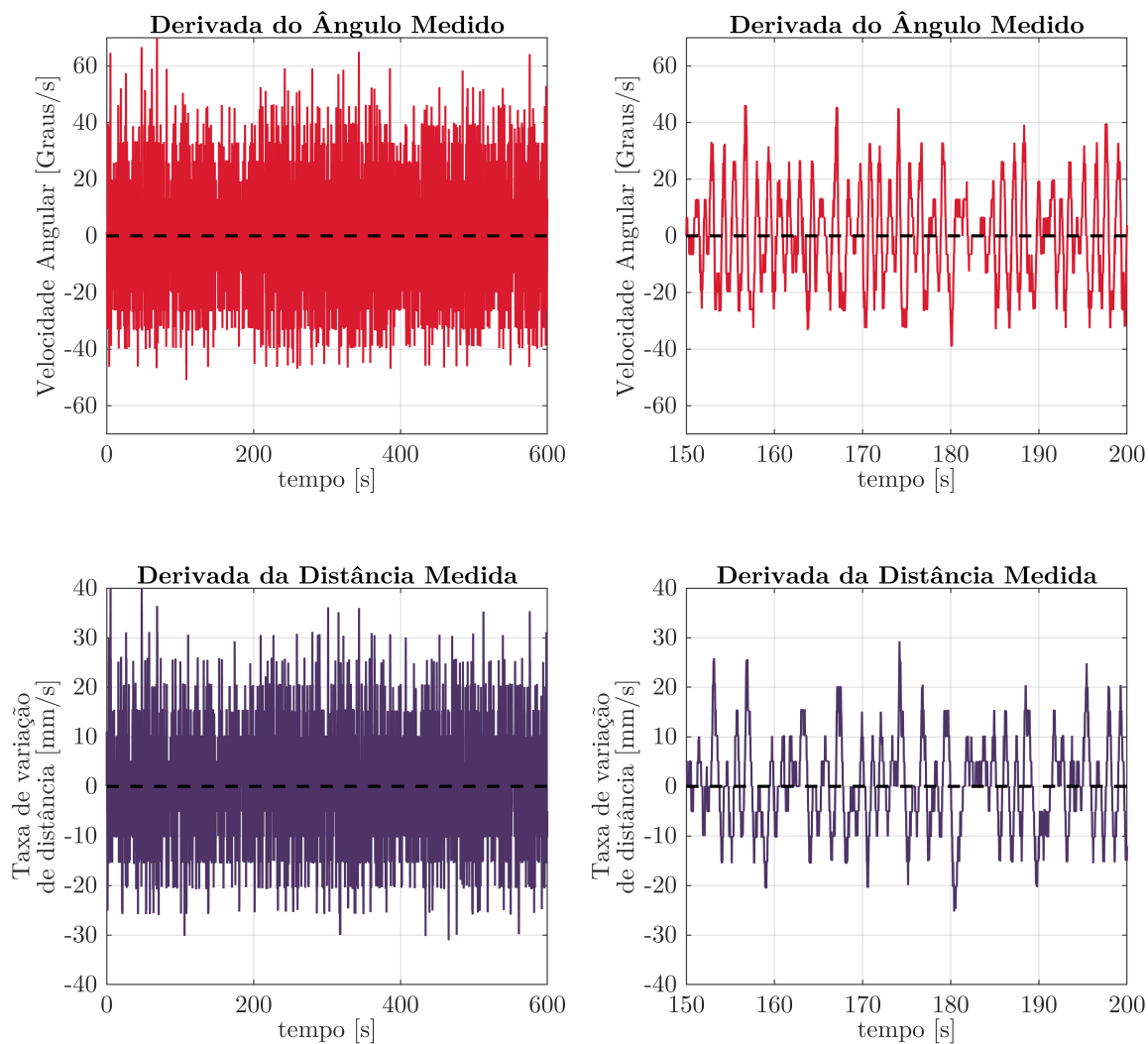


Figura 113 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 kg.

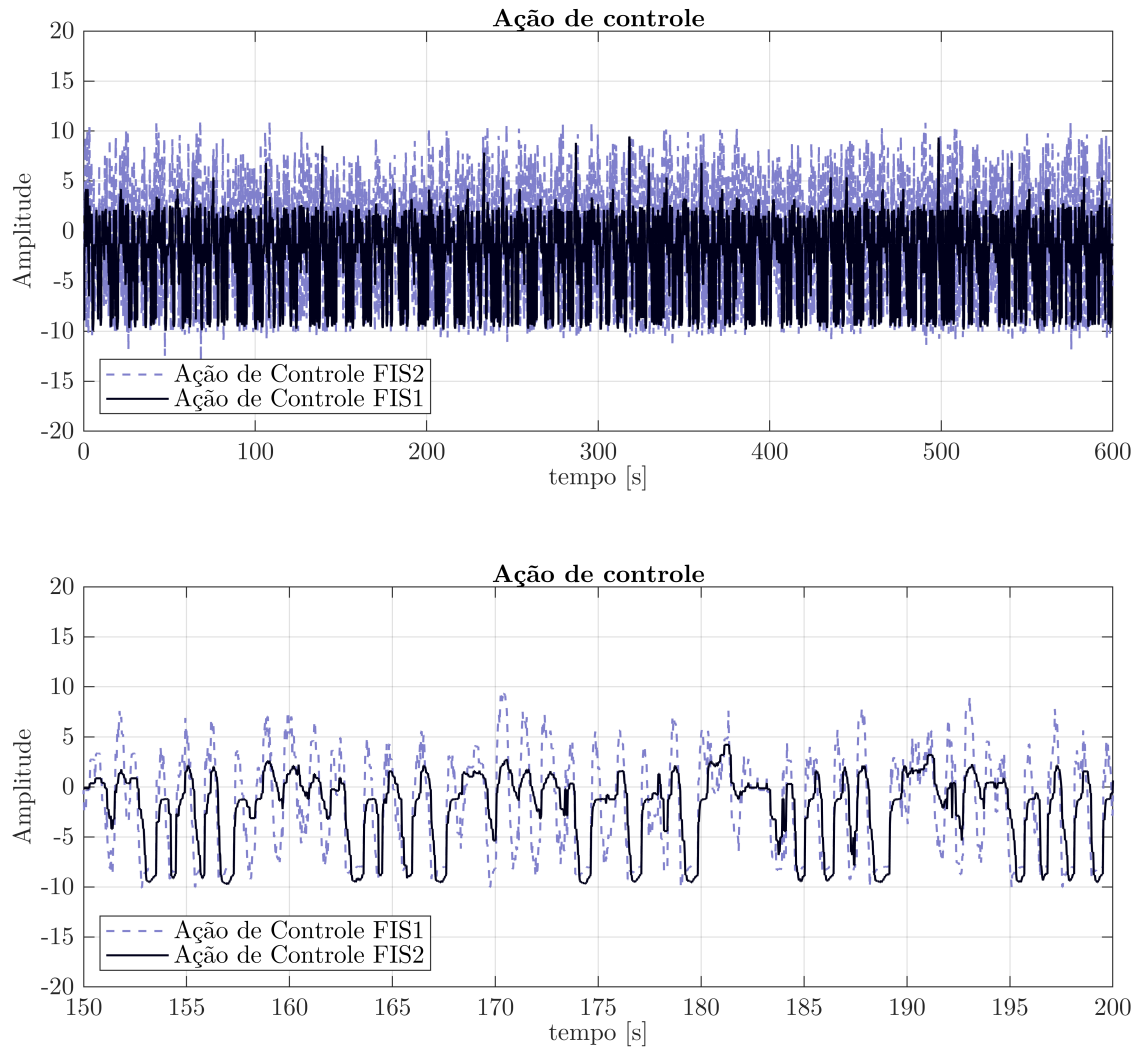


Figura 114 – Ações de controle dos FIS1 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 0 kg.

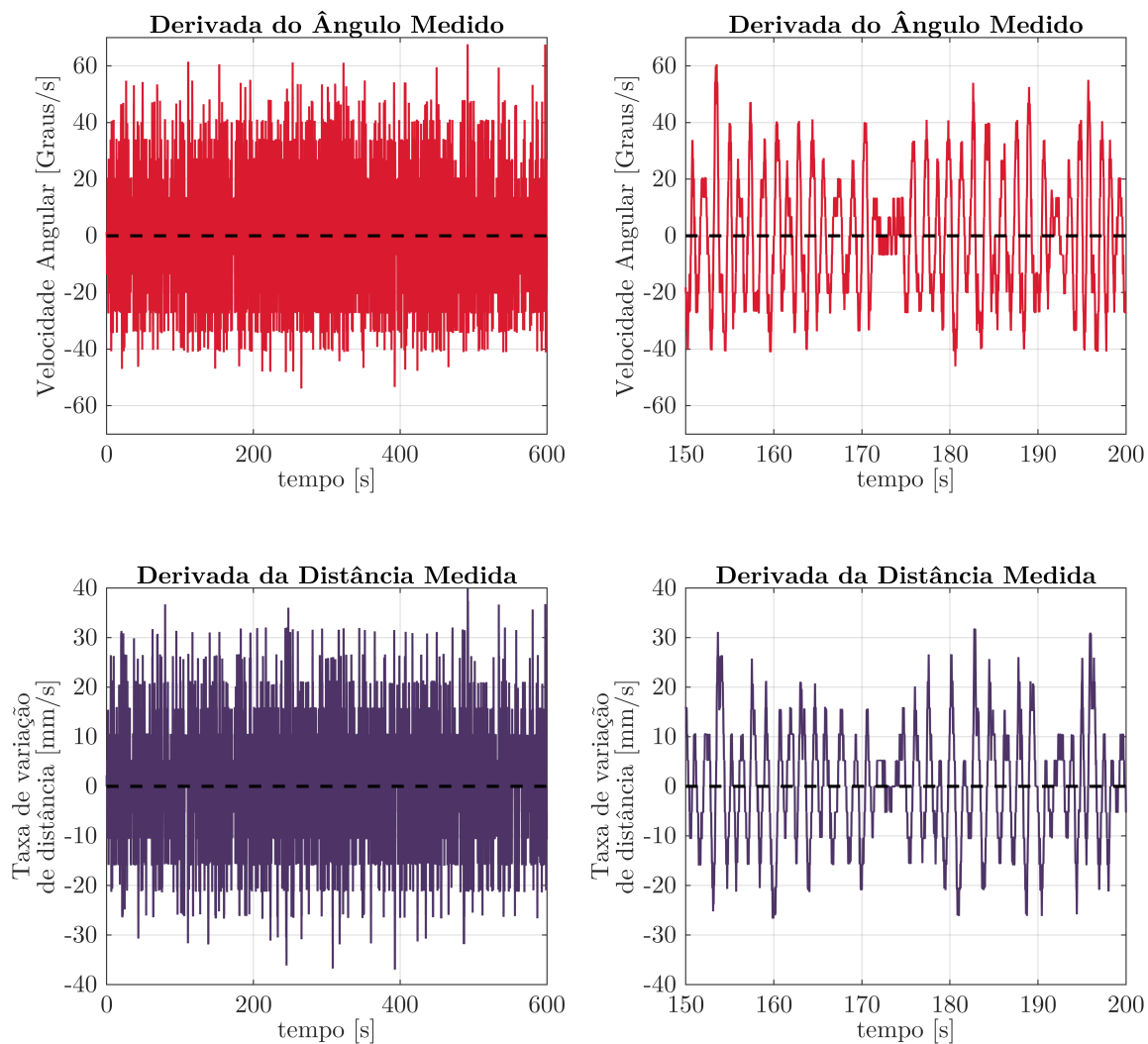


Figura 115 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 kg.

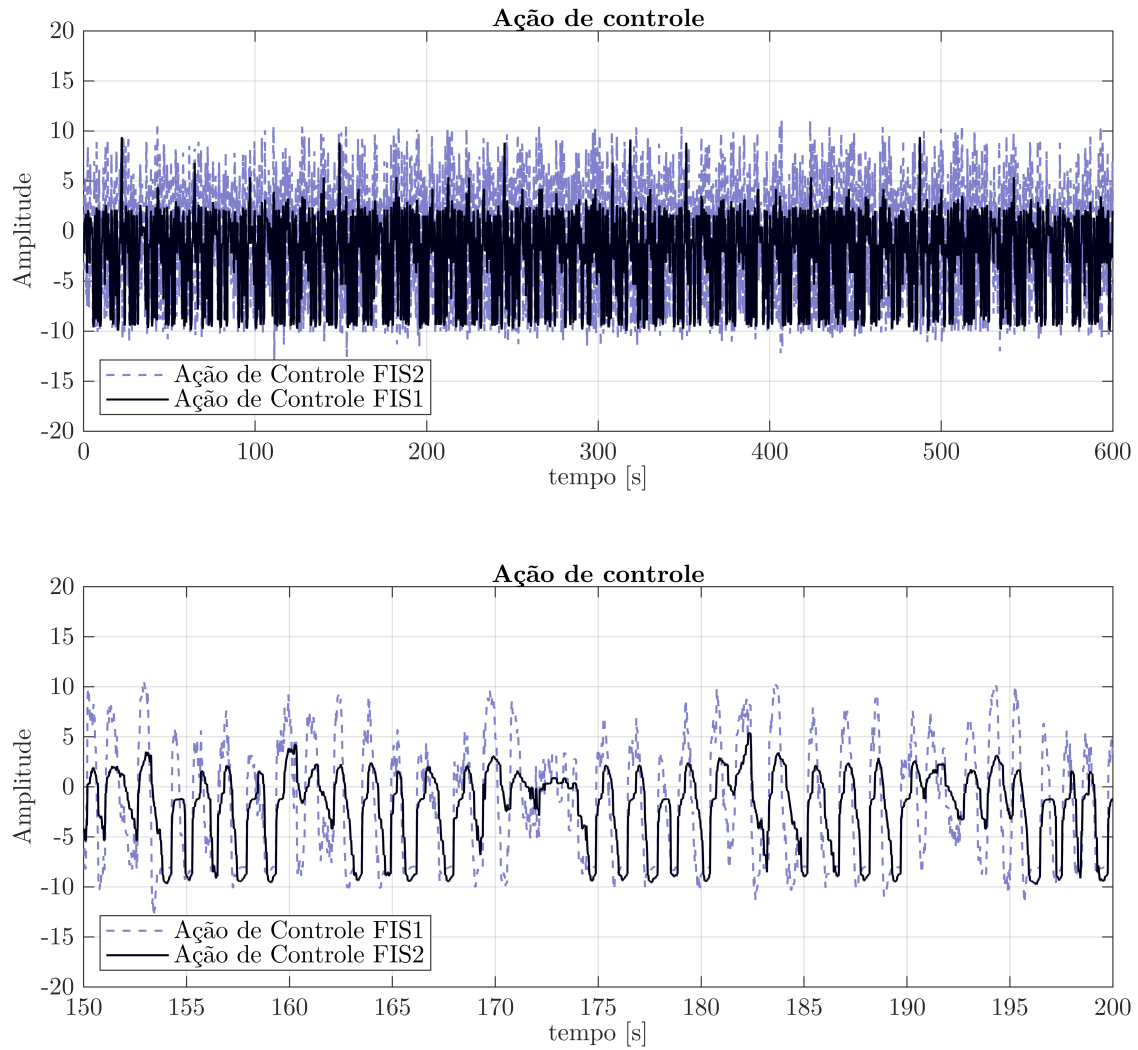


Figura 116 – Ações de controle dos FIS1 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 1 kg.

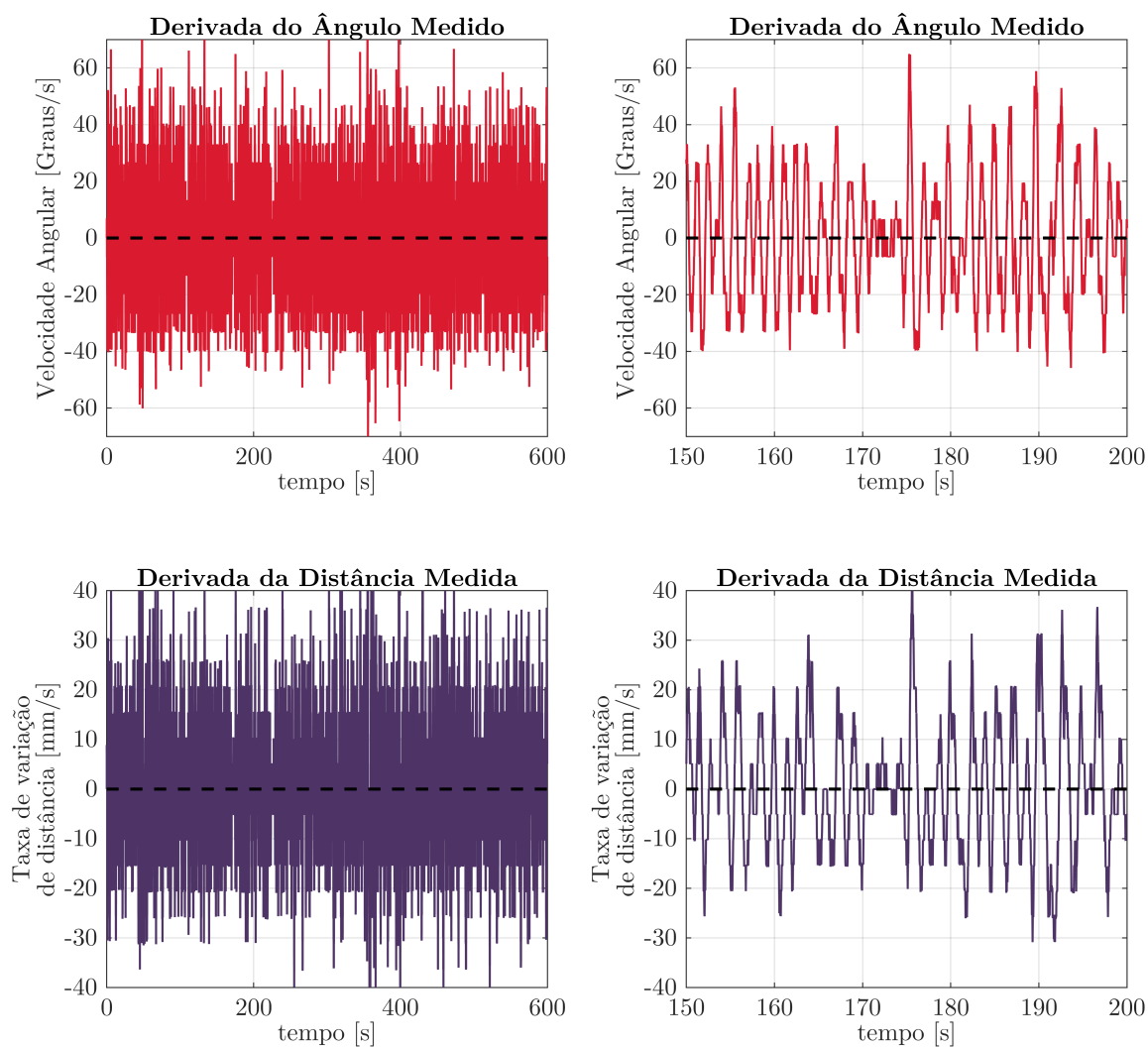


Figura 117 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 2 kg.

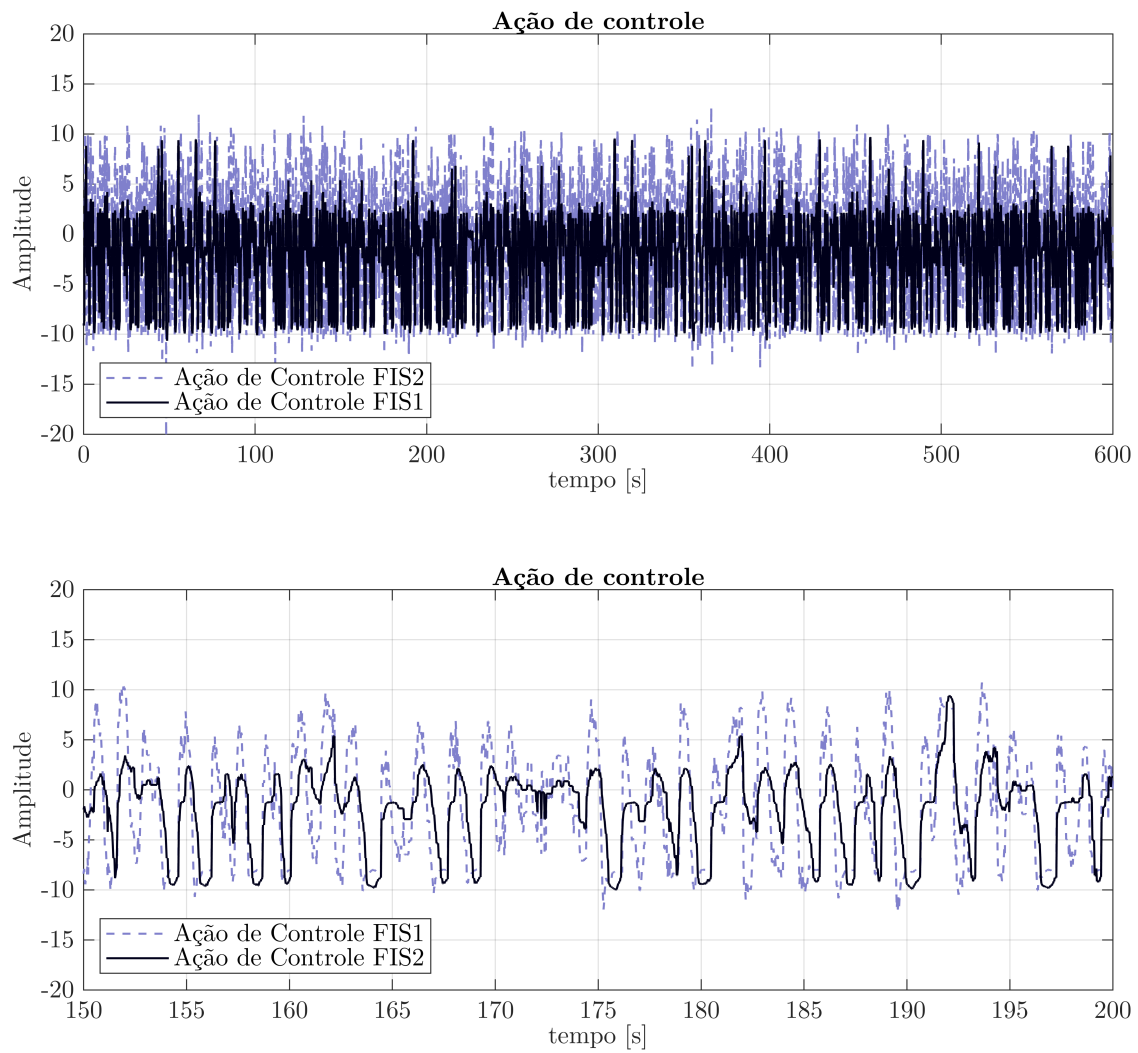


Figura 118 – Ações de controle dos FIS1 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 2 kg.

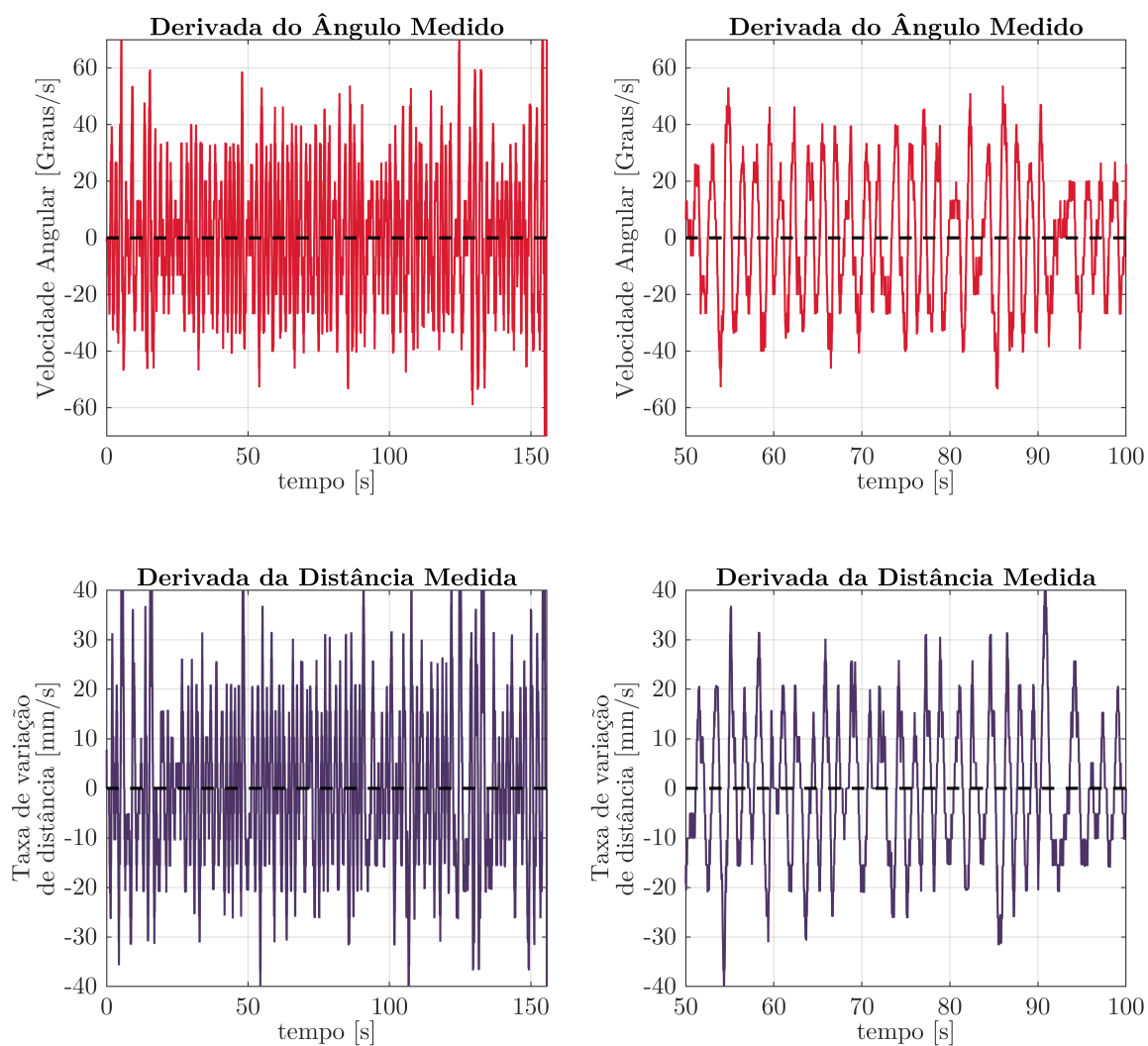


Figura 119 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 3 kg.

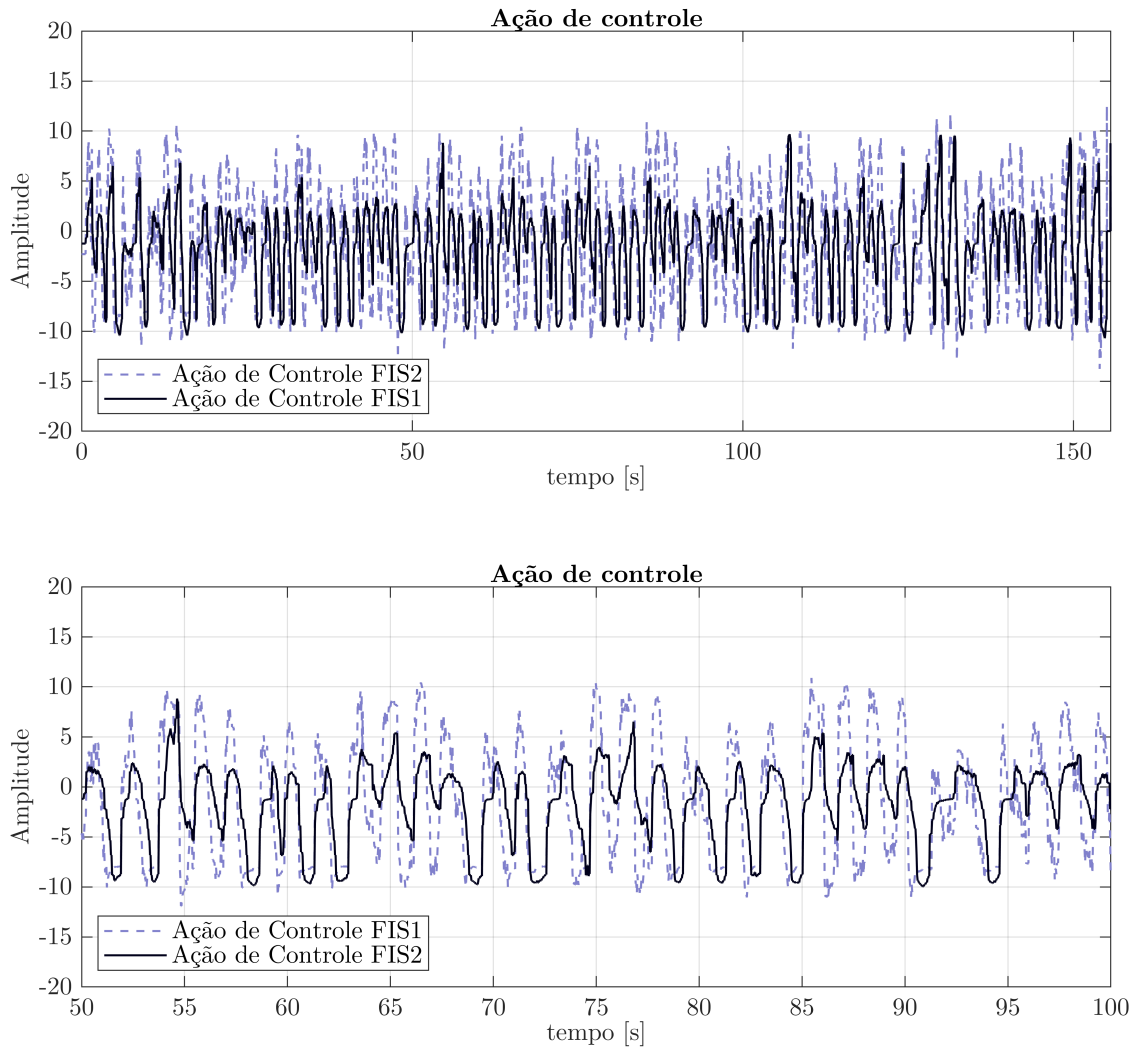


Figura 120 – Ações de controle dos FIS1 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 3 kg.

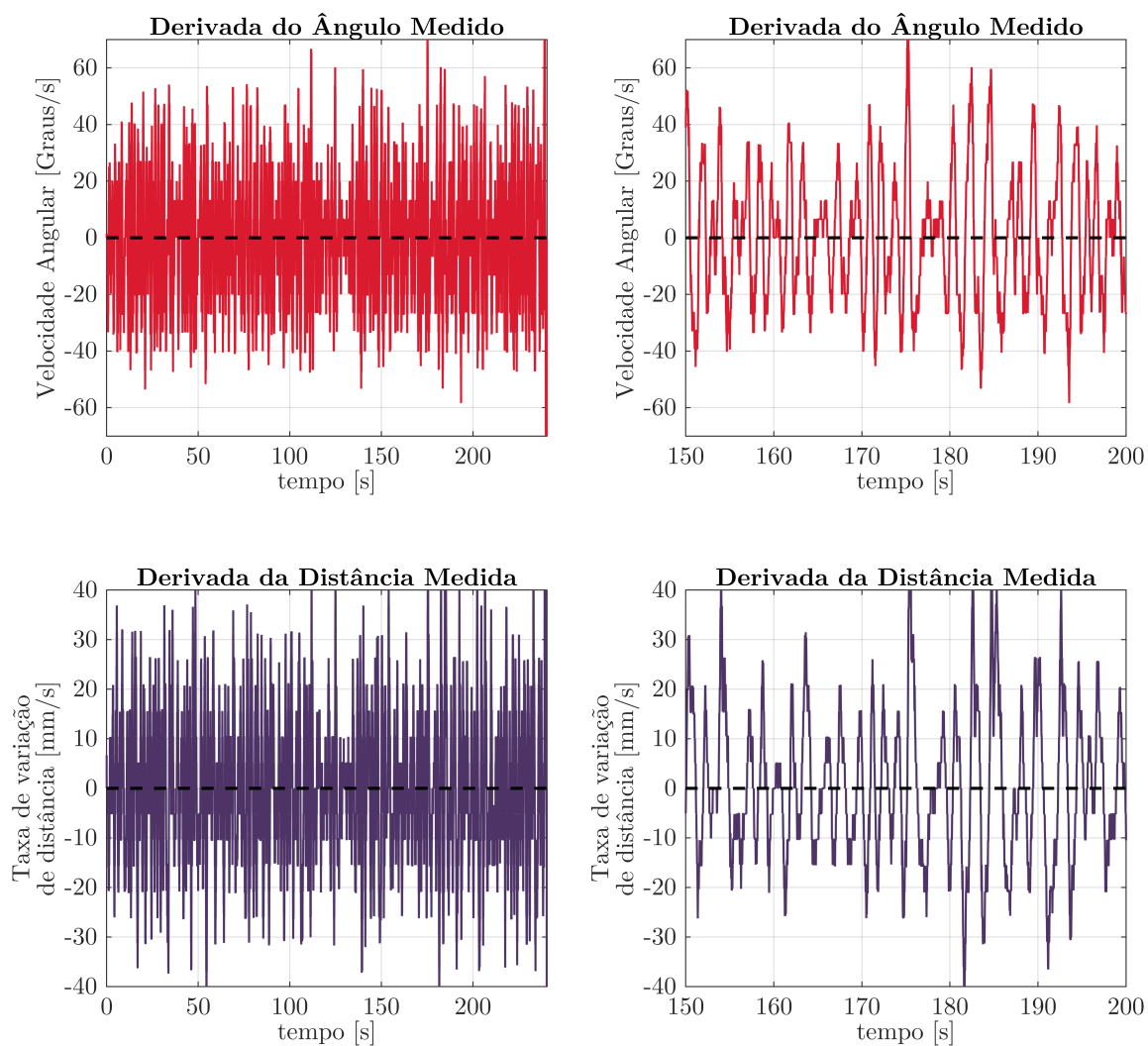


Figura 121 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 4 kg.

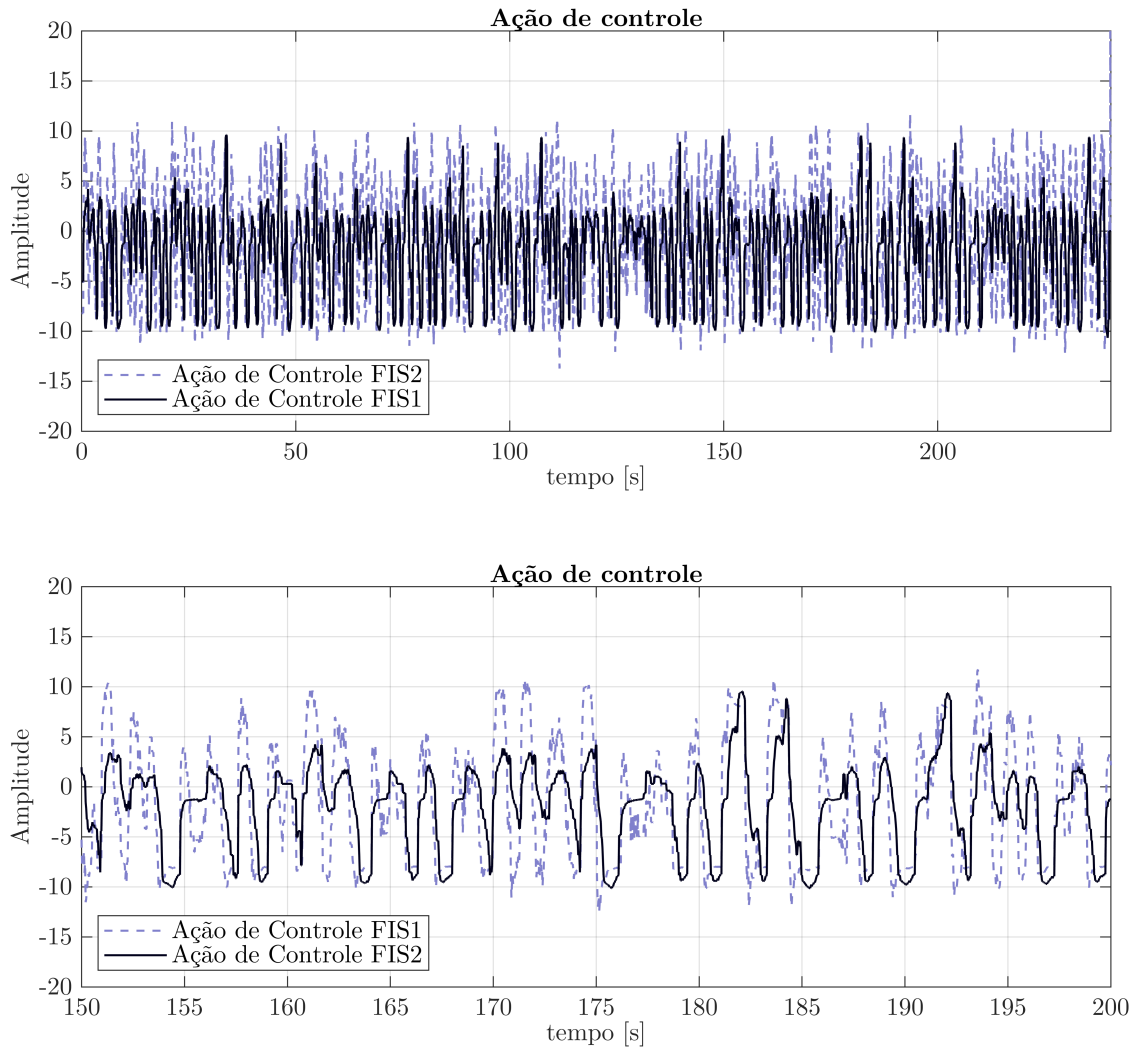


Figura 122 – Ações de controle dos FIS1 e FIS2, sendo a ação de controle do FIS2 a saída do Fuzzy2a na condição de carga 4 kg.

C.2 Fuzzy3

Para os controladores Fuzzy3a e Fuzzy3b, o sistema de inferência FIS1 permaneceu o mesmo utilizado nos controladores Fuzzy2a e Fuzzy2b e o sistema de inferência FIS2 permaneceu o mesmo em relação ao apresentado na Seção 4.3.2.2.

C.2.1 Fuzzy3a - Outras variáveis medidas

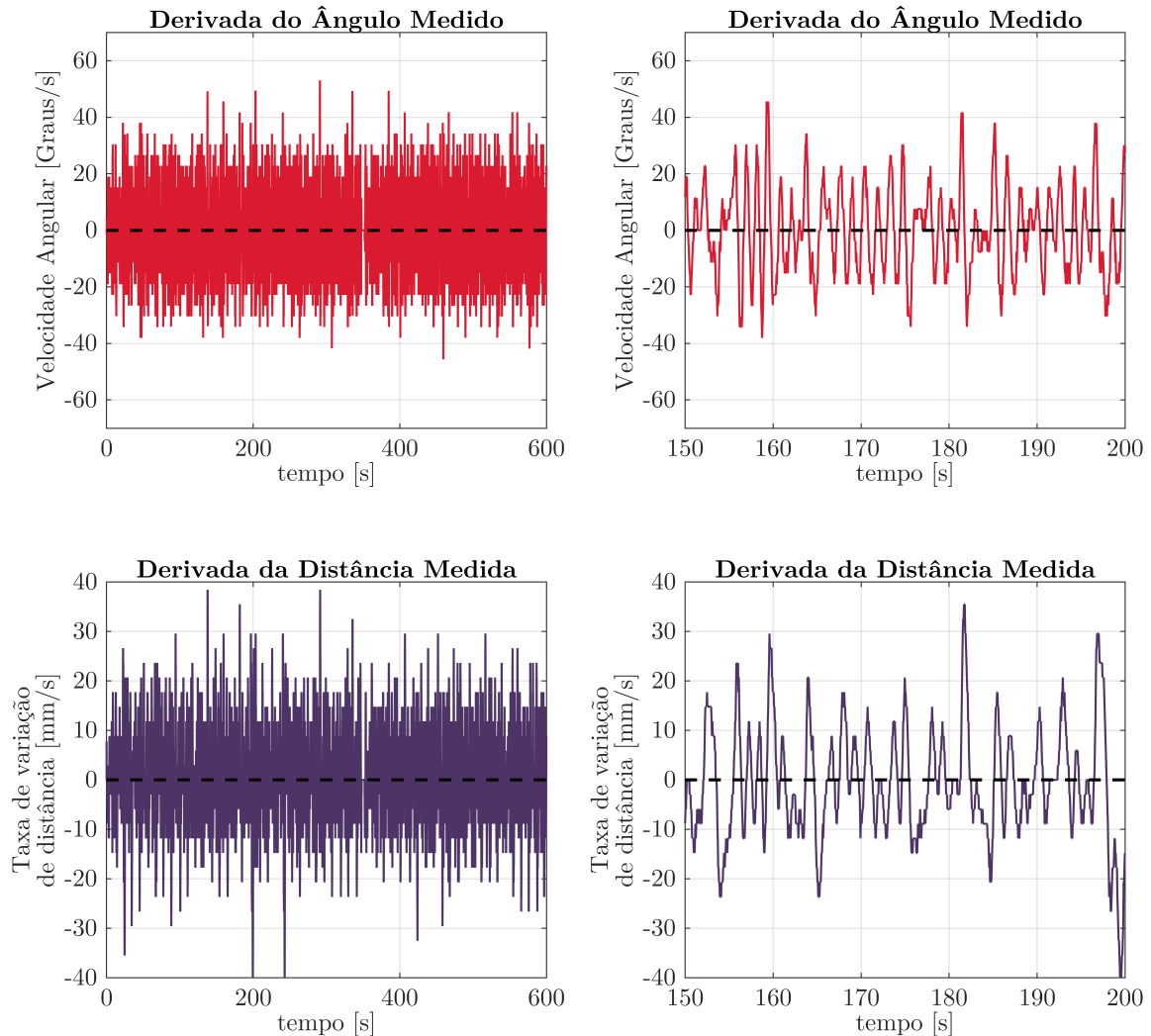


Figura 123 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 kg.

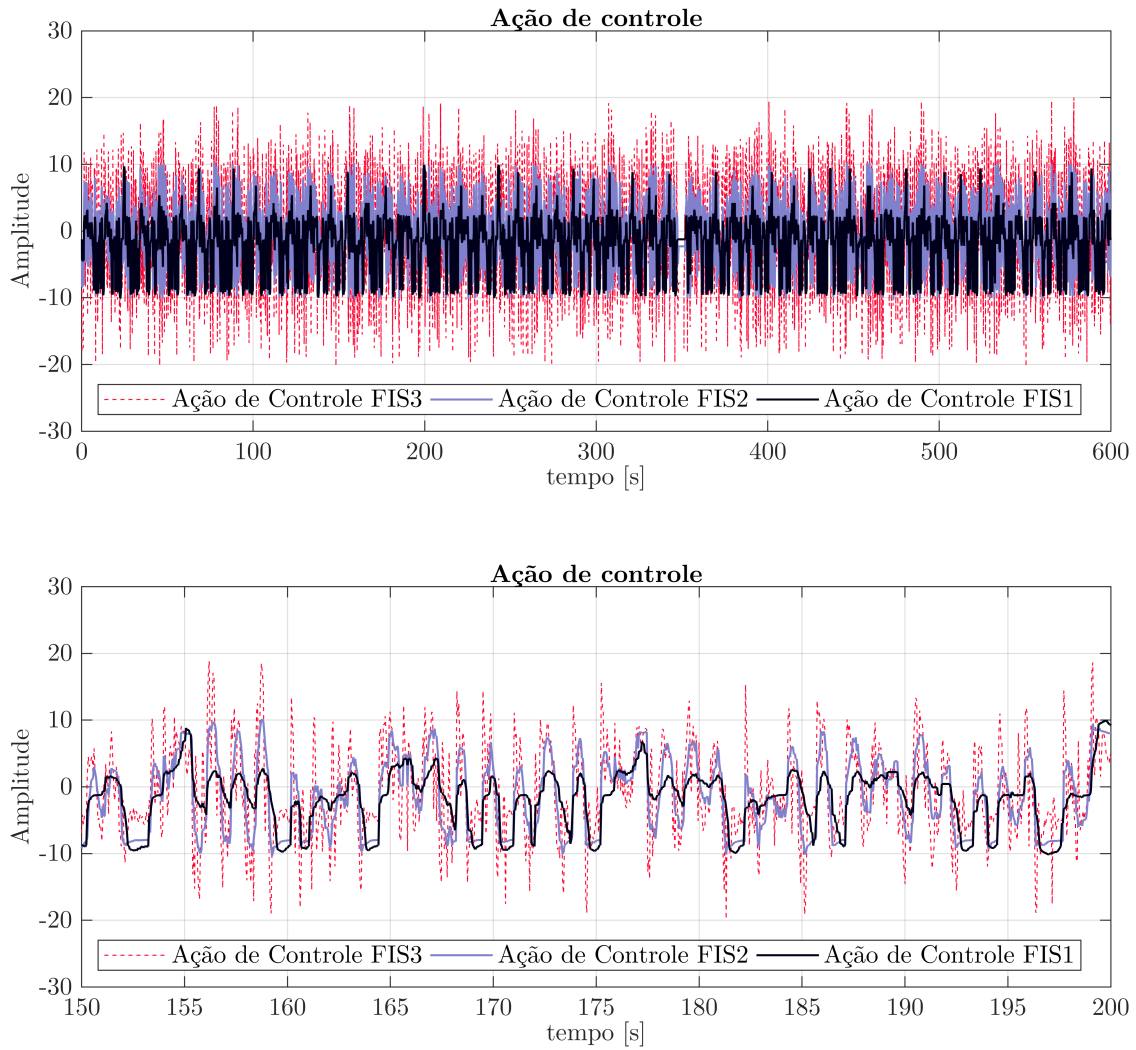


Figura 124 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 0 kg .

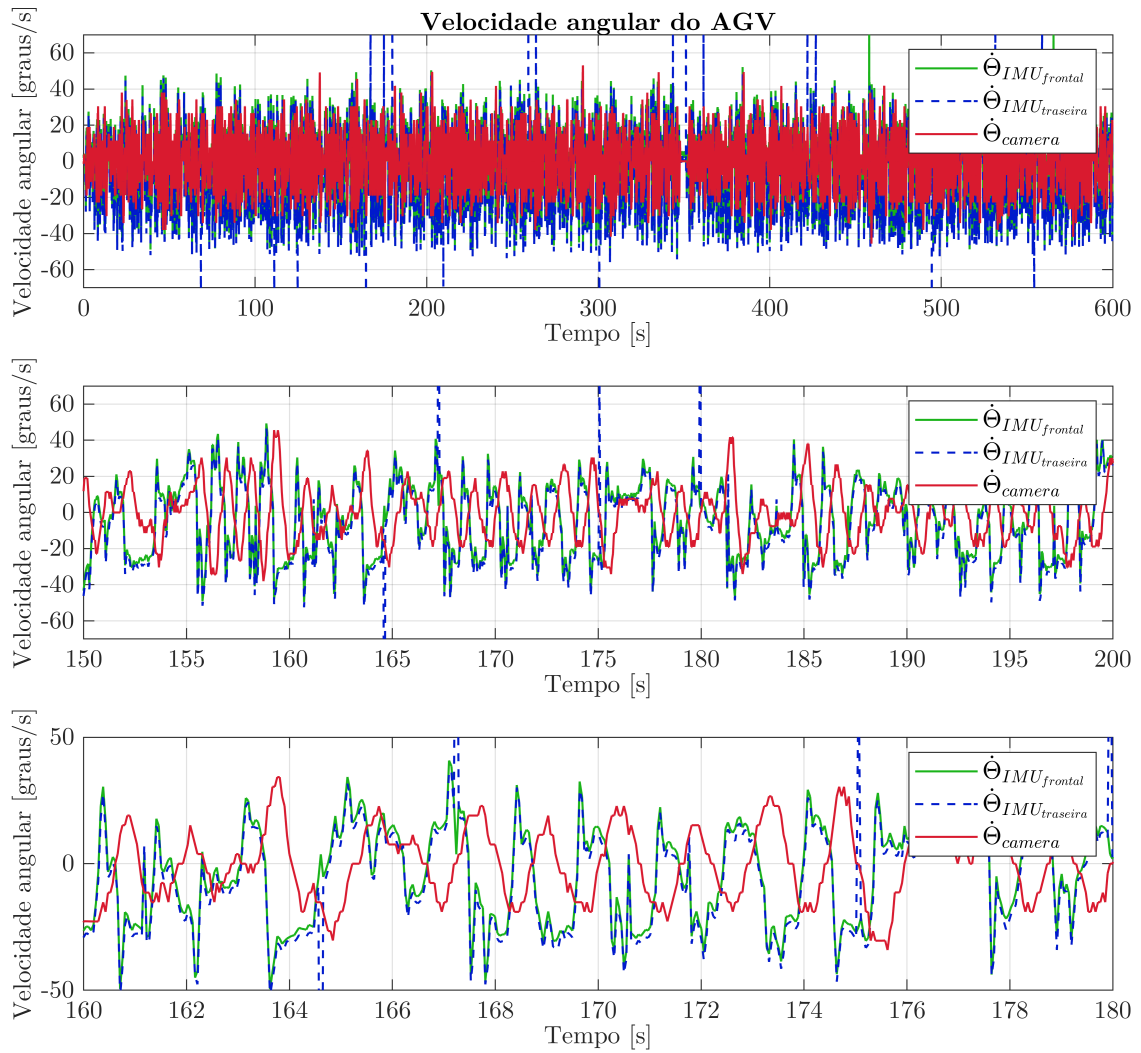


Figura 125 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 0 kg . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

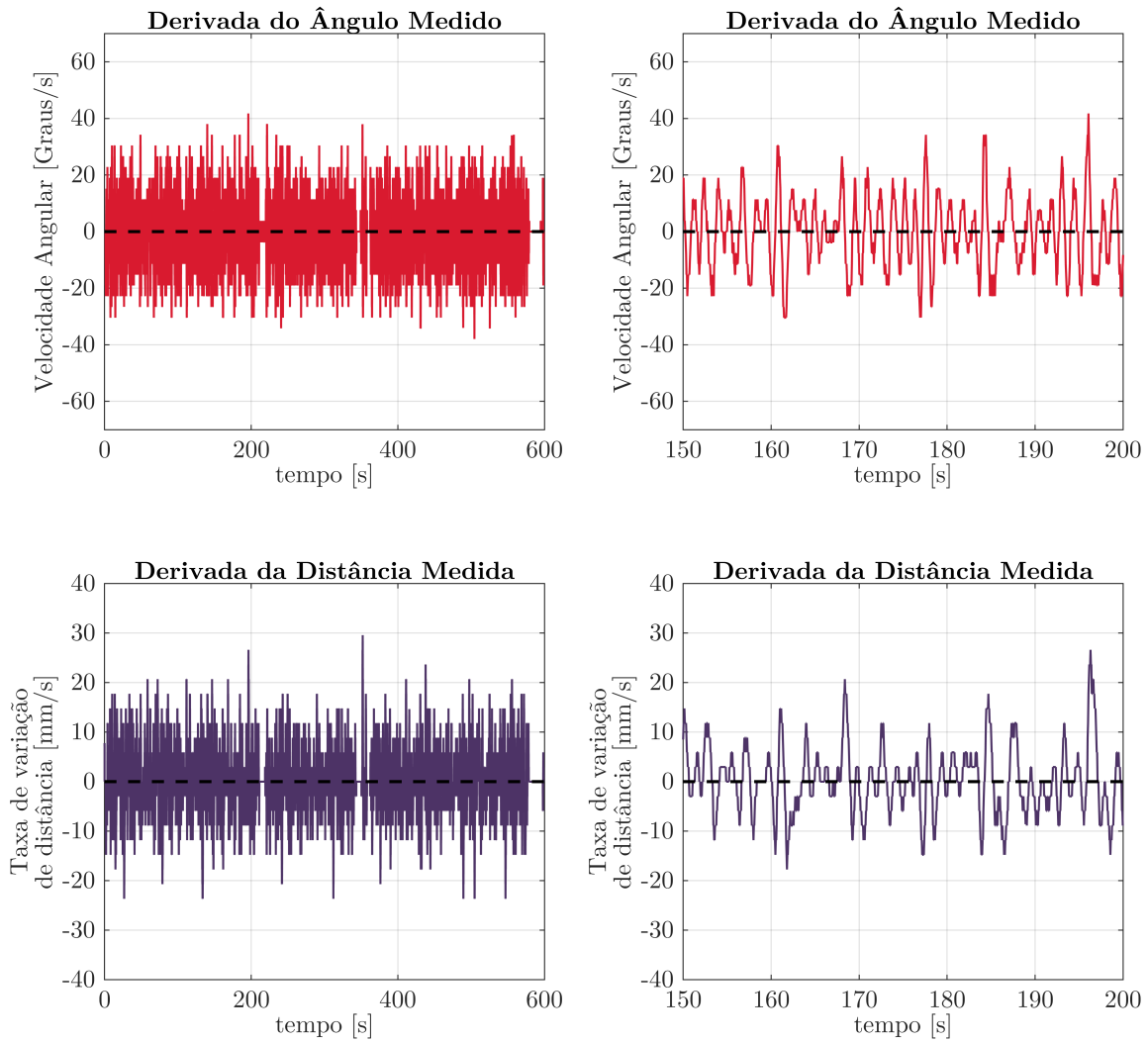


Figura 126 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 kg.

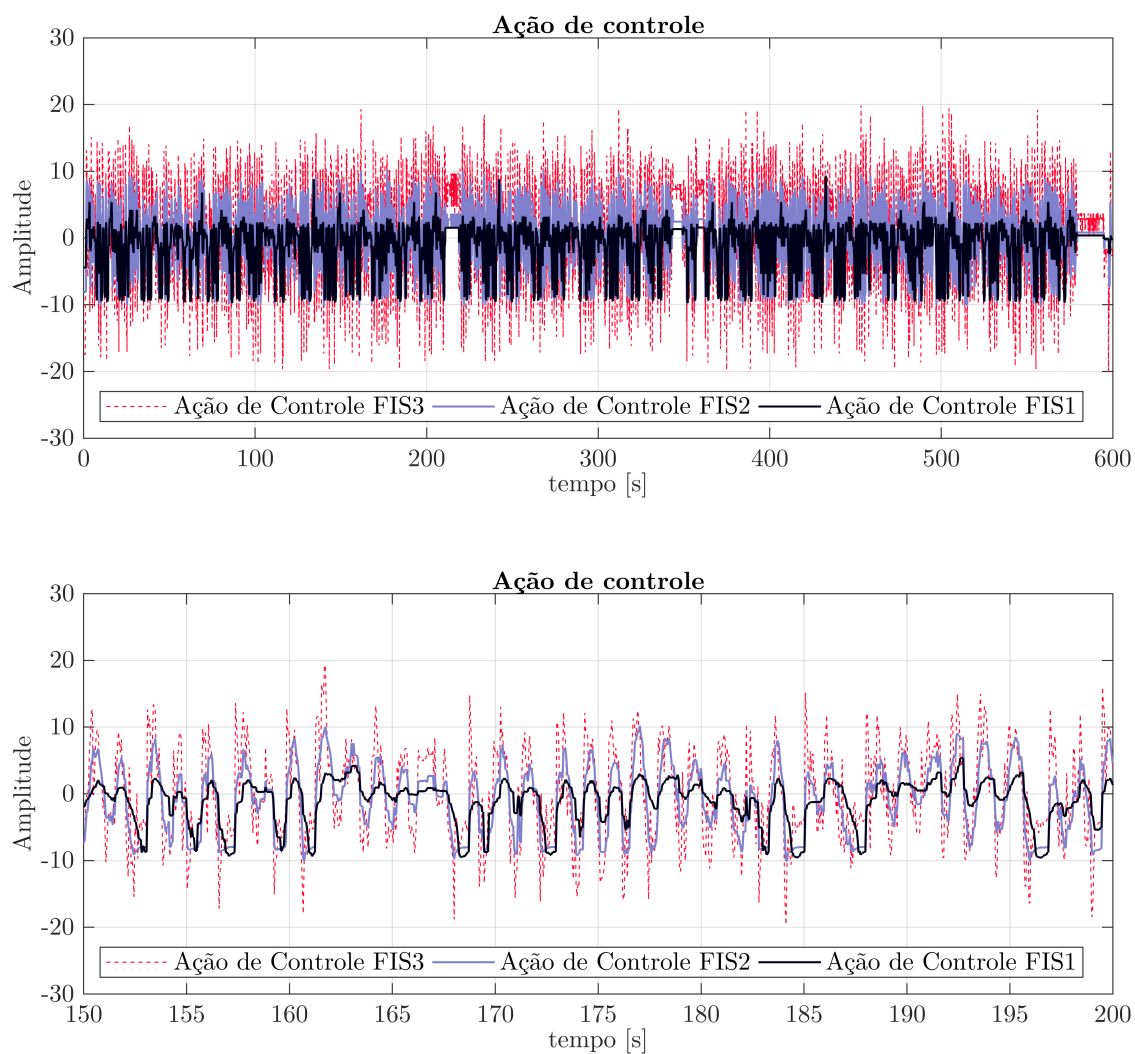


Figura 127 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 1 kg.

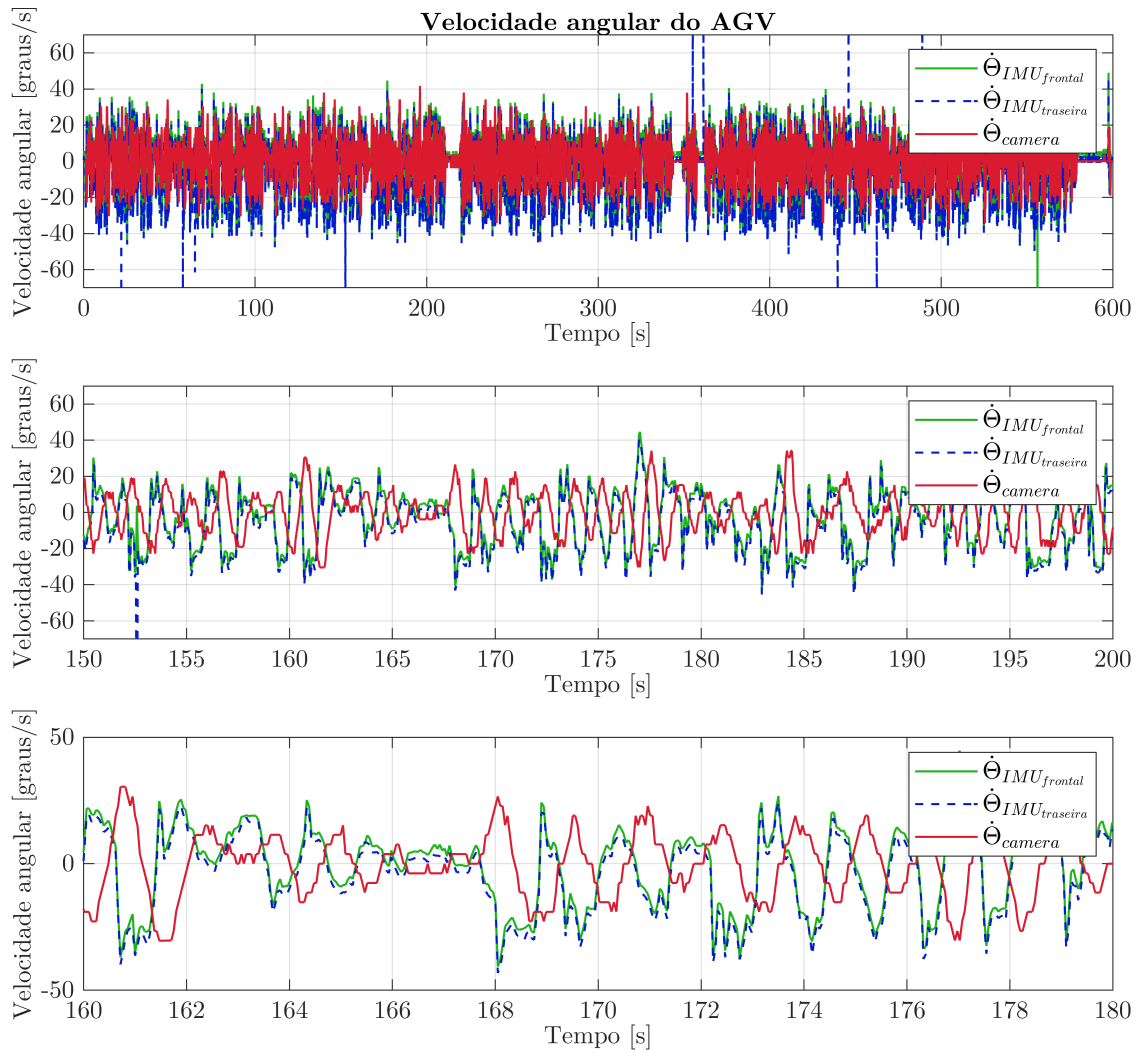


Figura 128 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 1 kg. As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

C.2.2 Fuzzy3b - Outras variáveis medidas

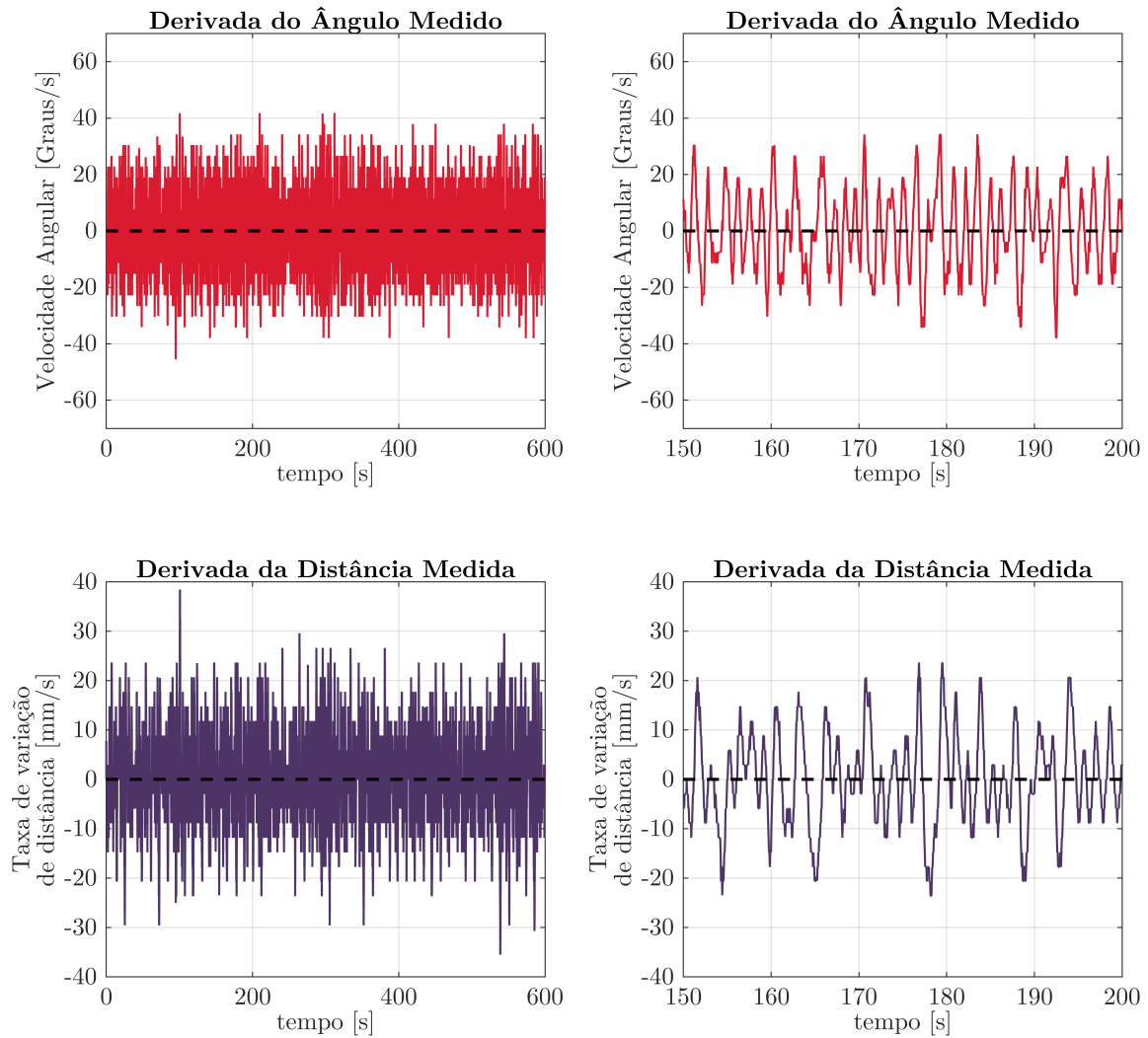


Figura 129 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 kg.

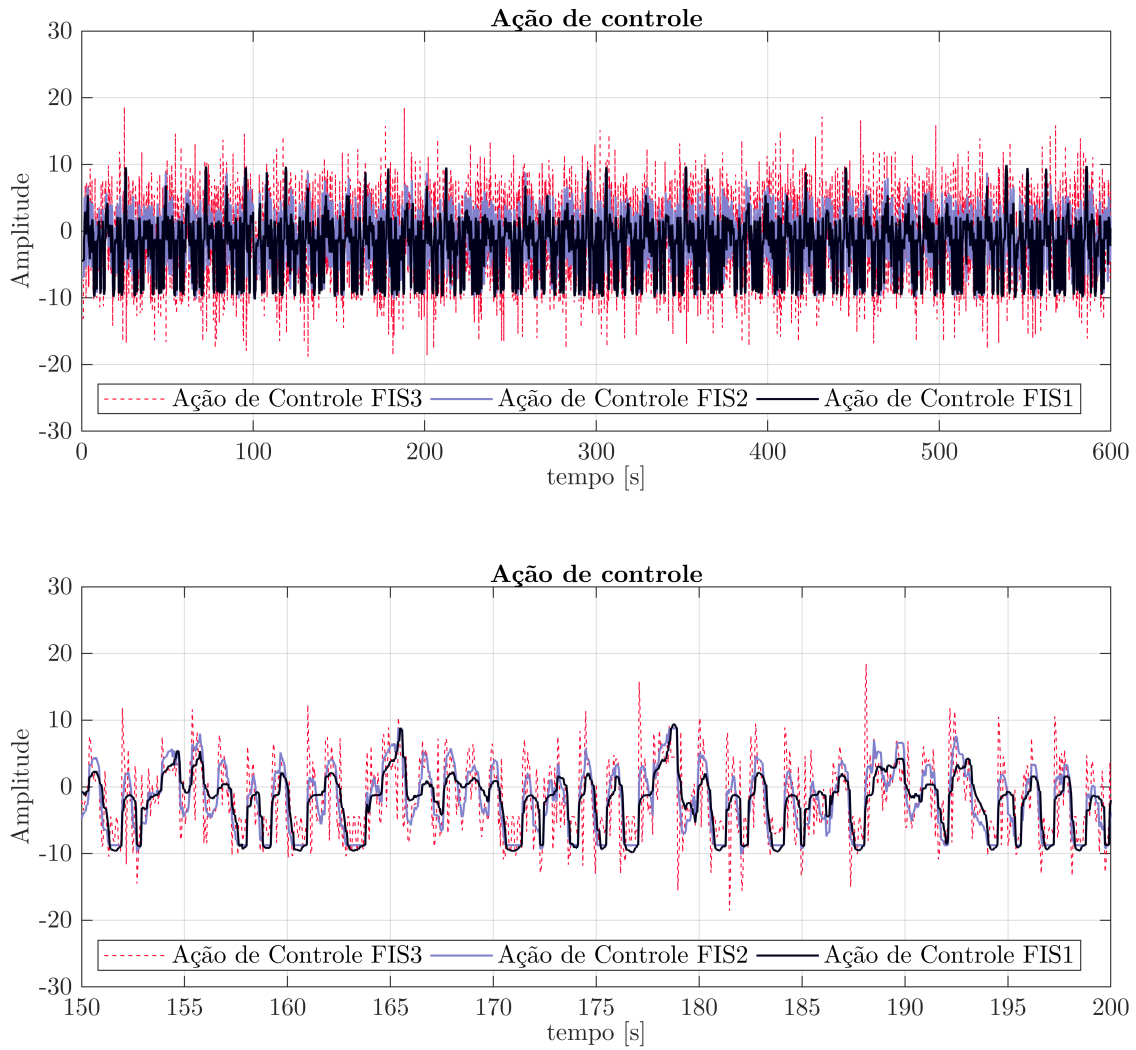


Figura 130 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 0 kg.

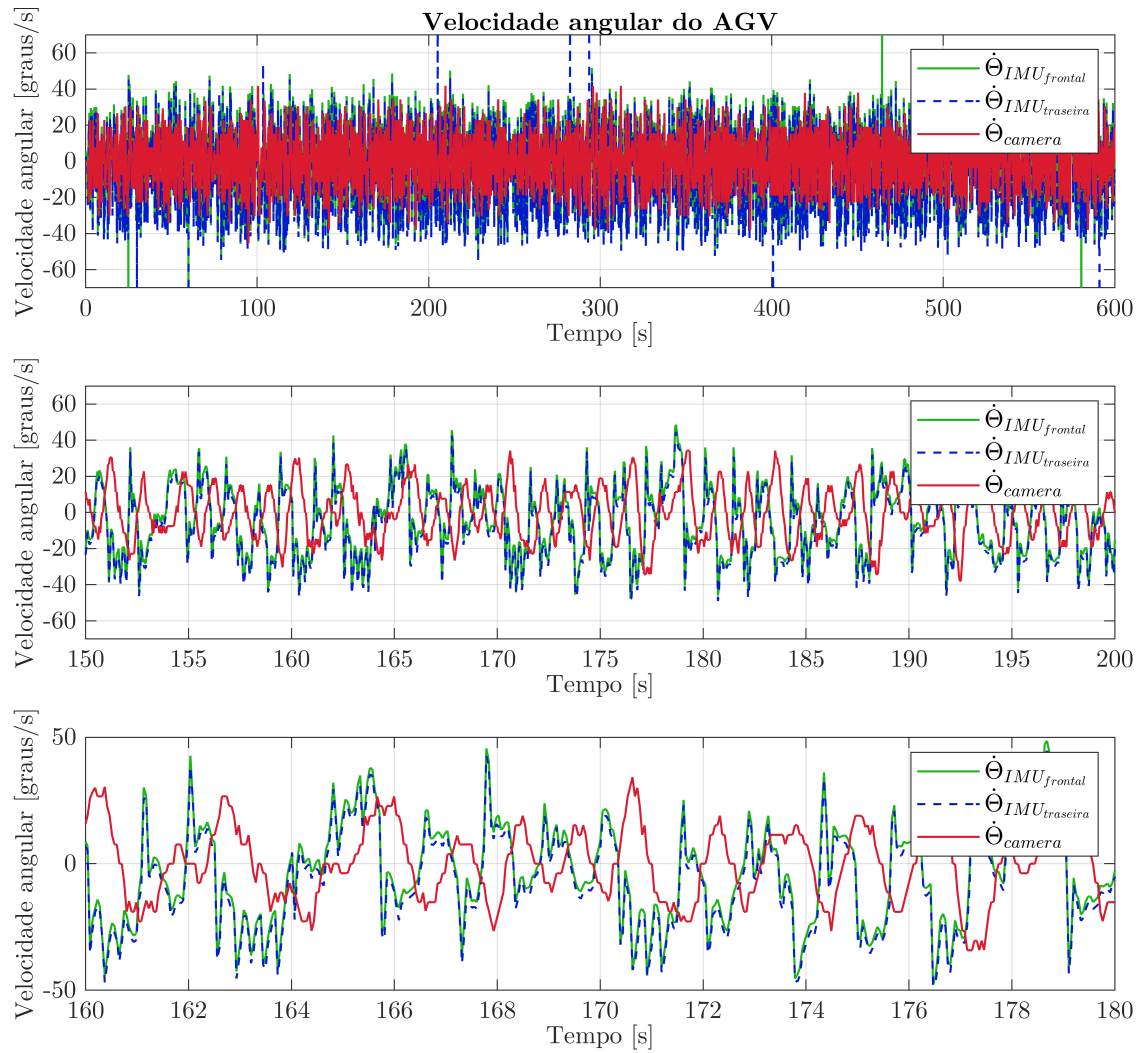


Figura 131 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 0 kg . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

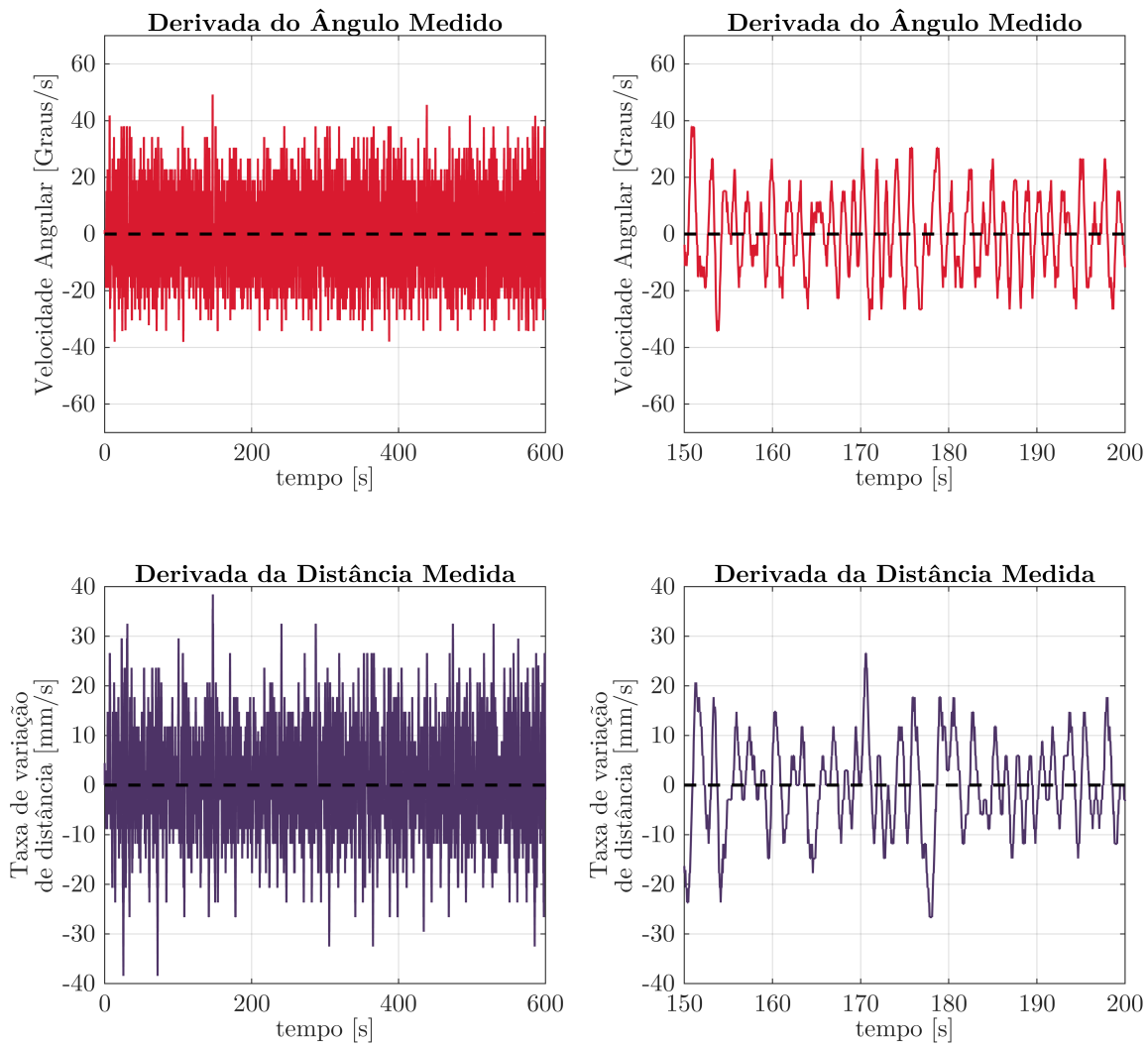


Figura 132 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 kg.

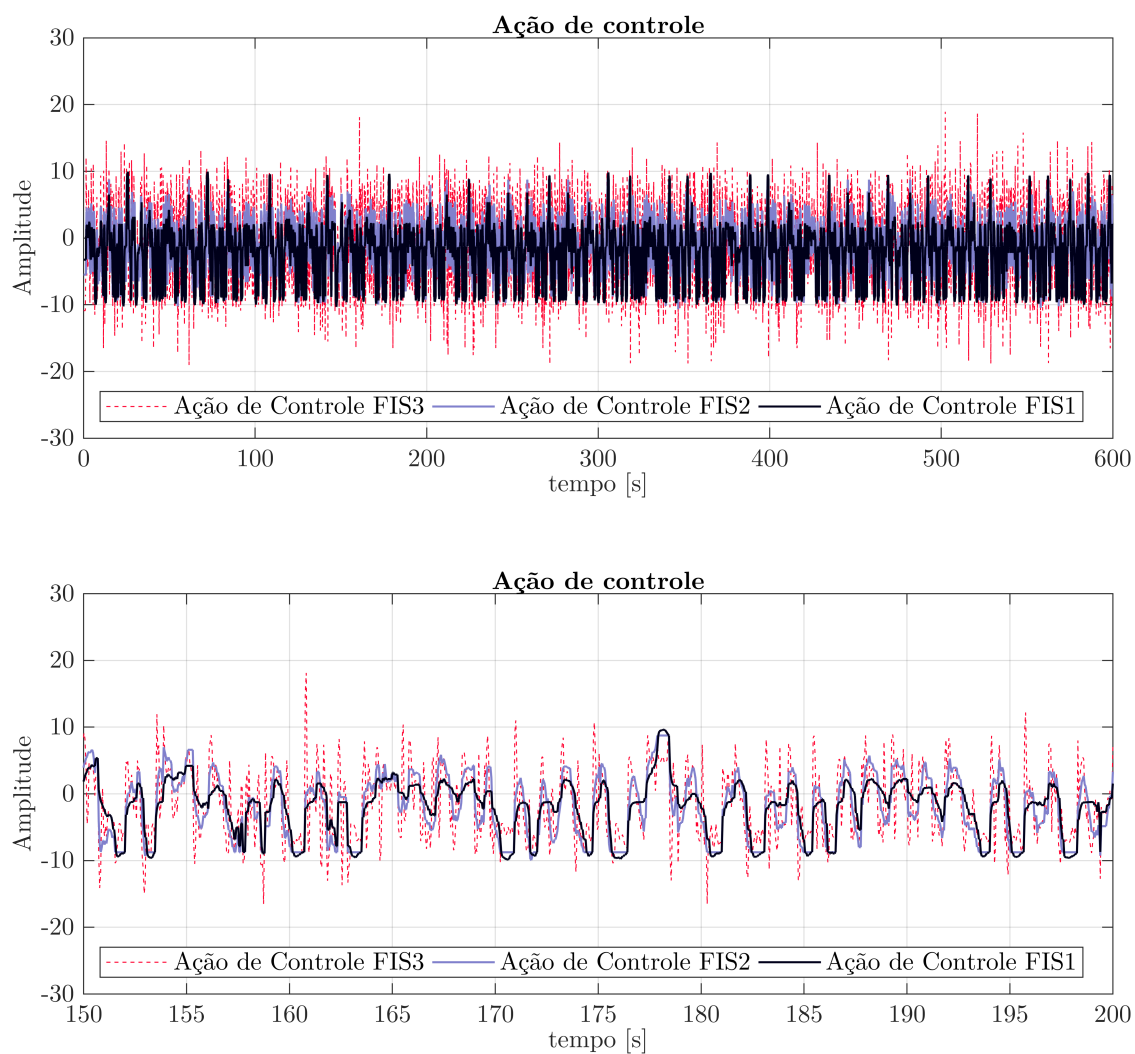


Figura 133 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 1 kg.

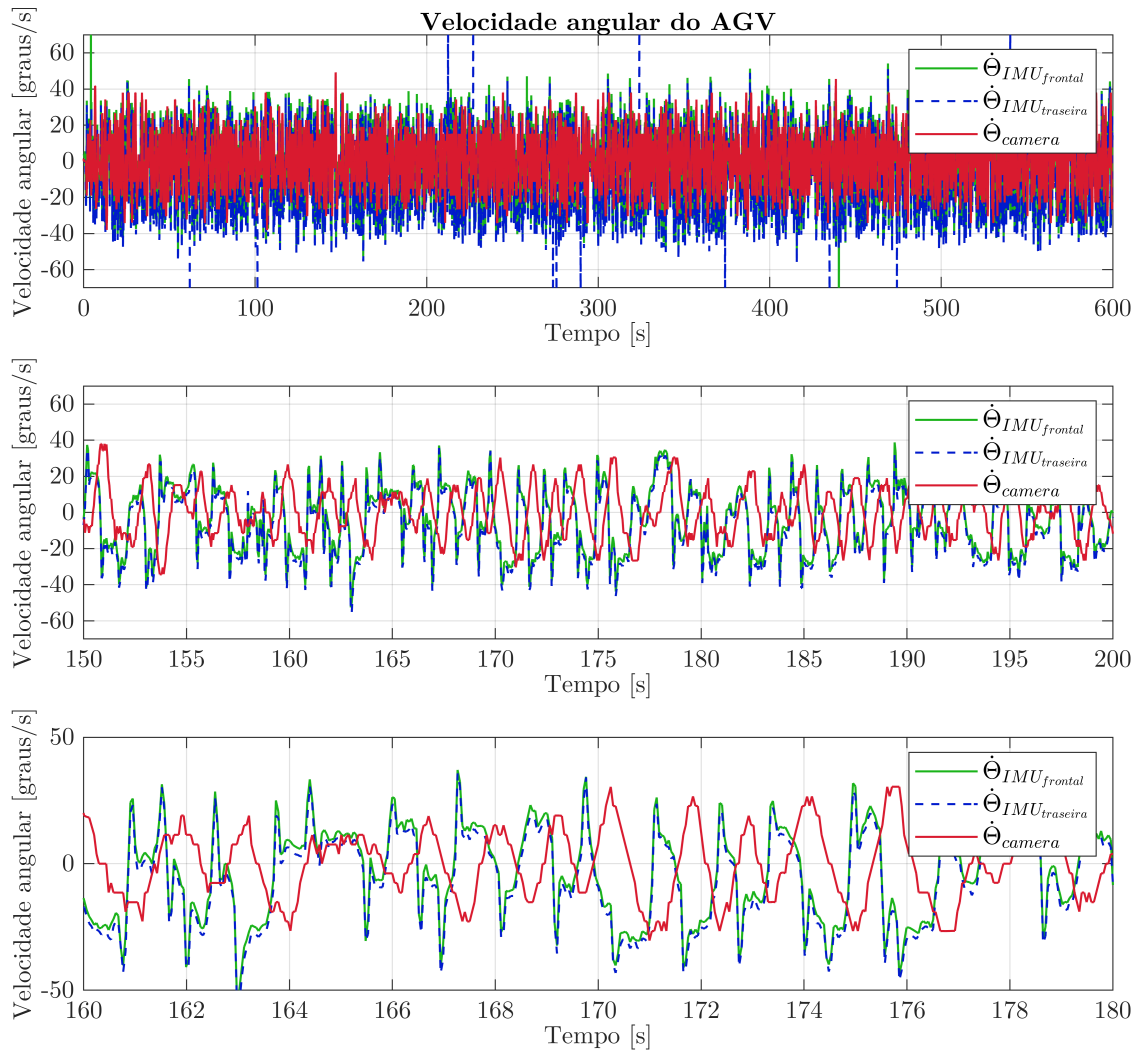


Figura 134 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 1 *kg*. As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

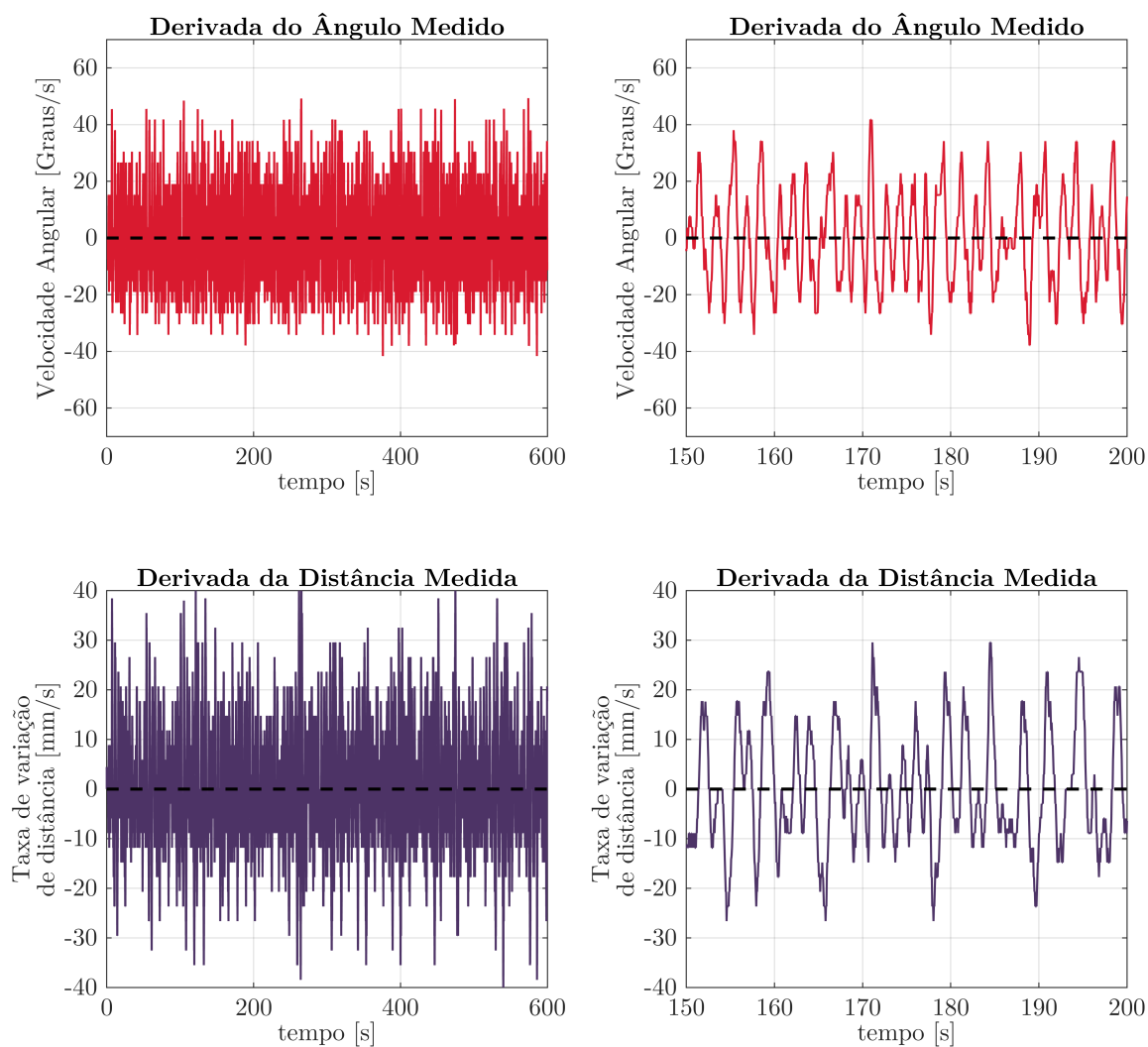


Figura 135 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 2 kg.

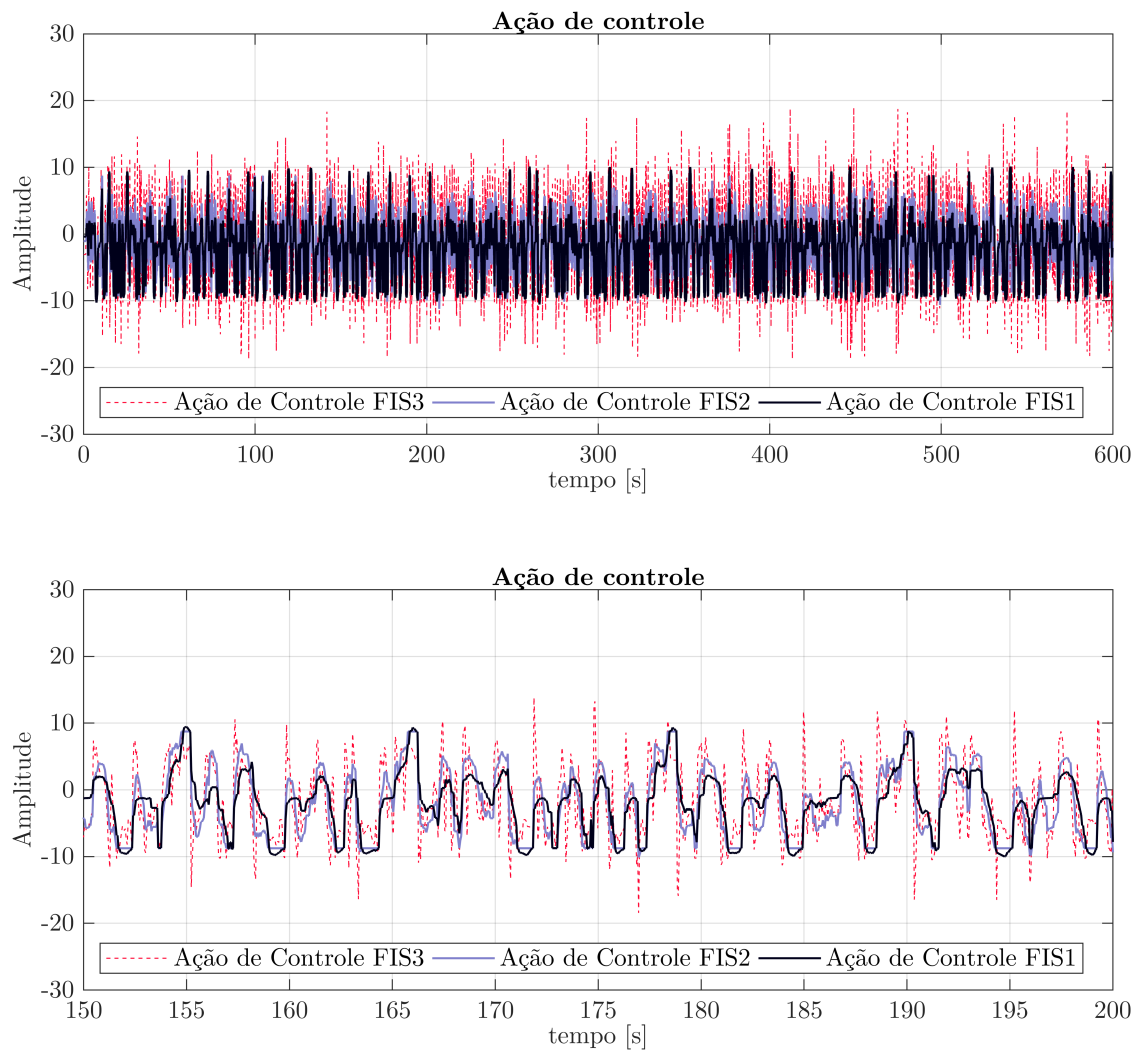


Figura 136 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 2 kg.

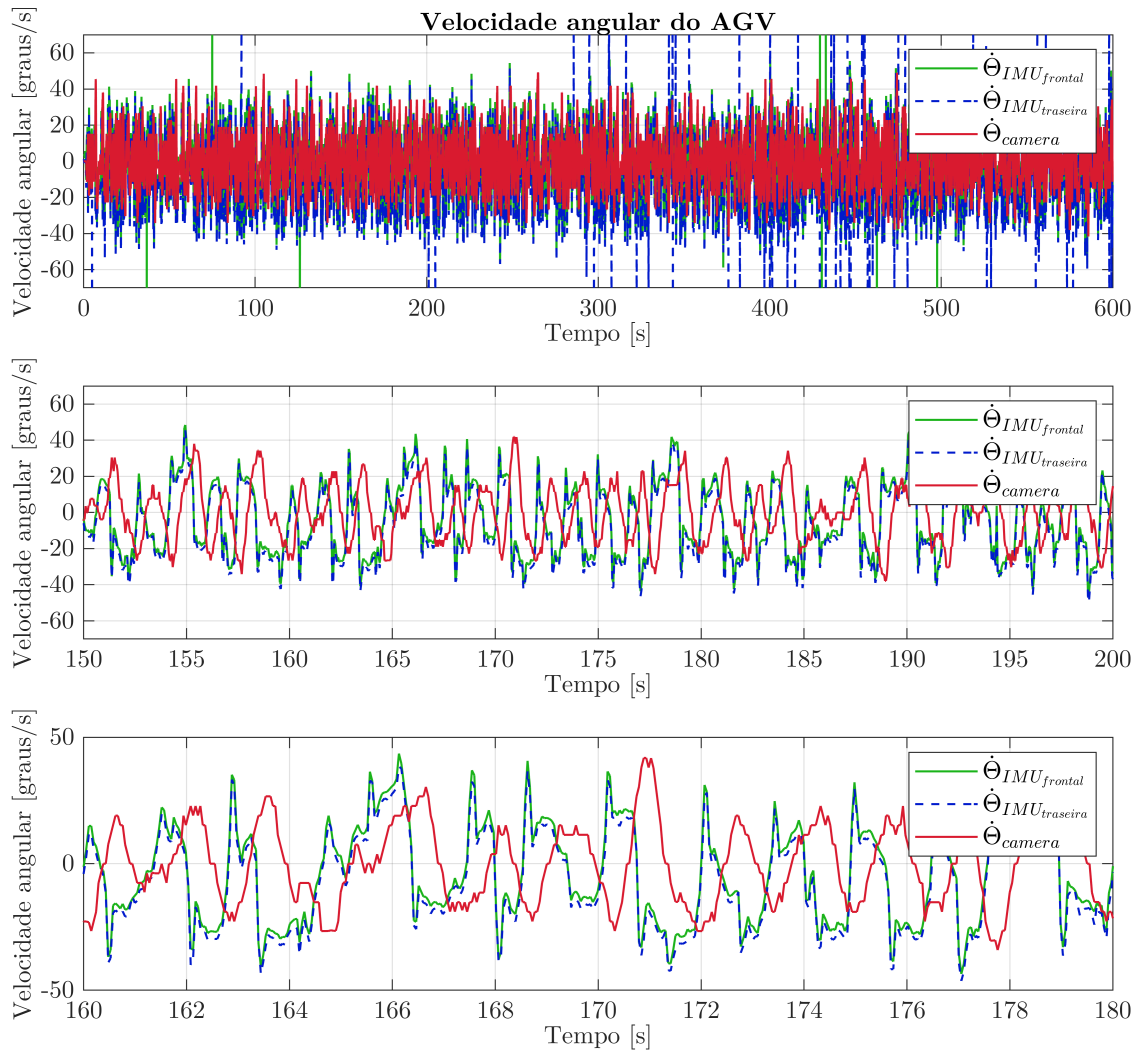


Figura 137 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 2 *kg*. As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

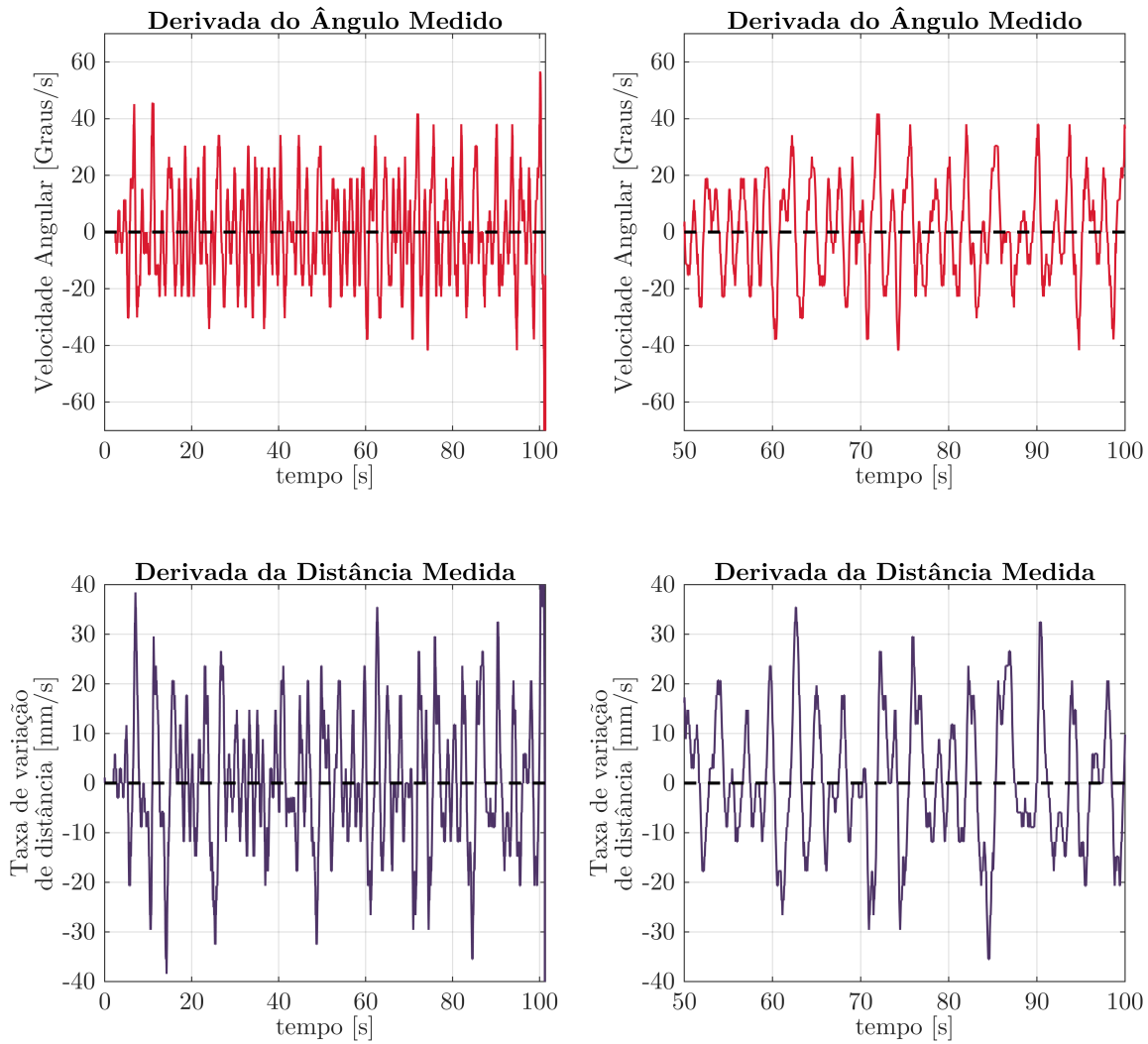


Figura 138 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 4 kg.

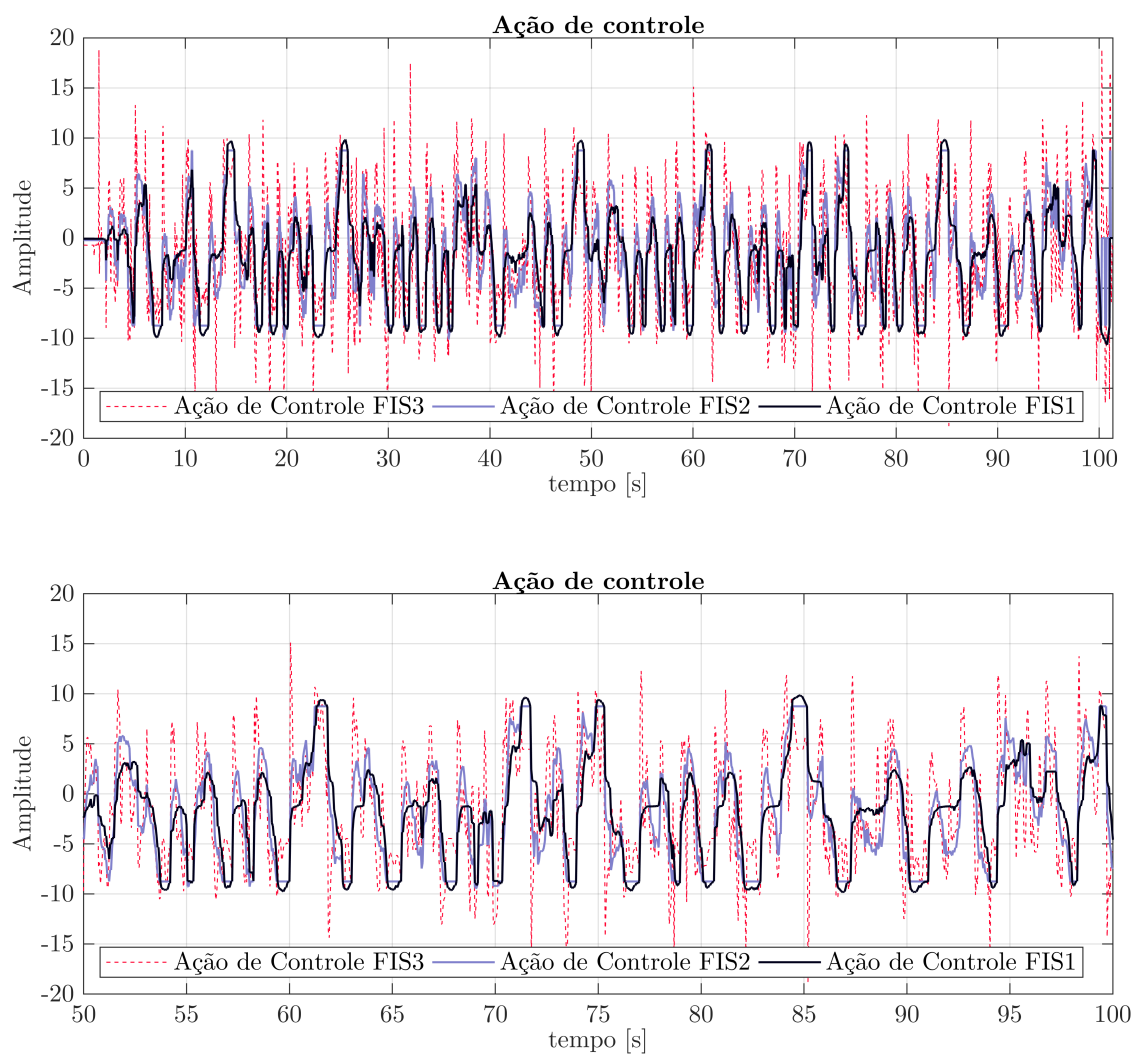


Figura 139 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 4 kg.

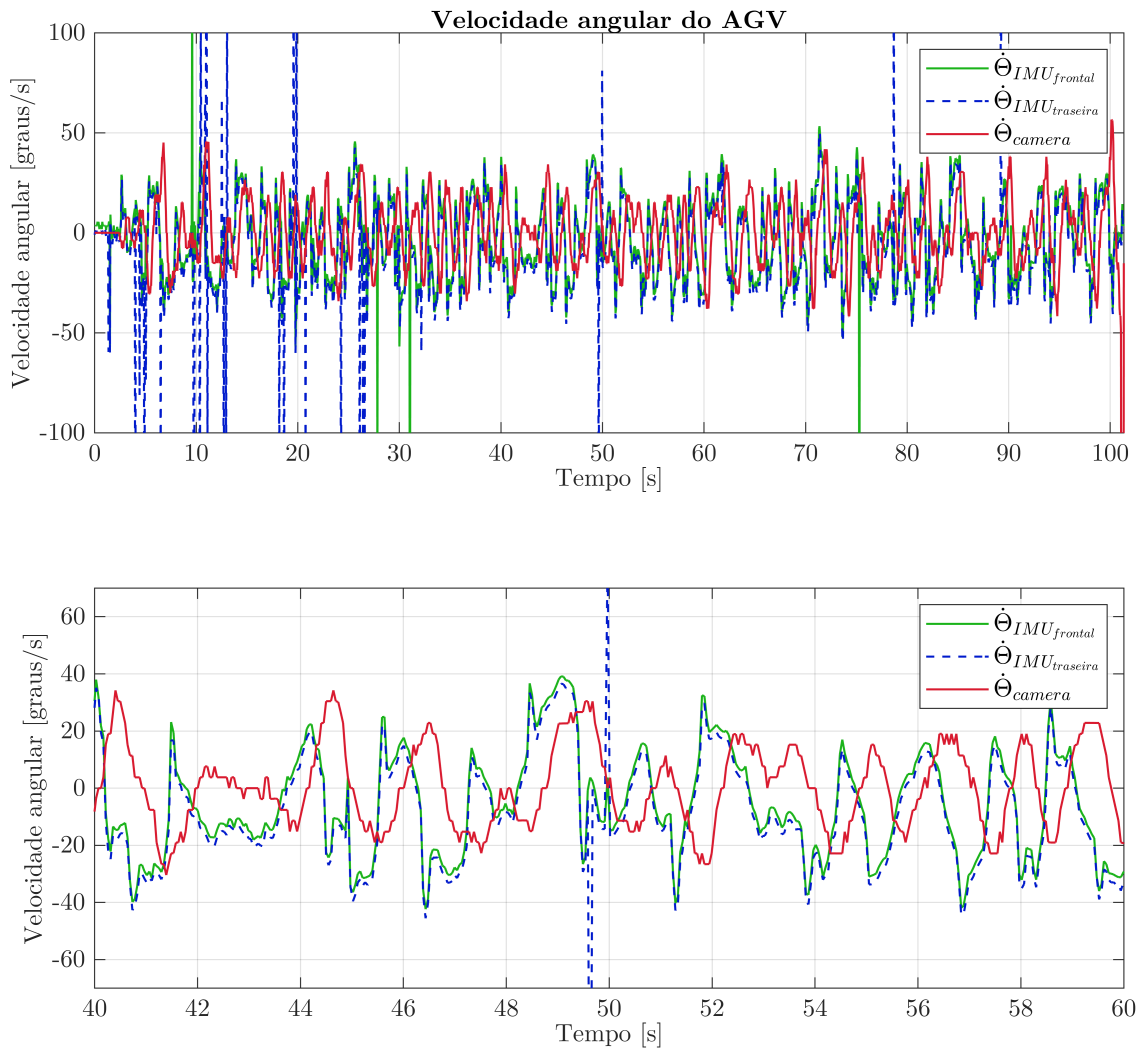


Figura 140 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 4 kg. As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

C.3 Fuzzy4

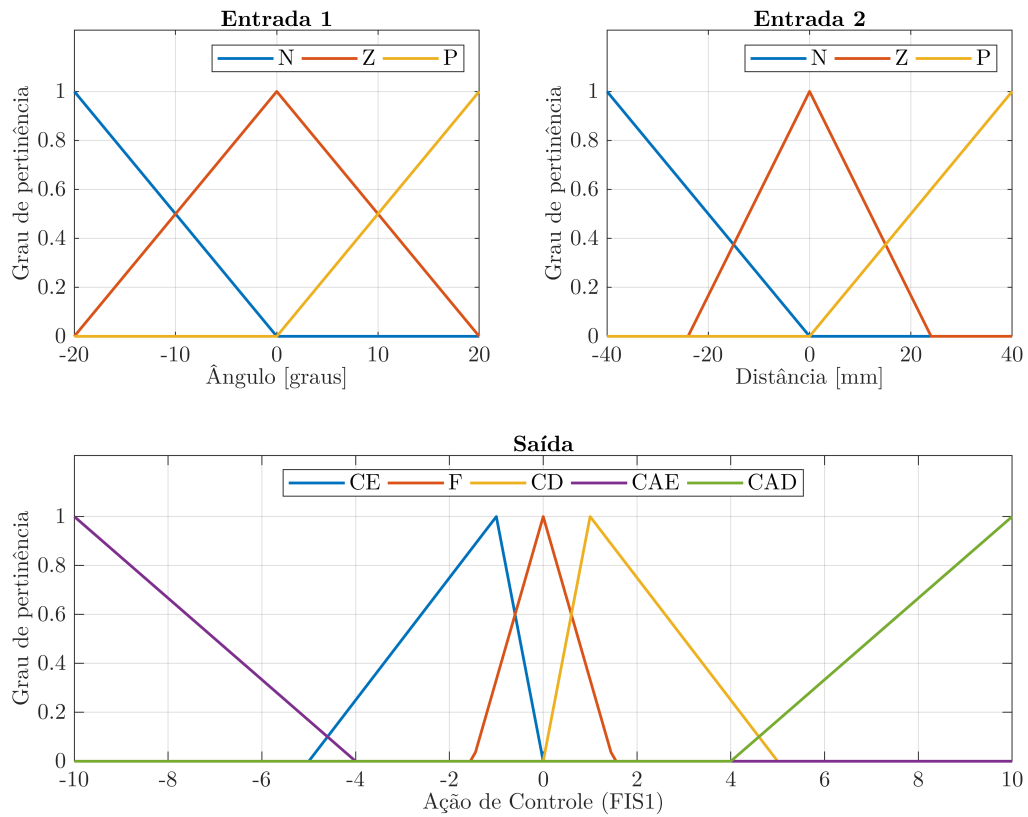


Figura 141 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 1 para o controlador Fuzzy4.

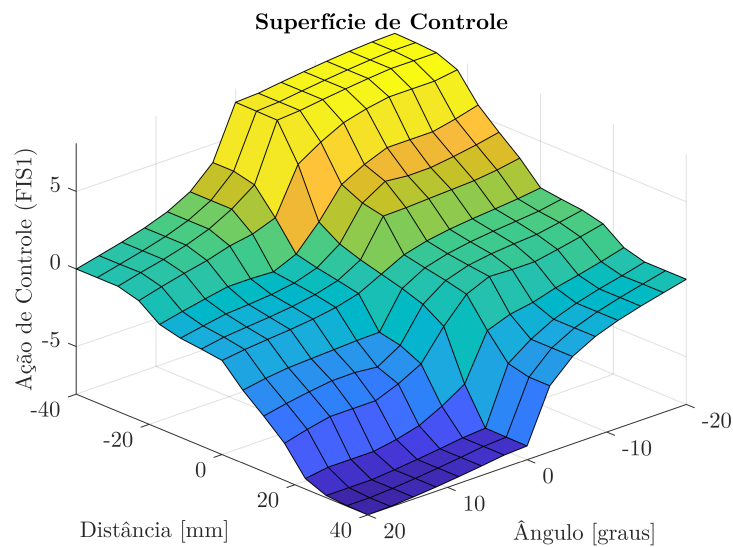


Figura 142 – Superfície de controle do sistema de inferência fuzzy 1 para o controlador Fuzzy.

Tabela 23 – Base de regras do sistema de inferência fuzzy 1 para o controlador Fuzzy4.

Regra	Antecedentes		Consequente	Peso
	Ângulo	Distância	Saída de Controle	
1	N	N	CAD	1
2	N	Z	CD	0,25
3	N	P	F	1
4	Z	N	CAD	0,05
5	Z	Z	F	1
6	Z	P	CAE	0,05
7	P	N	F	,
8	P	Z	CE	0,25
9	P	P	CAE	1

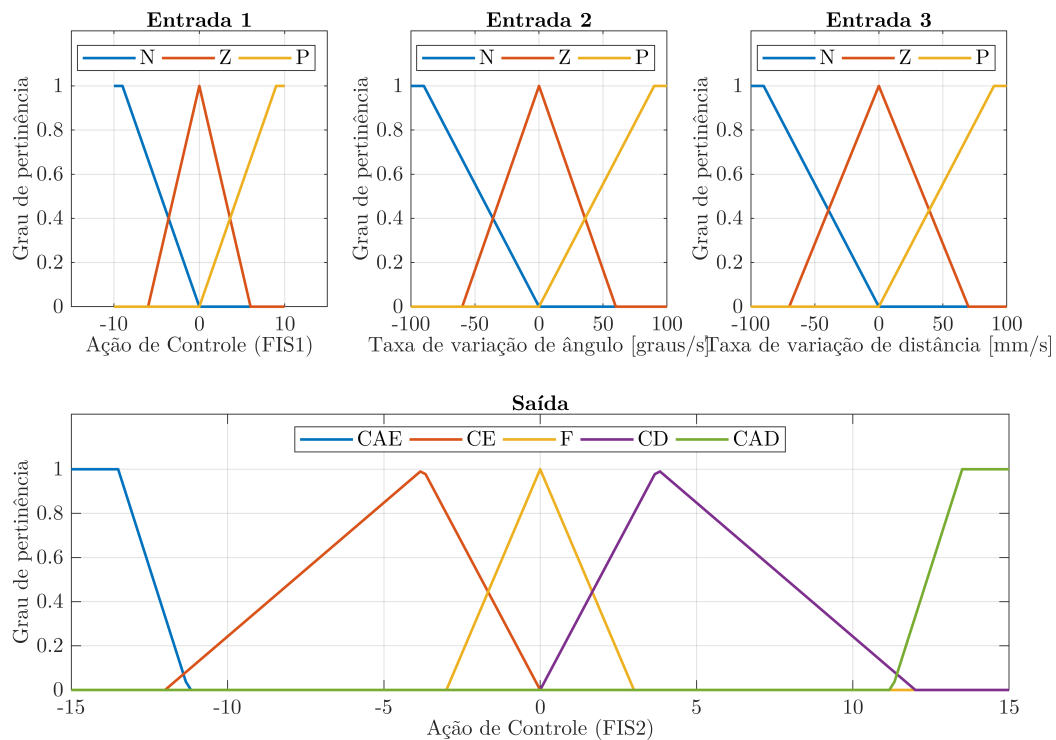


Figura 143 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 2 para o controlador Fuzzy4.

Regra	Ação de controle FIS1	Antecedentes		Consequente	
		Taxa de variação de ângulo	Taxa de variação de distância	Saída de Controle	Peso
1	N	Z	N	CAE	1
2	N	Z	Z	CAE	1
3	N	P	N	CAE	1
4	N	P	Z	CAE	1
5	Z	N	N	F	1
6	Z	N	Z	CD	1
7	Z	N	P	CD	1
8	Z	Z	N	F	1
9	Z	Z	Z	F	1
10	Z	Z	P	F	1
11	Z	P	N	CE	1
12	Z	P	Z	CE	1
13	Z	P	P	F	1
14	P	N	Z	CAD	1
15	P	N	P	CAD	1
16	P	Z	Z	CAD	1
17	P	Z	P	CAD	1

Tabela 24 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 2 para o controlador Fuzzy4.

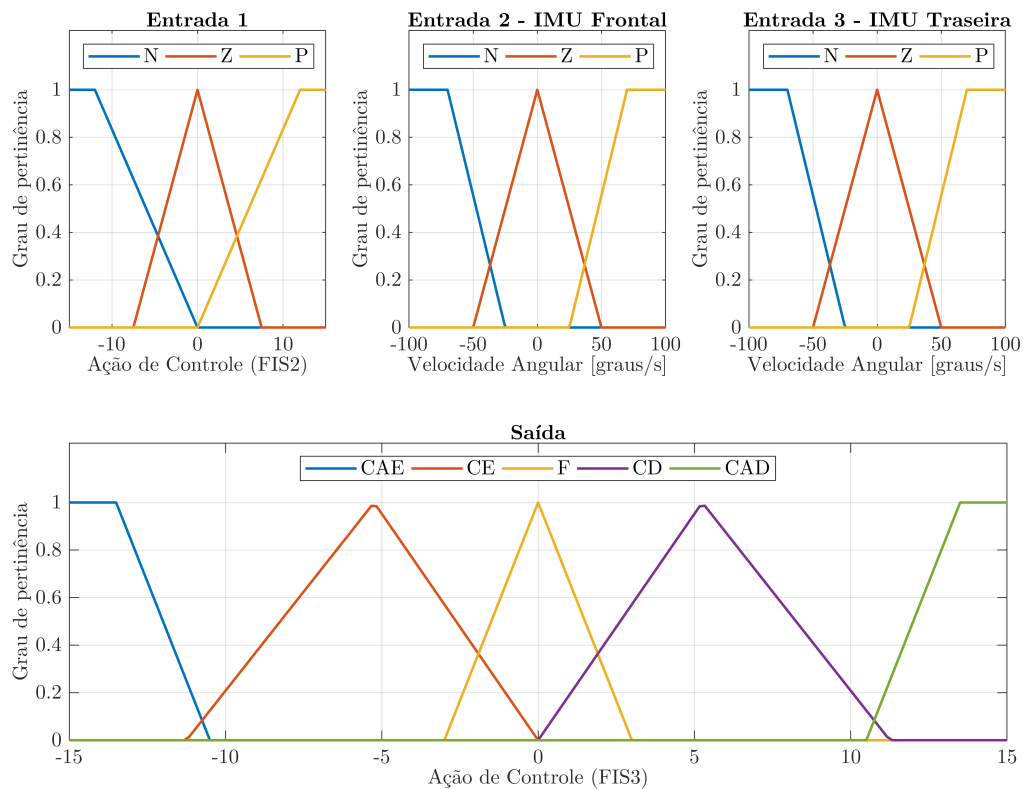


Figura 144 – Funções de pertinência de entrada e saída do sistema de inferência fuzzy 3 para o controlador Fuzzy4.

Regra	Ação de controle FIS2	Antecedentes		Consequente	
		Velocidade angular $\dot{\theta}_{IMU_{frontal}}$	Velocidade angular $\dot{\theta}_{IMU_{traseira}}$	Saída de Controle	Peso
1	N	N	N	CAE	1
2	N	Z	Z	CE	1
3	N	P	P	CE	1
4	Z	N	N	CAE	1
5	Z	Z	Z	F	1
6	Z	P	P	CAD	1
7	P	N	N	CD	1
8	P	Z	Z	CD	1
9	P	P	P	CAD	1

Tabela 25 – Base de regra do sistema de inferência fuzzy 3.

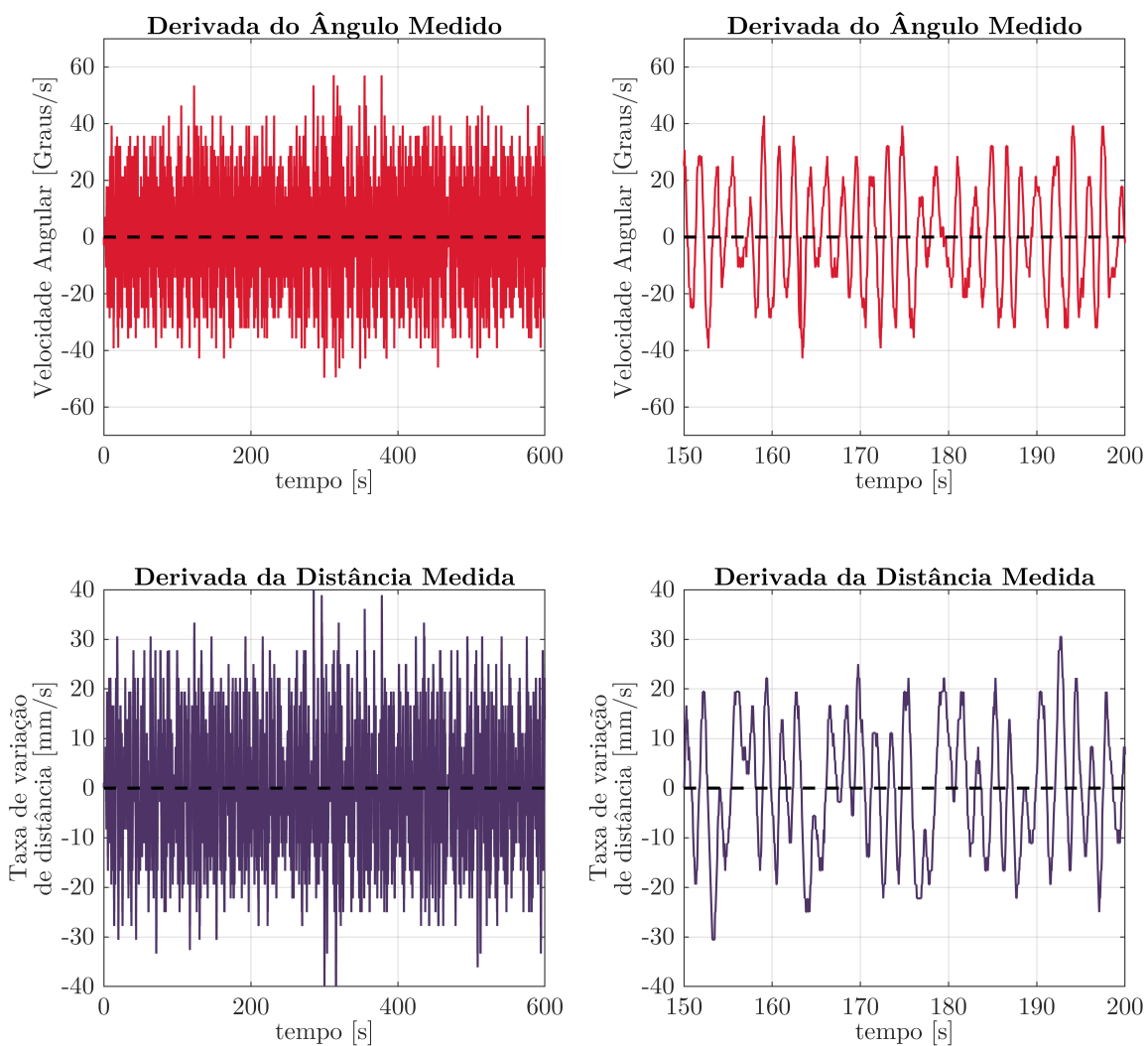


Figura 145 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 0 kg.

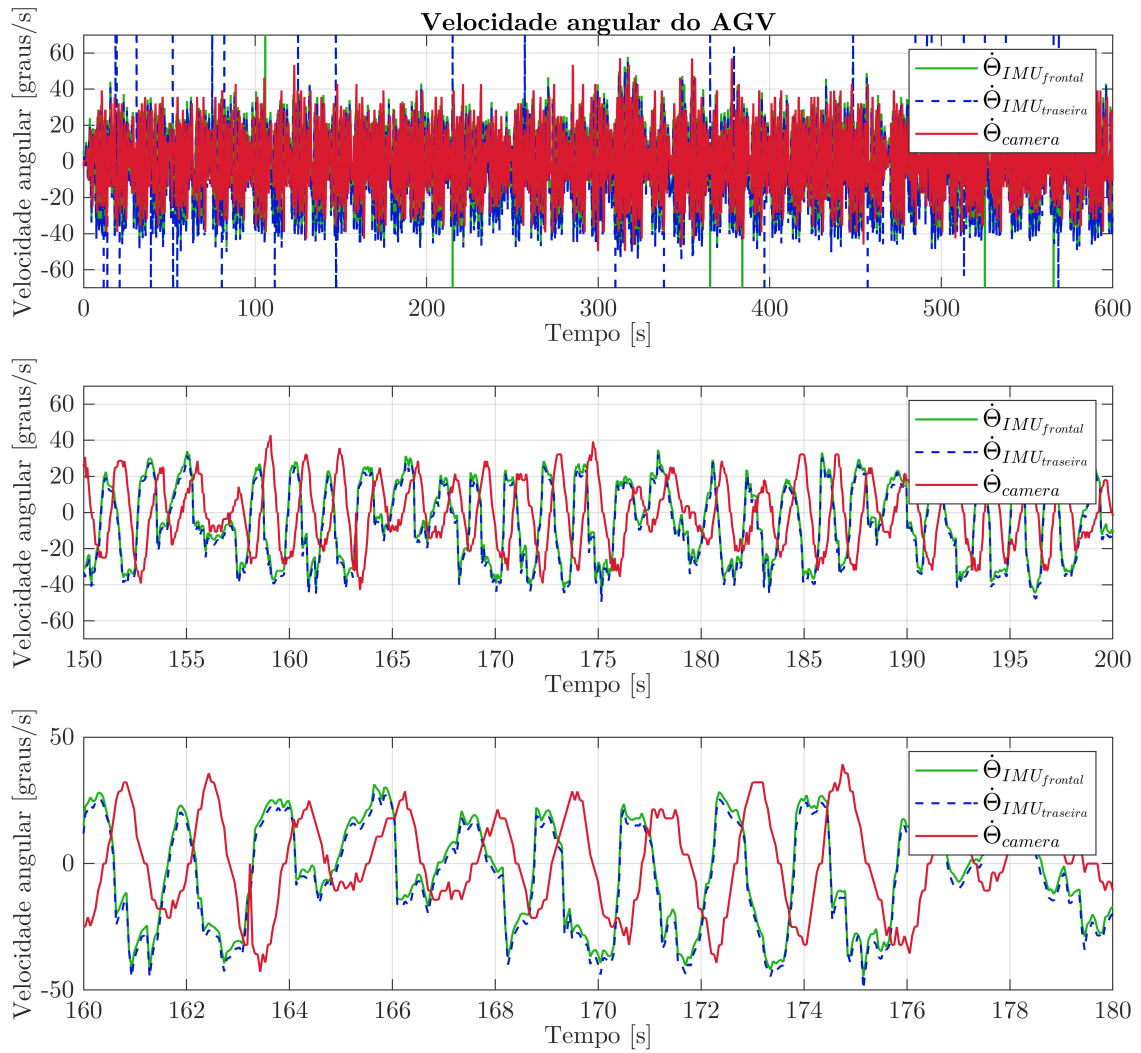


Figura 146 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 0 kg . As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

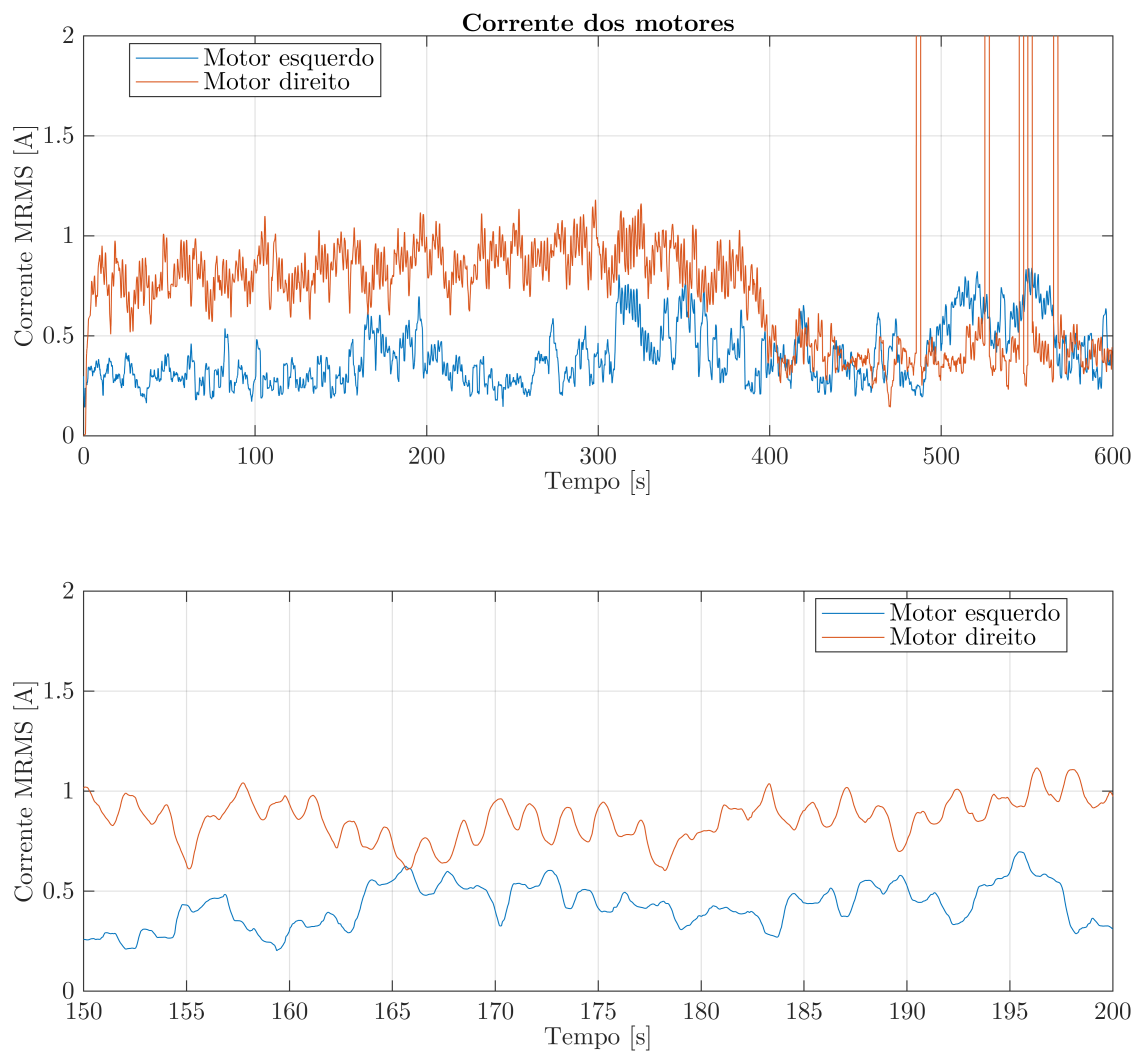


Figura 147 – Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 0 kg.

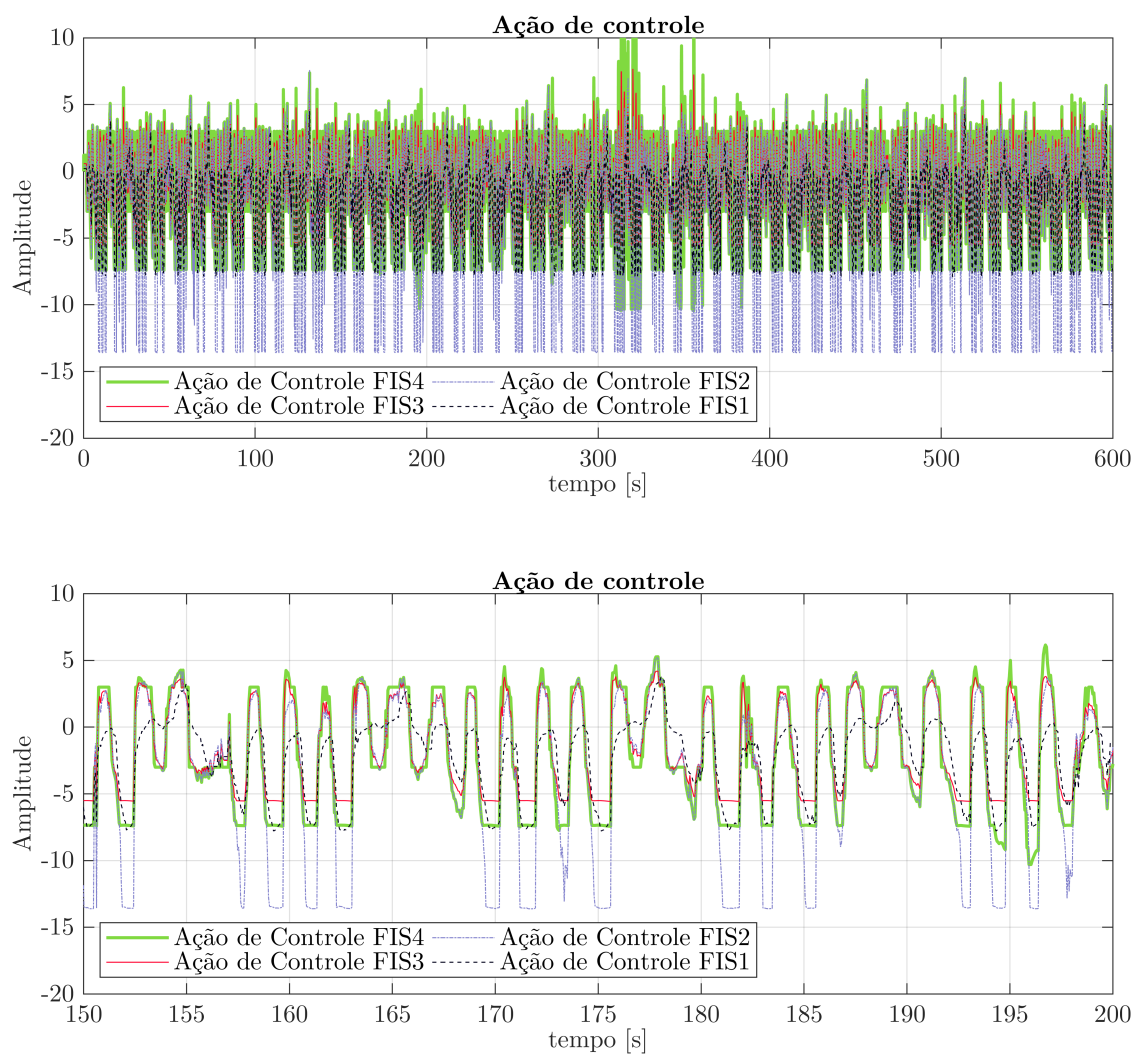


Figura 148 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 0 kg.

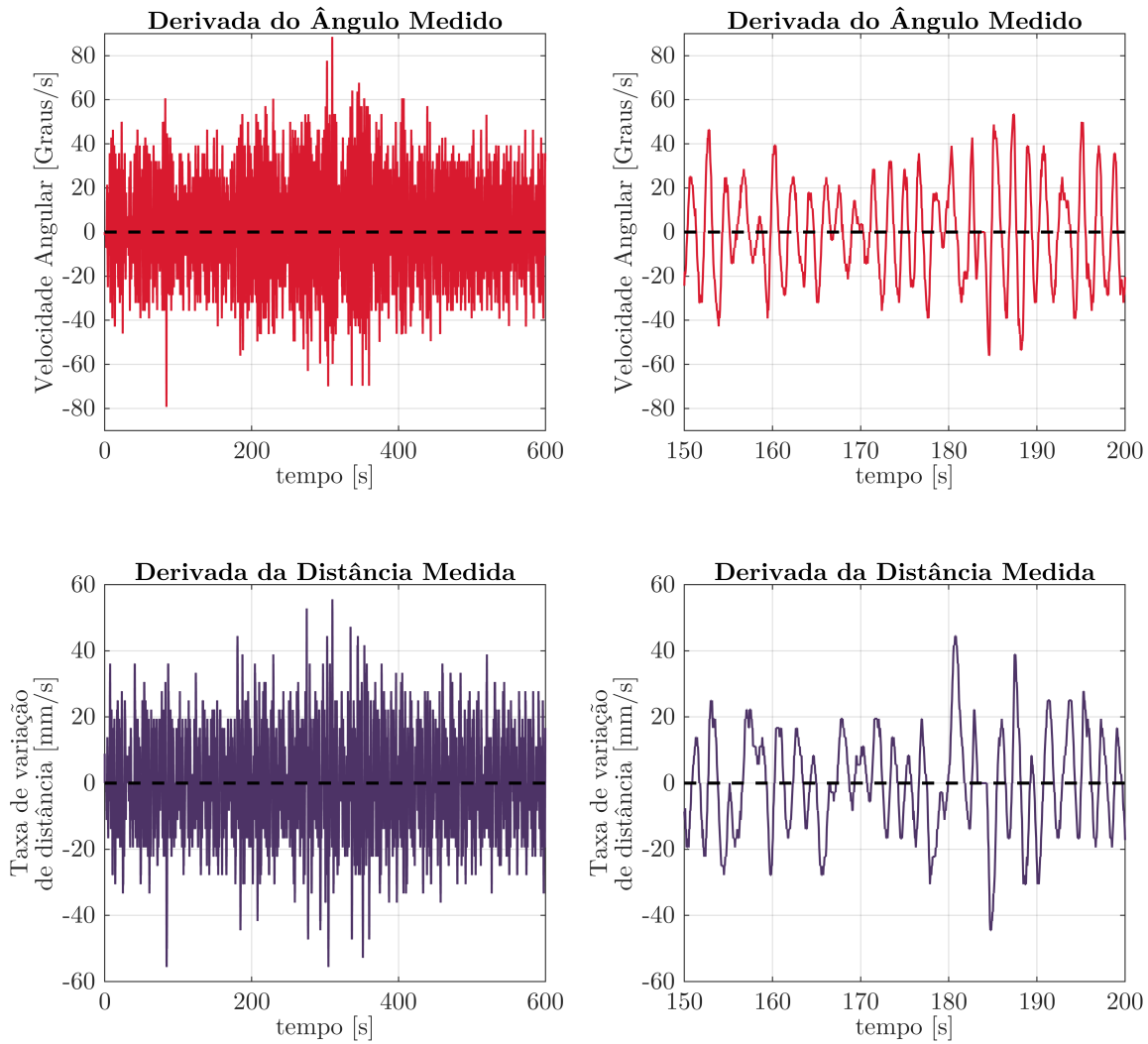


Figura 149 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 1 kg.

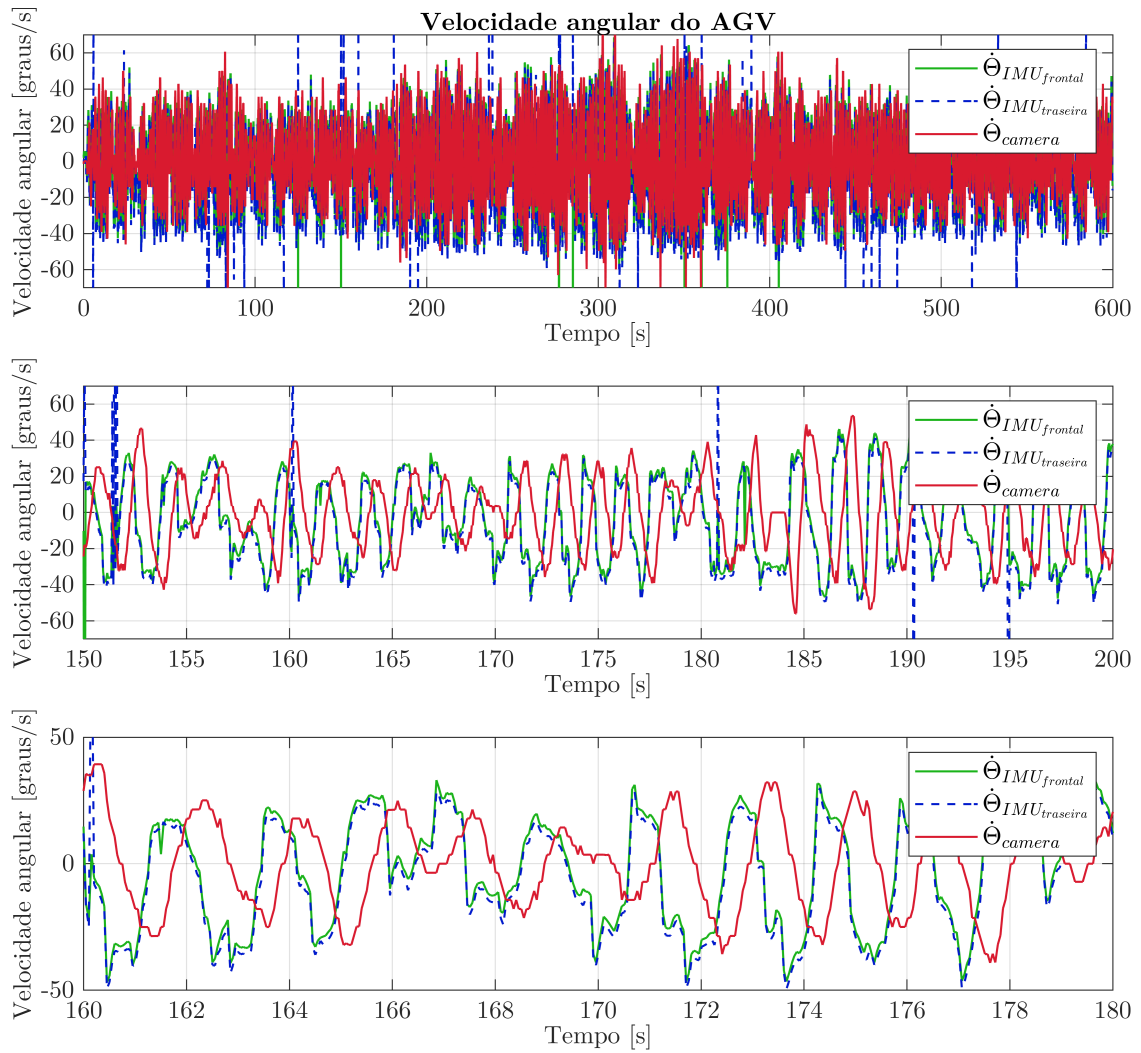


Figura 150 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 1 *kg*. As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

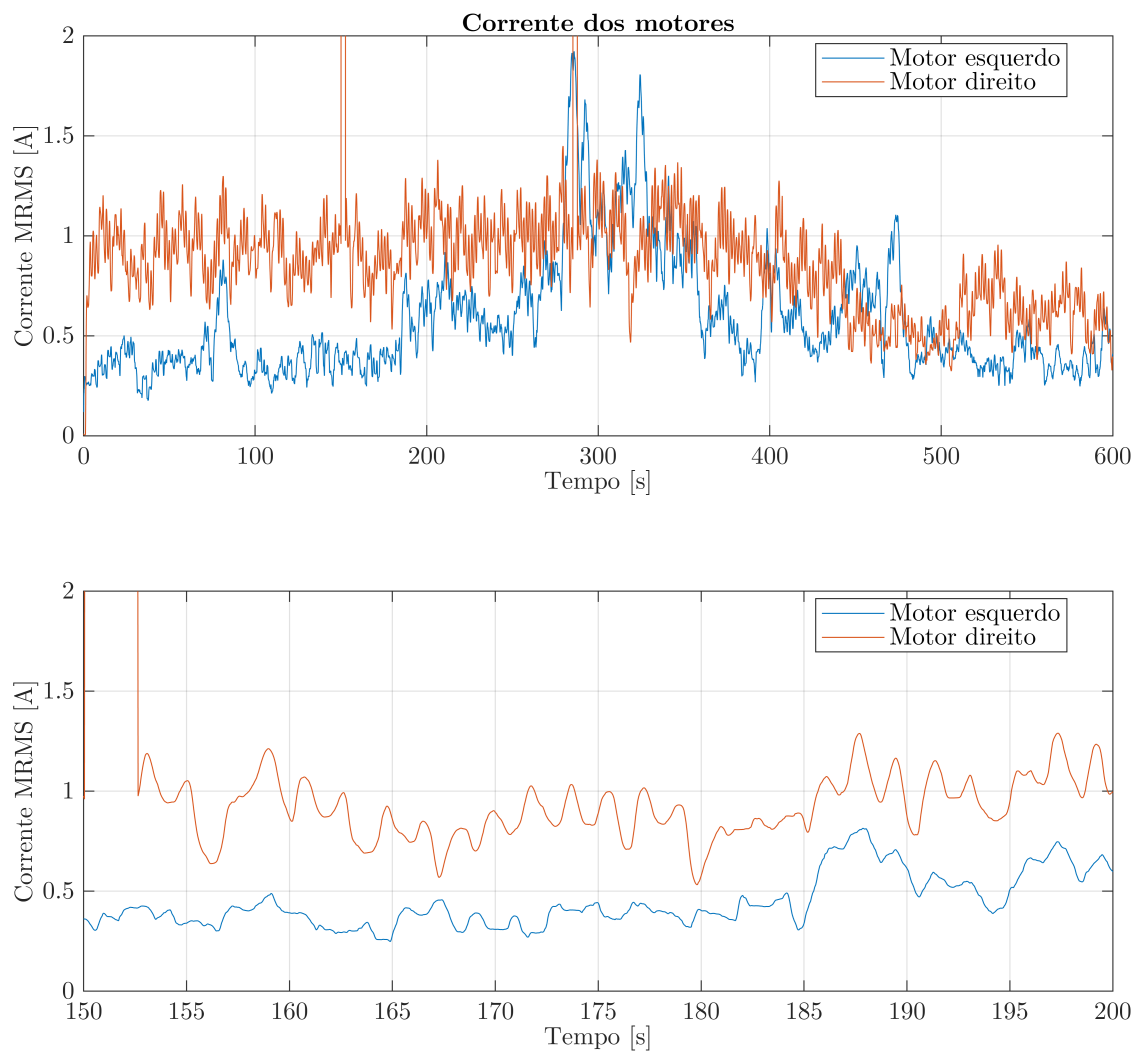


Figura 151 – Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 1 kg.

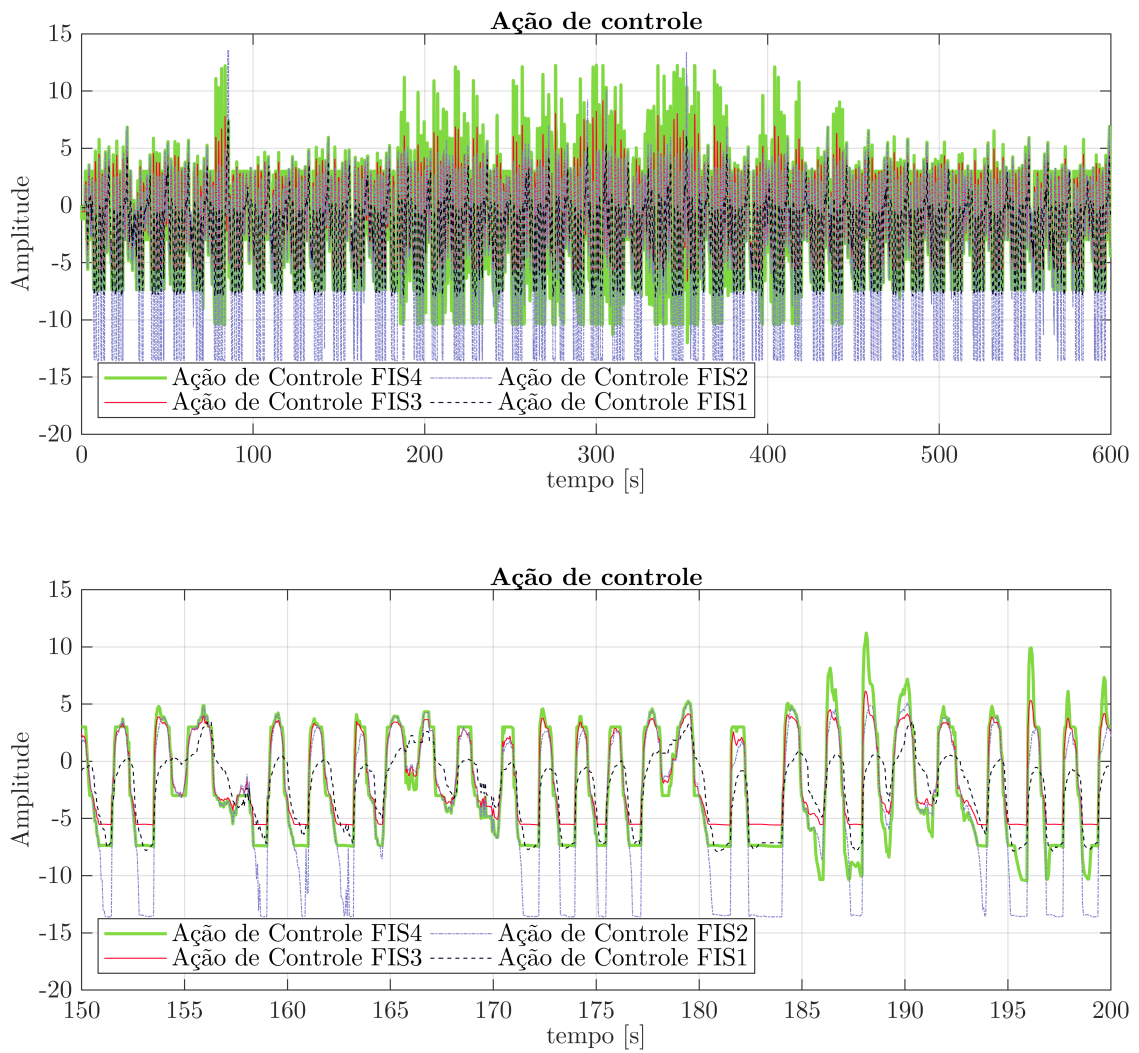


Figura 152 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 1 kg.

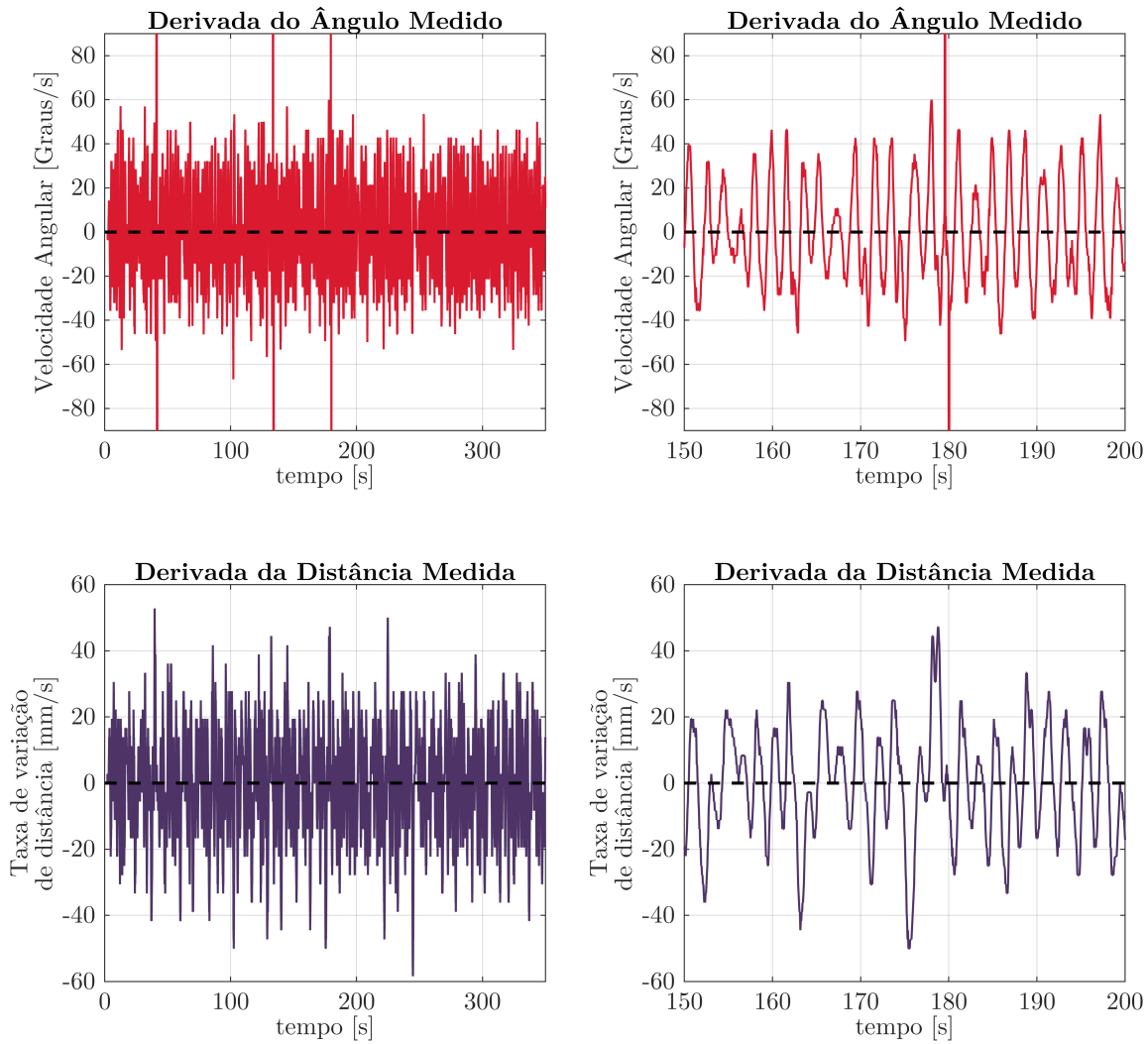


Figura 153 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 2 kg.

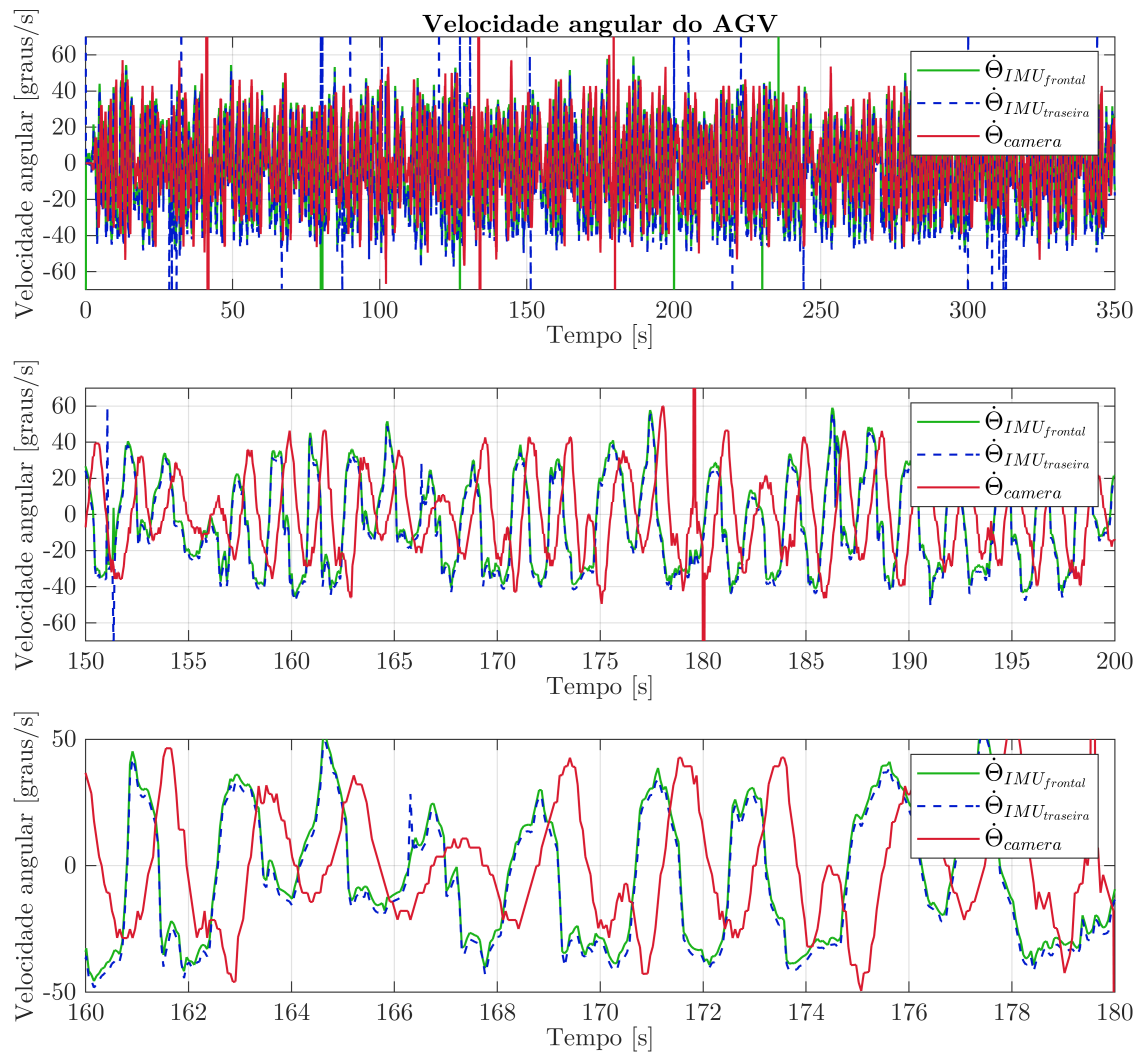


Figura 154 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 2 *kg*. As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

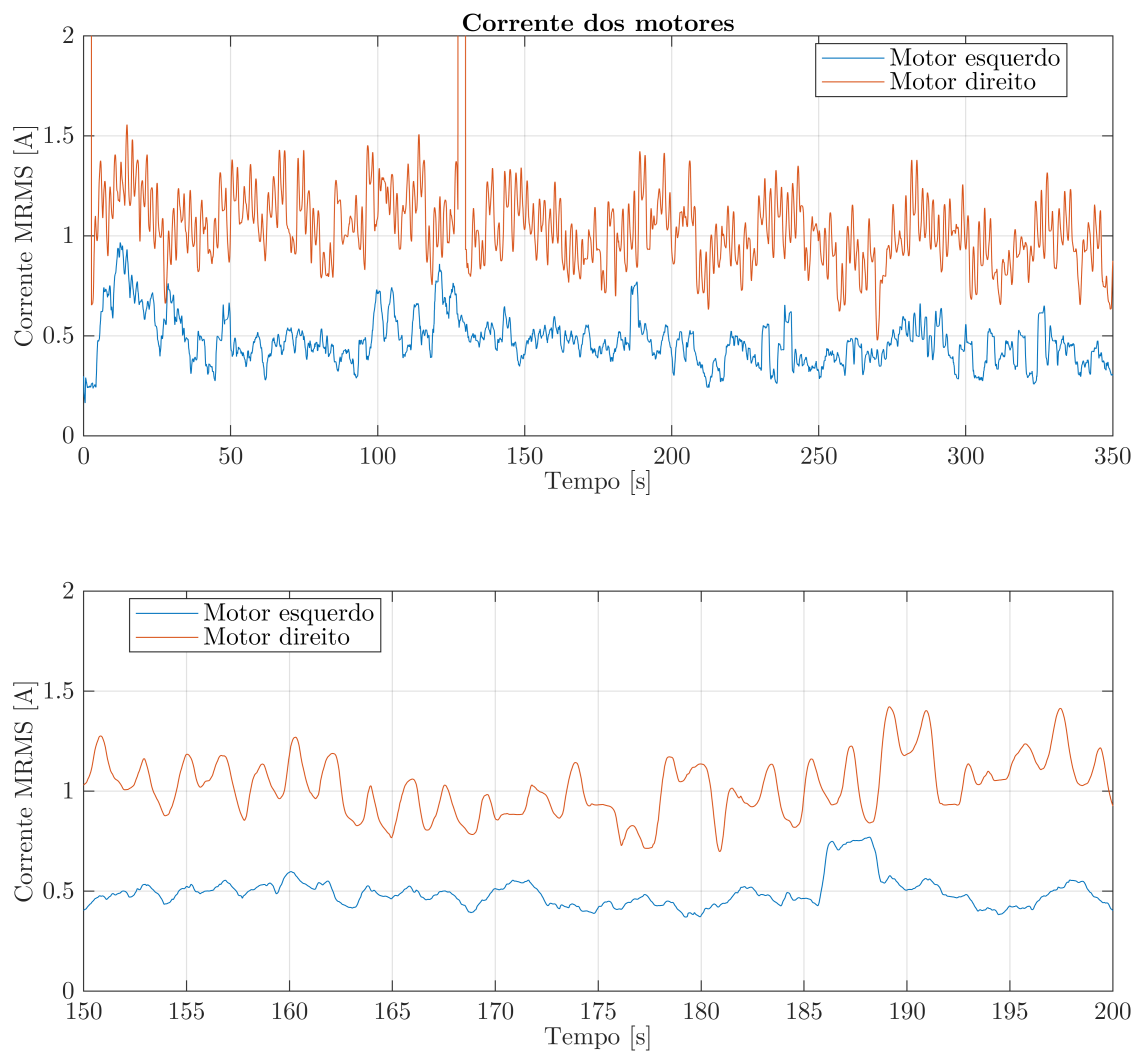


Figura 155 – Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 2 kg.

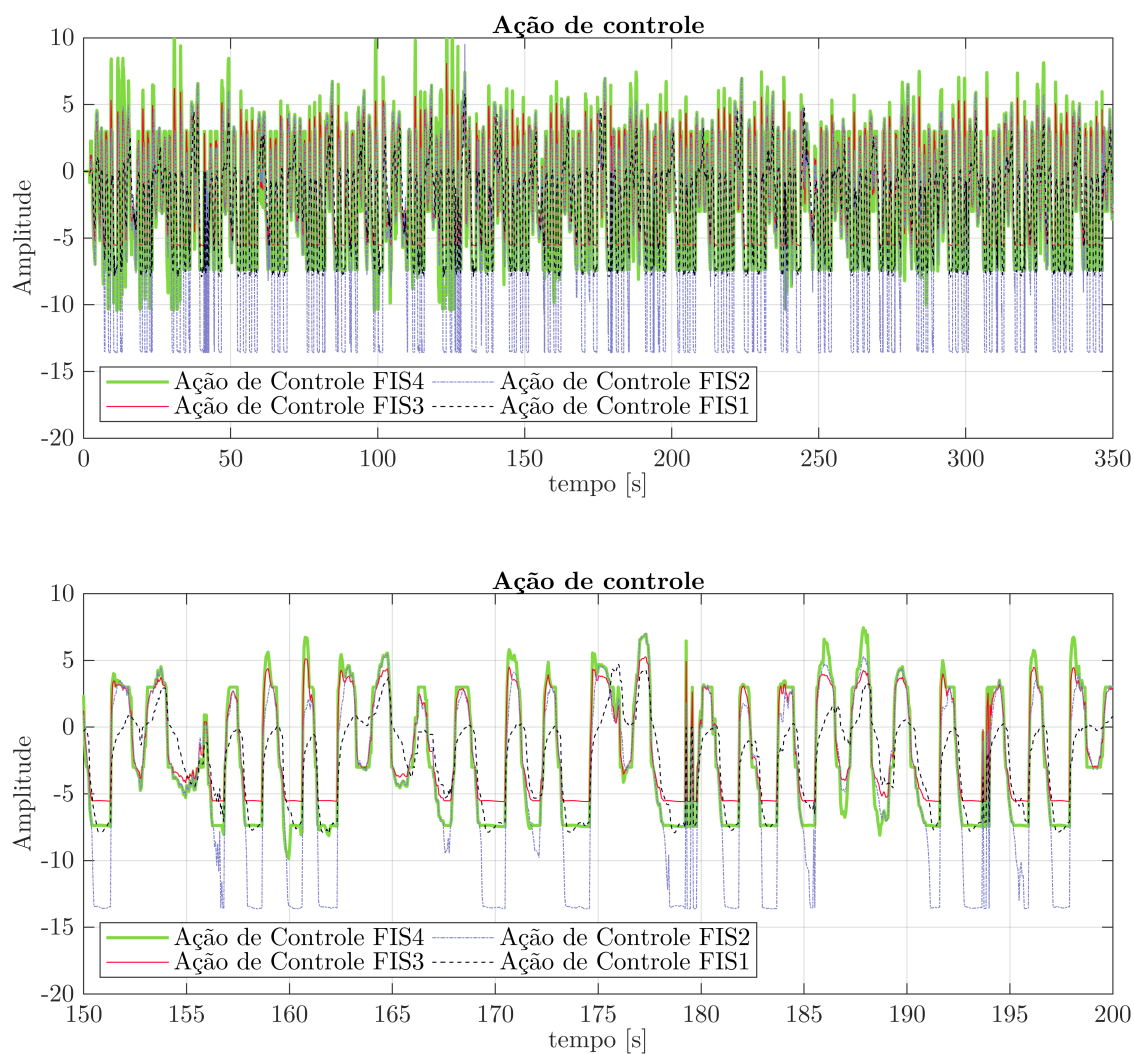


Figura 156 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 2 kg.

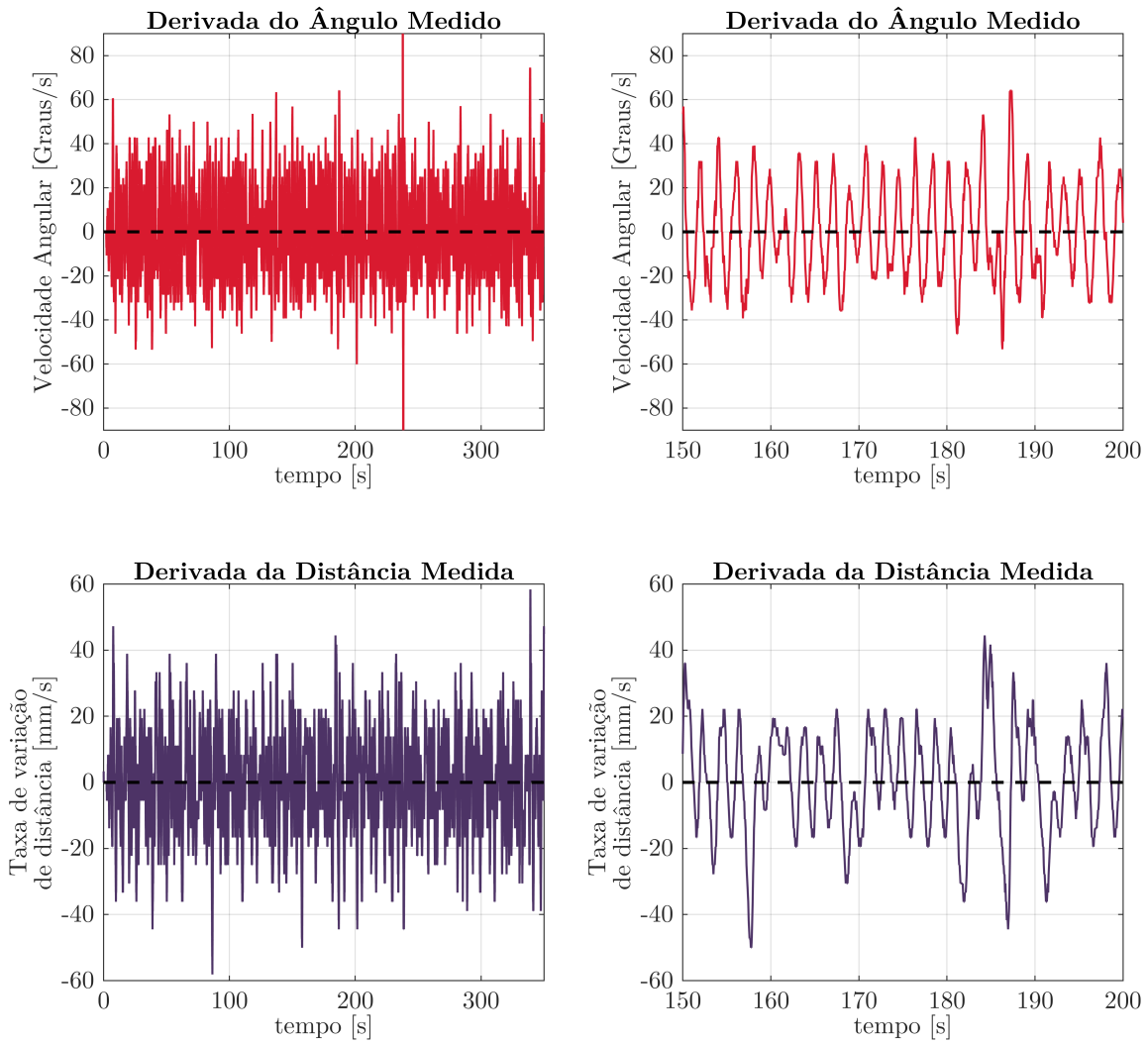


Figura 157 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 3 kg.

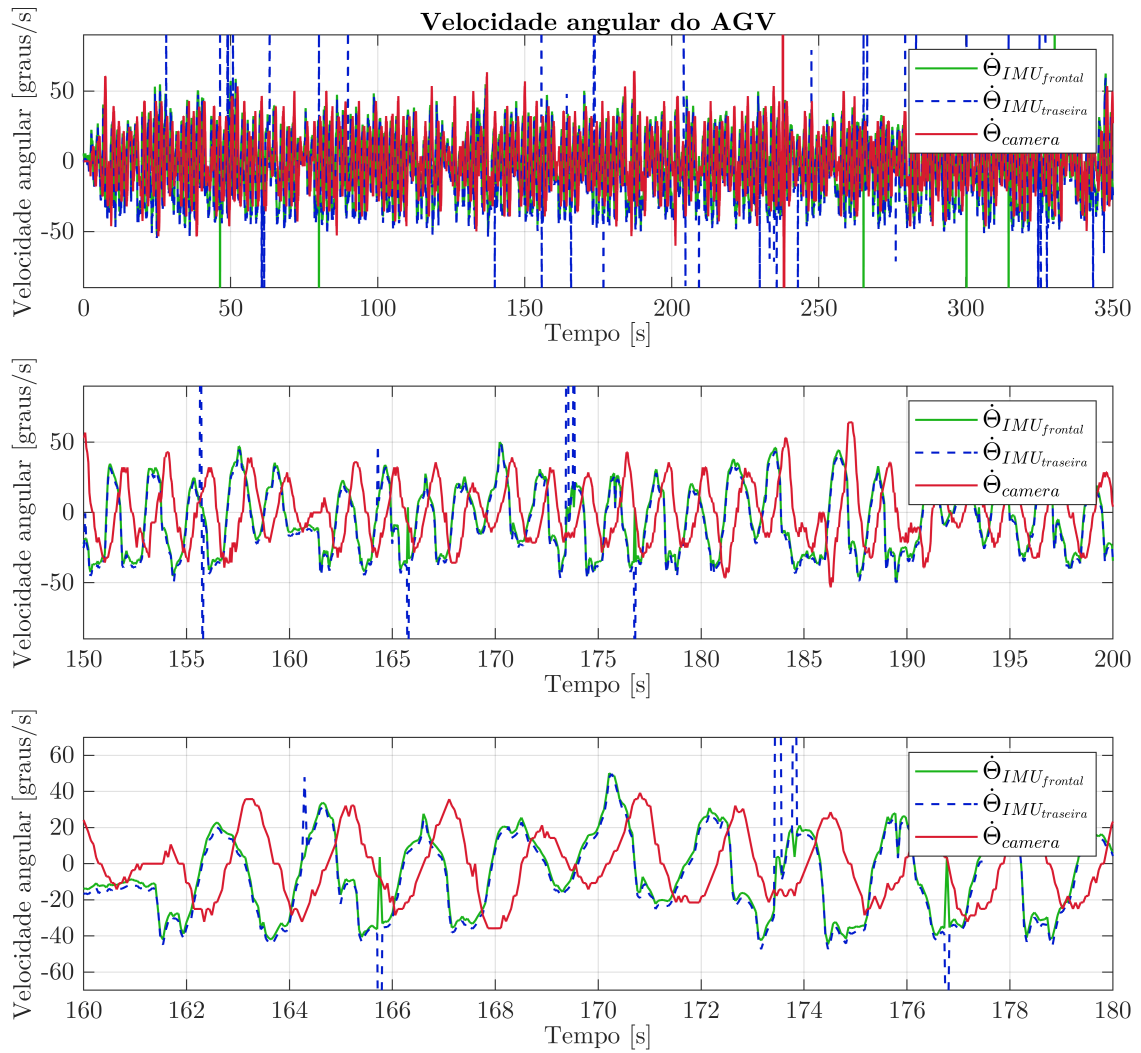


Figura 158 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 3 kg. As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

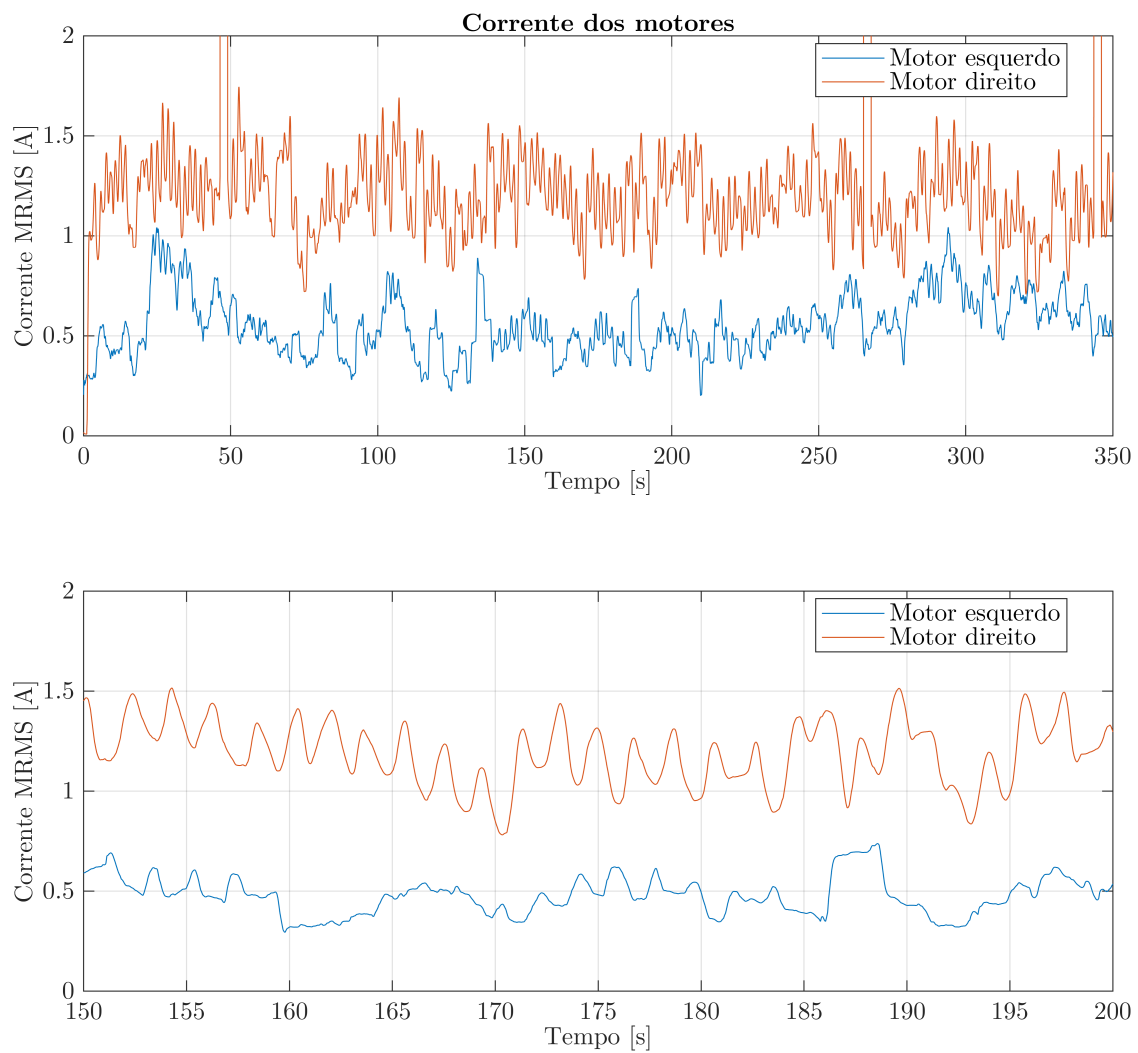


Figura 159 – Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 3 kg.

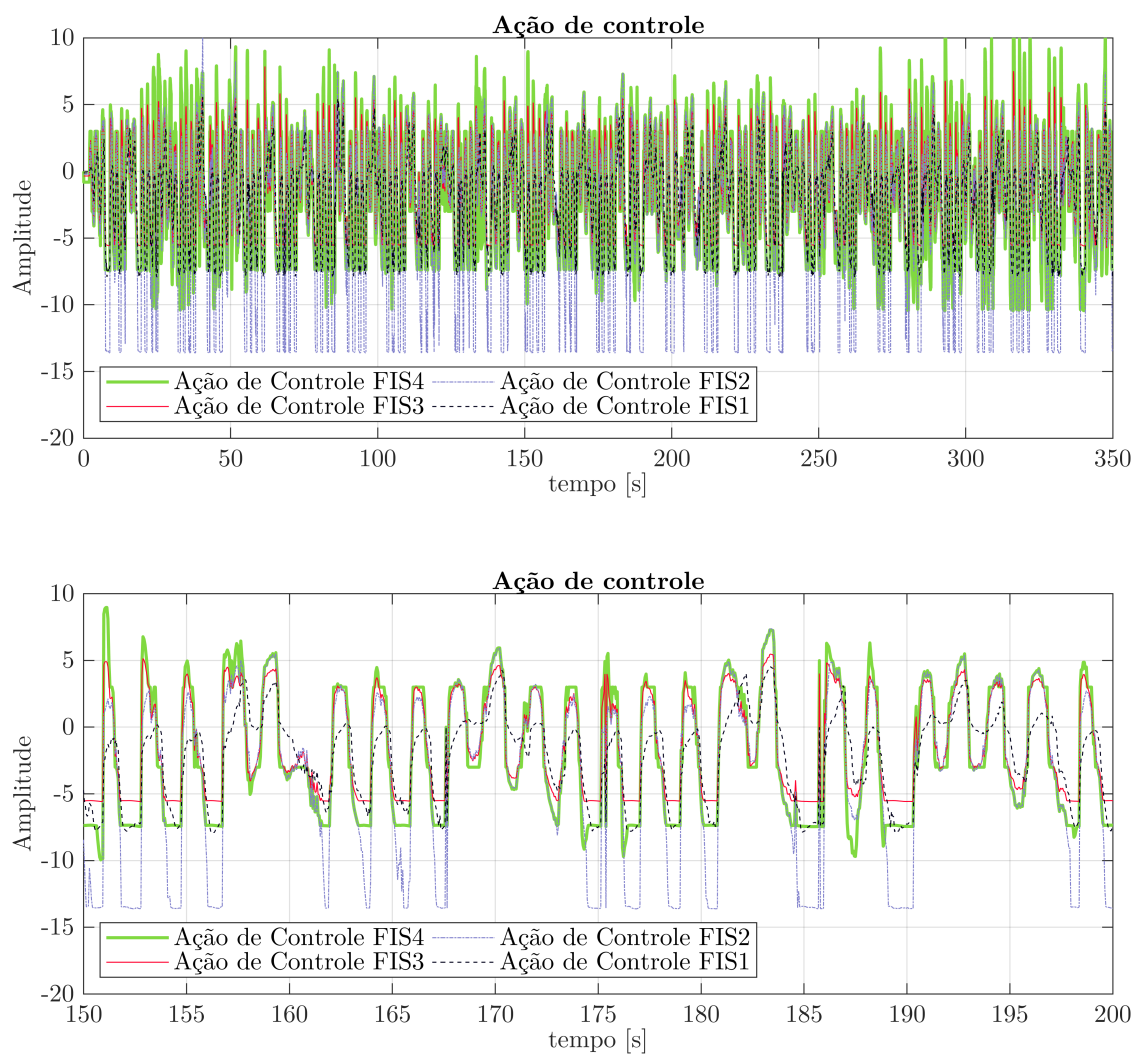


Figura 160 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 3 kg.

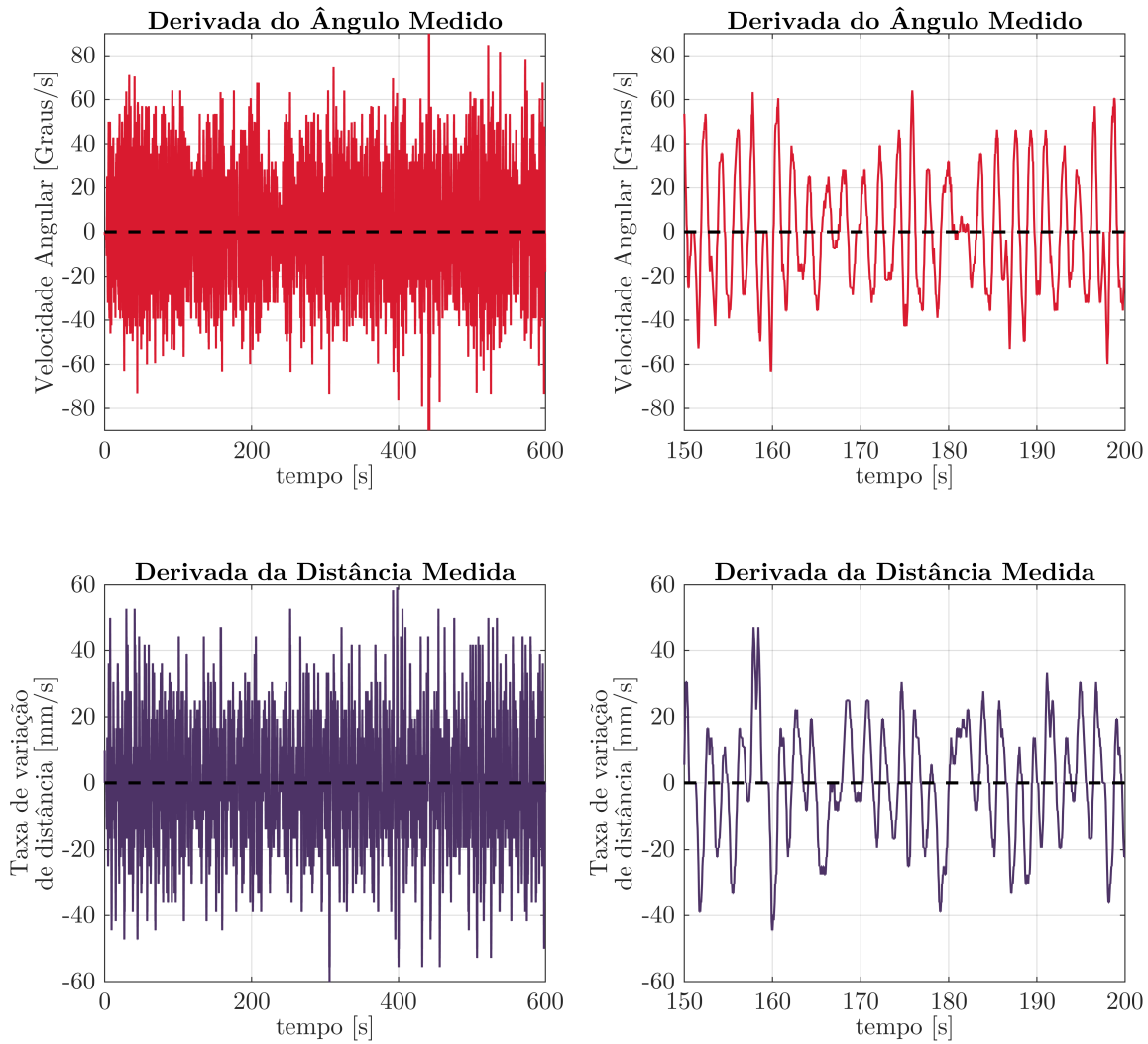


Figura 161 – Derivadas do ângulo e da distância medidos, usadas como entradas do FIS2, na condição de carga 4 kg.

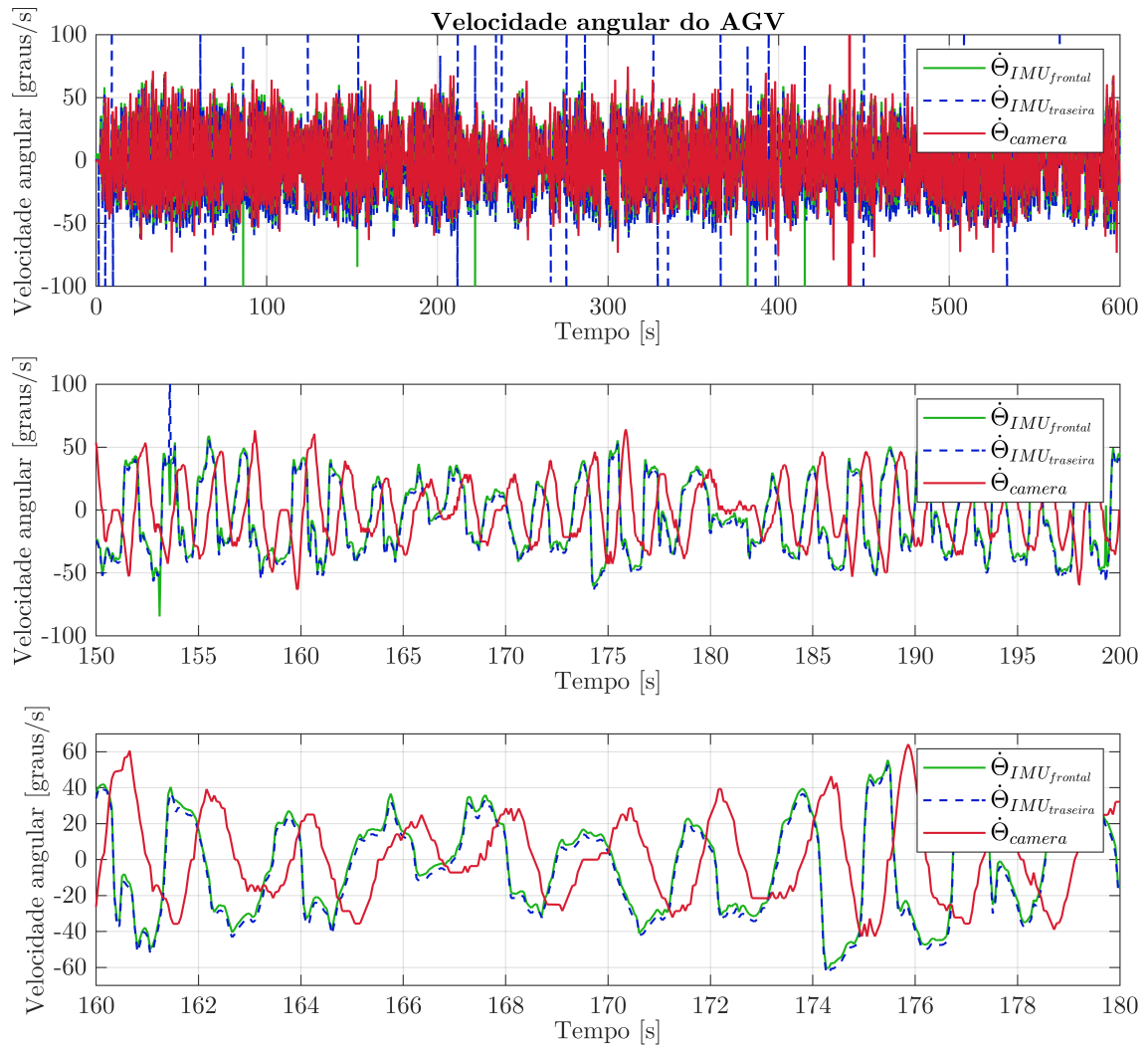


Figura 162 – Velocidades angulares medidas pela câmera e pelas IMUs na condição de carga 4 kg. As velocidades angulares medidas pelas IMUs são entradas do FIS3.

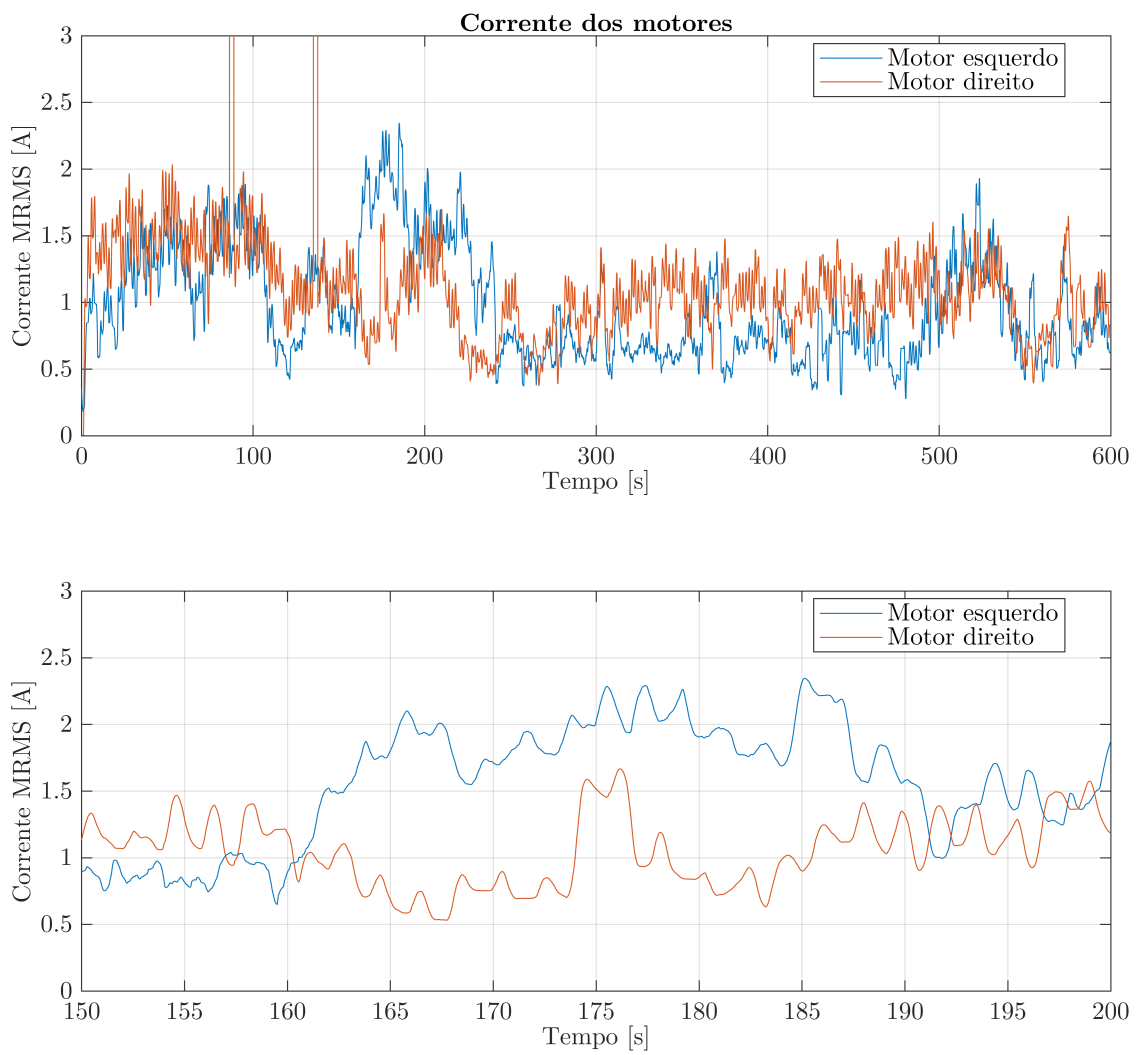


Figura 163 – Correntes dos motores, entradas do FIS4, na condição de carga 4 kg.

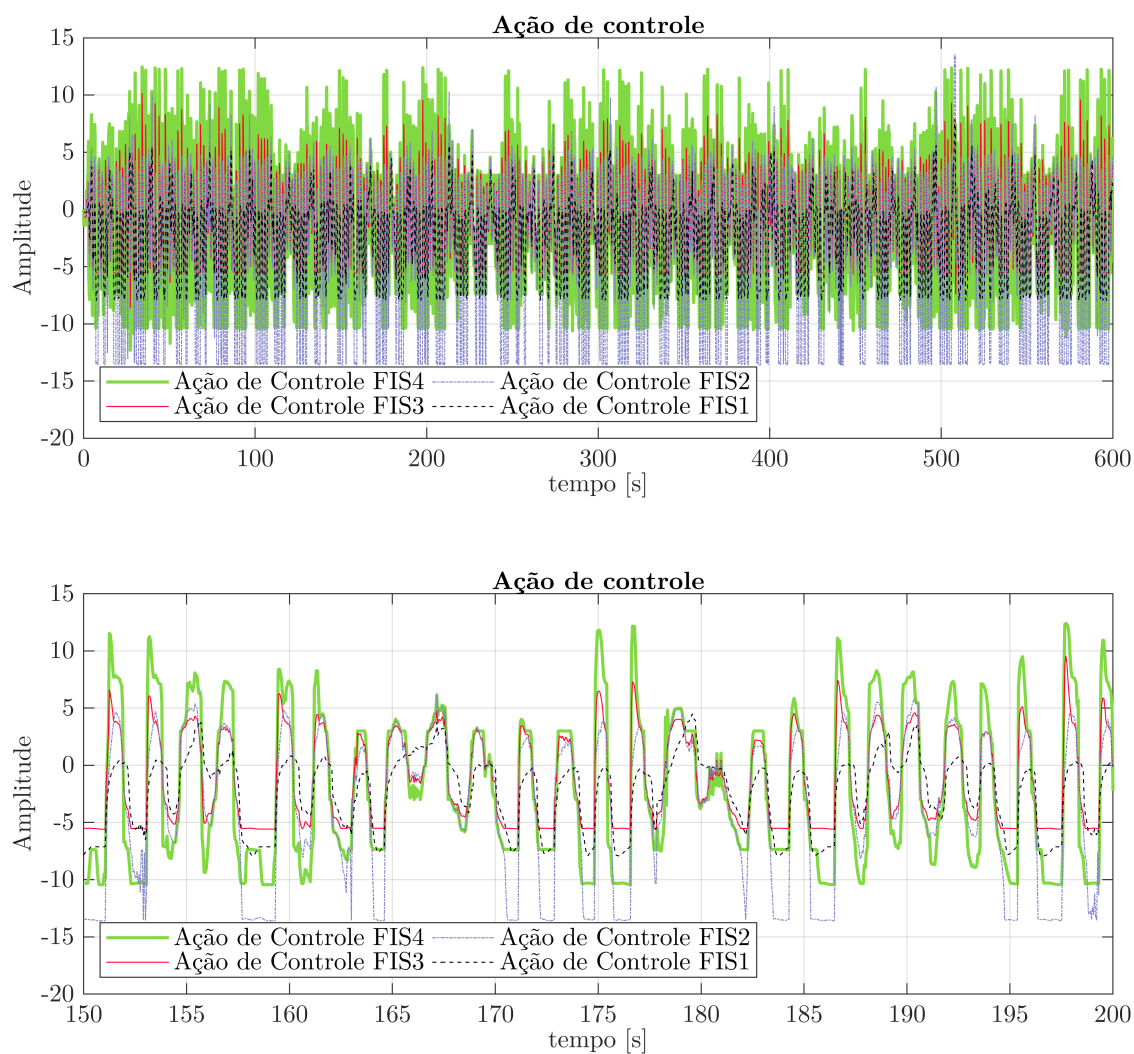


Figura 164 – Ações de controle dos FIS2, FIS2 e FIS3, sendo a ação de controle do FIS3 a saída do Fuzzy3a na condição de carga 4 kg.