UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HENRY BORRERO GUERRERO

**Desenvolvimento de um Sistema de Controle em um Robô Móvel Agrícola em Escala
Reduzida para Deslocamento entre Fileiras de Plantio**

São Carlos
2016

HENRY BORRERO GUERRERO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE EM UM ROBÔ MÓVEL
AGRÍCOLA EM ESCALA REDUZIDA PARA DESLOCAMENTO ENTRE
FILEIRAS DE PLANTIO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Dinâmica de Máquinas e Sistemas

Orientador: Prof. Assoc. Marcelo Becker.

São Carlos
2016

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA VERSÃO CORRIGIDA. A VERSÃO
ORIGINAL ENCONTRA-SE DISPONÍVEL JUNTO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA USP-EESC.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

924d , HENRY BORRERO GUERRERO
Desenvolvimento de um Robô Móvel Agrícola em Escala
Reduzida e Sistema de Controle para Deslocamento entre
Fileiras de Plantio / HENRY BORRERO GUERRERO ;
orientador MARCELO BECKER. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica
de Máquinas e Sistemas -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Robô móvel agrícola . 2. Control H infinito. 3.
Fileiras retas de cultura agrícola. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HENRY BORRERO GUERRERO**.

Título da tese: "Desenvolvimento de um robô móvel agrícola em escala reduzida e sistema de controle para deslocamento entre fileiras de plantio".

Data da defesa: 02/06/2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Marcelo Becker (Orientador)**
[Escola de Engenharia de São Carlos/EESC]

A PROVA DO

Dra. **Debora Marcondes BastosPereira Milori**
[EMBRAPA]

APROVADO

Prof. Dr. **Rafael Vidal Aróca**
[Universidade Federal de São Carlos/UFSCar]

APROVADO

Prof. Dr. **Franco Giuseppe Dedini**
[Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP]

APROVADO

Prof. Dr. **Micardo Carelli**
[Universidad Nacional de San Juan/UNSJ - Argentina]

A PROVA DO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Seganline**

*Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio e compreensão;
Especialmente aos meus pais Maria Florisa e Henry, que sempre
me incentivaram para a concretização desta importante etapa da
minha vida; À minha esposa Ana Carolina e a minha filha Laura
Sofia por sempre acompanhar e me apoiar.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, quem sempre tem demonstrado a sua boa vontade para comigo. Em diversas situações (incluindo os momentos mais árduos) confio n'Ele para me dar suporte para superar as todas as dificuldades.

Eu estou realmente agradecido com o meu professor e orientador Prof. Dr. Marcelo Becker, pelo incentivo, orientação e grande apoio durante a realização do projeto. Eu me sinto especialmente grato porque além do crescimento científico, graças a sua orientação eu aprendi coisas muito importantes para ser uma melhor pessoa.

Ao professor Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães, pelo acompanhamento e contribuição durante o desenvolvimento do meu projeto de doutorado.

Ao DSc.(c). Andrés Eduardo Baquero Velásquez, pela dedicação e acompanhamento durante o desenvolvimento do meu projeto de doutorado. Graças às múltiplas vezes que realizamos trabalho de equipe, o nosso trabalho deu resultados favoráveis.

Ao DSc.(c). Andrés Leonardo Jutinico Alarcón, por me assessorar disciplinadamente para evoluir no meu nível na área de sistemas de controle. Sinto me honrado de conseguir chamar a sua atenção e merecer ser o seu aluno de sistemas controle.

Ao MSc.(c). Vitor Akihiro Hisano Higuti pelo acompanhamento na realização de diversos experimentos de maneira que pude aprender muito dele.

Ao professor Prof. Dr. Rafael Vidal Aroca por me assessorar no uso de ferramentas computacionais pertinentes ao projeto.

Ao Prof. Dr. Adriano Almeida Gonçalves Siqueira e à Prof^a Dr. Maíra Martins da Silva, pelo esforço realizado para criar e ministrar a disciplina de sistemas de controle da pós-graduação em engenharia mecânica da USP – EESC.

Ao Técnico Antonio José Risardi pelo apoio na fabricação das peças e mecanismos necessários para a configuração do protótipo robótico ~~h~~Elvis-3.1.

Ao DSc. Alexandre José Tiberti e ao M.S.c Juan Fajardo Barrero por me ajudarem no aprendizado em programação de computadores.

À DSc.(c). Livia Martinelli Tinelli e ao Ataulfo Oiano pela ajuda na formatação desta tese.

Ao meu amigo, o DSc. Rafael Coronel Bueno Sampaio, com quem eu tive a honra de compartilhar grandes momentos que fortaleceram a nossa amizade, além de todo um intercâmbio profissional que sem dúvida contribuiu ao meu crescimento como pessoa.

Aos colegas do Laboratório de Robótica Móvel pela amizade e a oportunidades de intercambiar conceitos profissionais.

A todos os funcionários e técnicos do Laboratório de Dinâmica e do Departamento de Engenharia Mecânica, que de alguma maneira contribuíram para a realização deste projeto.

Ao Prof. Dr. Jesus Alberto delgado Rivera que me orientou numa etapa inicial na pesquisa em robótica móvel, abrindo um grande panorama para mim. Também lhe agradeço por me orientar no processo de submissão ao processo seletivo para pós-graduação no Departamento de Engenharia Mecânica da USP-ESCC.

Ao Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación da Republica da Colômbia (COLCIENCIAS) e a CAPES, programa PEC-PG no Brasil; por me apoiarem financeiramente para a realização da minha etapa de formação doutoral.

Abstract

GUERRERO, B, H (2016). *Development of a Control System to a Low Scale Agricultural Mobile Robot Navigation between Crop Rows*. Thesis (PhD) – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016

Appropriate autonomous navigation of mobile robots between crop rows implies, besides appropriate structural configuration, considering detection of plants or trees in rows, as well as the development of a locomotion control system. Consequently, this thesis presents the development of a closed loop control system based on H_∞ optimization technique, which is applied to control the navigation of a low scale car-like mobile robot between crop rows; more specifically, main focus of this work is tracking paths in the culture, by the application of robust control techniques. Two questions were fundamental in the development of the thesis: 1) which are the methods and procedures to implement the autonomous navigation of a mobile robot prototype between crop rows? And 2) is it possible to apply the concepts of closed-loop control systems to solve the problem of autonomous navigation of mobile robots between crop rows? Firstly, we provide a literature review on agricultural mobile robots whose mobility depends on wheels. Secondly, control systems design fundamentals based on the H_∞ optimization technique are addressed. Thirdly, details related to the construction of the proposed robotic platform and also the design of the proposed path controller (including its simulation and specifications for testing within an agricultural environment) are described. Finally, results of our findings are presented. It is concluded that our control system showed to be effective in the realization of autonomous navigation between crop rows in agricultural environment, which was properly configured in order to evaluate the performance of our robot.

Keywords: Agricultural Mobile Robot, Car-Like, Closed Loop Control System, Mobile Robotics, Crop Rows.

Resumo

GUERRERO, B, H (2016). *Desenvolvimento de um Sistema de Controle em um Robô Móvel Agrícola em Escala Reduzida para Deslocamento entre Fileiras de Plantio*. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2016.

O adequado deslocamento autônomo de robôs móveis entre fileiras de cultura agrícola implica a apropriada configuração estrutural do veículo, bem como considerar a detecção das filas de plantas ou árvores, e também o desenvolvimento de um sistema de controle de locomoção. Esta tese apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada baseado na técnica de otimização H_{∞} , que é aplicado no deslocamento entre fileiras de plantio de um robô móvel agrícola em escala reduzida. Mais especificamente, o foco deste trabalho é o seguimento de caminhos na cultura através da aplicação de técnicas de controle robusto. Duas questões foram fundamentais na elaboração da tese: 1) “*Quais são os métodos e procedimentos necessários para implementar a navegação autônoma de um protótipo de robô móvel entre fileiras de cultura agrícola?*” e, 2) “*É possível aplicar os conceitos relativos a sistemas de controle em malha fechada para solucionar o problema da navegação autônoma do robôs móveis entre fileiras de cultura agrícola?*”. Primeiramente é apresentada uma revisão bibliográfica sobre robôs móveis agrícolas que tem locomoção baseada em rodas. Posteriormente, os conceitos relacionados com o projeto de controle baseado na técnica de otimização H_{∞} são fundamentados. Em seguida, são descritos os detalhes relacionados com a construção da plataforma robótica proposta, o projeto do controlador de caminho, as respectivas simulações e as especificações para a realização de testes em ambiente agrícola. Finalmente os resultados alcançados são apresentados. Conclui-se que o sistema de controle proposto se mostrou efetivo na realização da navegação autônoma do robô entre as fileiras da cultura previamente configuradas para a avaliação do seu desempenho.

Palavras chave: Robô Móvel Agrícola, Car-Like, Sistema de Controle, Robótica Móvel, Fileiras de Cultura.

Lista de Figuras

Figura 1.1 Pomares de laranja configurados em fileiras	28
Figura 1.2 Cultura de abacaxi BRS imperial configurada em fileiras.....	29
Figura 1.3 Cultura de milho configurada em fileiras.....	30
Figura 1.4 Sistema de plantío retangular	30
Figura 1.5 Distribuição uniforme de plantas de milho na respectiva fileira.....	31
Figura 1.6 Falha de distribuição e plantas de milho na respectiva fileira.....	31
Figura 1.7 Falha de distribuição de plantas de milho na respectiva fileira por presença de plantas dominadas	32
Figura 1.8 Representação do cenário de trabalho do protótipo #Elvis-3.1	36
Figura 2.1 Protótipo de robô móvel agrícola.....	41
Figura 2.2 Robô Móvel Hortibot.....	43
Figura 2.3 Robô móvel com 4 rodas esterçáveis	44
Figura 2.4 Projeto CASC	45
Figura 2.5 Plataforma robótica CoroWare.....	45
Figura 2.6 Plataforma robótica empregada por Hiretmath et al., (2014)	47
Figura 2.7 Robô móvel Tuscarora.....	49
Figura 2.8 Robô Pioneer 3-AT (P3-AT) usado na pesquisa do Gimenez et al., (2015)	48
Figura 2.9 Plataforma robótica AgroBOT	50
Figura 2.10 Wall-Ye.....	49
Figura 2.11 Robô móvel Grizzly.....	51
Figura 2.12 Robô móvel HV-100 oferecido pela empresa Harvest Automation.	50

Figura 2.13 Robô móvel da empresa RowBOT	51
Figura 2.14 Protótipo robótico agrícola do Departamento de Engenharia Mecânica na USP-EESC.....	51
Figura 2.15 Protótipo robótico agrícola do AgriBOT do Departamento de Engenharia Mecânica na USP-EESC.....	52
Figura 3.1 Plataforma HELVIS-1.....	56
Figura 3.2 Visão geral do #Elvis-2.....	56
Figura 3.3 Desenho CAD protótipo #Elvis-3	57
Figura 3.4 Plataforma #Elvis-3.....	58
Figura 3.5 Plataforma #Elvis-3.1. (a) Representação CAD; (b) O protótipo	59
Figura 3.6 Vistas lateral e frontal do #Elvis-3.1	60
Figura 3.7 Diagrama de blocos geral do sistema de propulsão.....	61
Figura 3.8 Acoplamento DKN-15/26 da empresa Kalatec	61
Figura 3.9 Imagem subsistema de propulsão.....	62
Figura 3.10 Motor Maxon EC-4Pole	63
Figura 3.11 Redutor Maxon	63
Figura 3.12 Planetário do redutor Maxon.....	63
Figura 3.13 <i>Encoder</i> usado no motor Maxon	64
Figura 3.14 Placa EPOS2 50/5	64
Figura 3.15 Veículo FWS e a condição de Ackerman	66
Figura 3.16 Base do equacionamento para o esterçamento de um veículo FWS segundo a condição de Ackerman no caso das rodas interiores.....	66
Figura 3.17 Base do equacionamento para o esterçamento de um Veículo FWS segundo a condição de Ackerman no caso das rodas exteriores.	67
Figura 3.18 Modelo cinemático simplificado da bicicleta equivalente ao veículo FWS	68
Figura 3.19 Partes principais do sistema de esterçamento de um veículo FWS	69
Figura 3.20 Representação do mecanismo de esterçamento ressaltando o sub- mecanismo trapezoidal quando não se executa esterçamento	71
Figura 3.21 Mecanismo de esterçamento de um veículo do tipo “car-like” induzindo o seu esterçamento à esquerda.....	72
Figura 3.22 Diagrama de blocos generalizado do subsistema de esterçamento	72
Figura 3.23 Placa EPOS2 50/5	73
Figura 3.24 Mecanismo de fuso implementado no #Elvis-3.1 e as suas principais partes.....	73
Figura 3.25 Sistema Inercial IG500N	74

Figura 3.26 Medição da orientação (ψ) do veículo usando o Sistema Inercial IG500N.....	75
Figura 3.27 Sensor LIDAR UTM 30LX da empresa Hokuyo.....	77
Figura 3.28 Representação do ângulo de abertura para detecção no sensor UTM- 30LX.....	77
Figura 3.29 Computador ARK-1120 de Avantech.....	78
Figura 3.30 Bateria LIPO do tipo utilizado no <i>helvis</i> -3.1.....	79
Figura 3.31 Diagrama de blocos representando a iteração entre dispositivos e mecanismos no <i>helvis</i> -3.1	80
Figura 3.32 (a) - Representação do <i>helvis</i> -3.1 seguindo um muro à sua direita; (b) Configuração utilizada do sensor LIDAR.....	83
Figura 3.33 Representação para diversas situações do erro de orientação durante o deslocamento do <i>helvis</i> -3.1.....	83
Figura 3.34 (a) Representação gráfica do modelo cinemático de um veículo tipo car-like. (b) Representação gráfica do modelo cinemático simplificado para um veículo car-like.	85
Figura 3.35 Resposta ao degrau unitário do sistema de controle em malha fechada para a planta da Equação (3.26) com controlador proporcional de ganho 1.	89
Figura 3.36 Planta aumentada do sistema projetado	91
Figura 3.37 Resposta ao degrau com referência em amplitude de 0,4 do sistema de controle em malha fechada H_∞ para diferentes larguras de banda	93
Figura 3.38 Diagrama de Bode relacionada à magnitude da sensibilidade ($ S $) e à função de limite superior ($1/ W_1 $) no sistema de malha fechada gerado.	94
Figura 3.39 Diagrama de Bode relacionado à magnitude do limite superior ($1/ W_2 $) estabelecido para a ação de controle ($K_f S$) no sistema de malha fechada gerado.	94
Figura 3.40 Resposta ao degrau de magnitude 0,4 por parte do sistema de malha fechada gerado.....	96
Figura 3.41 Comportamento contínuo da ação de controle no sistema de malha fechada gerado (u para tempo contínuo; u_d para tempo discreto)	96
Figura 3.42 Planta aumentada do sistema de controle de dois graus de liberdade.....	100
Figura 3.43 Diagrama de Bode apresentando a função de magnitude da função sensibilidade e da função de ponderação W_l para o sistema de controle com $\gamma = 1,1399$ da tabela 3.1	101

Figura 3.44 Diagrama de Bode apresentando a função de magnitude da função sensibilidade e da função de ponderação W_I para o sistema de controle com $\gamma = 0,9275$ da tabela 3.1	102
Figura 3.45 Diagrama de Bode apresentando a função de magnitude da função sensibilidade e da função de ponderação W_I para o sistema de controle com $\gamma = 0,5836$ da tabela 3.1	102
Figura 3.46 Diagrama de Bode apresentando a função de magnitude da função sensibilidade e da função de ponderação W_I para o sistema de controle com $\gamma = 0,2970$ da tabela 3.1	103
Figura 3.47 Diagrama de Bode relacionado à magnitude do limite superior ($1/ W_2 $) estabelecido, de acordo com o valor γ ($\gamma = 0,9275$)	103
Figura 3.48 Ação de controle para o sistema de controle de 2 graus liberdade, de acordo com o valor γ ($\gamma = 0,9275$) na tabela 3.1. Se plota a ação de controle para tempo contínuo e para tempo discreto.	104
Figura 3.49 Resposta na saída para o sinal de entrada degrau de amplitude 0,4 para cada sistema de controle segundo cada valor γ da tabela 4.1	105
Figura 3.50 Atenuação de distúrbio de entrada do sistema de dois graus de liberdade para cada valor γ da tabela 3.1	105
Figura 3.51 Representação do Fuso indicando a sua posição central e máximas posições extremas	107
Figura 3.52 Diagrama de blocos para determinação de um controlador K baseado na técnica de otimização H_∞ para seguimento de muro usando o $\#Elvis-3.1$	107
Figura 3.53 Fluxograma correspondendo com o procedimento relacionado com o controle de seguimento de muro do $\#elvis-3.1$	109
Figura 3.54 Estrutura construída para emular um muro-fila vegetal.....	110
Figura 3.55 Fotografia do $\#elvis-3.1$ durante a realização de experimento <i>indoor</i> usando cultura artificial.	111
Figura 3.56 Representação de três possíveis situações de orientação quando o $\#elvis-3.1$ executa a tarefa de controle de seguimento de filas de cultura pelo meio	112
Figura 3.57 Fluxograma da aplicação desenvolvida para que o $\#elvis-3.1$ se desloque para frente seguindo fileira de cultura à sua direita.	115
Figura 3.58 Representação de ambiente agrícola composto por fileiras retas de plantas	120

Figura 3.59 (a) Plantas de milho em contenedores de solo do lado #Elvis-3.1. (b) Imagem do protótipo durante o seu percurso entre fileiras de cultura.	117
Figura 3.60 Representação CAD do ambiente de cultura e método de percepção de fileiras.	118
Figura 3.61 Fluxograma para seguimento de fileiras de cultura real.	122
Figura 3.62 Representação do modo em que se realiza a detecção das fileiras de cultura aos dois lados do veículo.	125
Figura 3.63 Primeira parte da manobra. (A) - Representação em sequência da primeira parte da manobra; (B1) – Representação do estado três da manobra quando o sensor LIDAR detecta fileira; (B2) - Representação do estado três da manobra quando o sensor LIDAR detecta espaçamento.	128
Figura 3.64 Representações das diversas situações de detecção de fileiras e espaçamentos durante a execução da segunda parte da manobra quando se inicia com detecção de fileira.	129
Figura 3.65 Representações das diversas situações de detecção de fileiras e espaçamentos durante a execução da segunda parte da manobra quando se inicia com detecção de espaçamento.	130
Figura 3.66 Representação relacionada com a terceira parte da manobra de encontro do seguinte caminho de cultura.	131
Figura 4.1 Fotografia do #Elvis-3.1 durante um experimento para a realização da tarefa de seguimento de um muro contínuo usando controle H_{∞}	132
Figura 4.2 Gráficos obtidos de um experimento real. São apresentados os dados correspondentes com o sinal de controle e distância lateral a qual se encontra afastado o #Elvis-3.1 em relação ao muro que se pretende seguir.	132
Figura 4.3 Apresentação de experimentos de seguimento de barreira vegetal artificial. (a) Imagem #Elvis-3.1 durante o experimento. (b) Visualização do ambiente usando o sensor LIDAR	133
Figura 4.4 Visualização do ambiente detectado pelo sensor LIDAR do #Elvis-3.1 em 4 instantes diferentes de tempo	134
Figura 4.5 Gráficos relacionados com a distância lateral medida e o erro de distância lateral durante a realização de um experimento de seguimento de barreira vegetal artificial	135
Figura 4.6 Gráficos relacionados com o erro de distância e o a ação de controle H_{∞} durante a realização de um experimento de seguimento de barreira vegetal artificial	135

Figura 4.7	Fileiras de cultura detectadas.	137
Figura 4.8	Visualização de dados relacionados com o ambiente detectado.	137
Figura 4.9	Gráficos relacionados com o desempenho do Sistema de controle no seguimento de fileiras com espaçamento de 1,80m entre elas. (a) Distância lateral medida. (b) Ação de controle H_{∞}	138
Figura 4.10	Uma visão aumentada das fileiras de cultura. (a) #Elvis-3.1 no meio de fileiras. (b) Uma imagem aumentada de uma fileira.	139
Figura 4.11	Imagem da cultura configurada com espaçamento entre fileiras de 1,0m	141
Figura 4.12	Imagem do #Elvis-3.1 enquanto se deslocava no meio de fileiras de cultura com espaçamento de 1,0m entre elas	141
Figura 4.13	Visualização de dados de cultura detectada em um instante de tempo.....	142
Figura 4.14	Visualização de dados de cultura detectada em um instante de tempo.....	143
Figura 4.15	Visualização de dados de cultura detectada em um instante de tempo perto ao final do caminho seguido.....	144
Figura 4.16	O #Elvis-3.1 durante a realização de seguimento de caminho de cultura com espaçamento entre fileiras de 1,0m.....	145
Figura 4.17	Visualização de dados relativa à primeira parte da manobra.....	146
Figura 4.18	Visualização de dados pelo sensor LIDAR durante a realização da segunda parte da manobra (indo de ré).....	147
Figura 4.19	Visualização do ambiente durante a realização da terceira parte da manobra. ..	149
Figura 4.20	Gráficos relacionados com o erro de distância e a respectiva ação de controle durante a realização de um experimento	151
Figura 4.21	Gráficos relacionados com ação de controle requerida e ação de controle limitada para proteger o mecanismo de esterçamento.	152
Figura 4.22	Gráfico relacionados com o erro de distância e o erro de orientação.	153
Figura 4.23	Gráficos relacionados com a ação de controle requerida em graus e a ação de controle calculada segundo o polinômio de esterçamento.	154
Figura 4.24	Boxplots of the distance error (e_y) 10 times for all crop paths. (a) First path. (b) Second path. (c) Third path. (d) Fourth path.	155
Figura 4.25	Imagem do ambiente com idade avançada e plantas invasoras	156
Figura A.1	Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada incluindo entradas exógenas além da referência.....	178
Figura A.2	Diagrama de blocos generalizado de um sistema de controle em malha considerando entradas exógenas	177

Figura A.3 Sistema regulador.....	179
Figura A.4 Função de sensibilidade ideal e ganho de malha aberta no domínio da frequência	181
Figura A.5 (a) Função S ideal. (b) Função T correspondente à função S	182
Figura A.6 Diagrama de blocos de um sistema de dois graus de liberdade que considera distúrbio na saída.....	185
Figura A.7 Sistema de malha fechada com função de transferência H	186
Figura A.8 Estabilidade de ganho pequeno no espaço de Nyquist.....	186
Figura A.9 Casos em que $ S $ excede o limite imposto por $1/ \omega_p $, resultando que $H_\infty > 1$. (a) Função S e função Wp . (b) Função de sensibilidade ponderada (WpS).....	188
Figura A.10 Gráfico exato de $1/ Wp(j\omega) $ e a sua correspondente assintótica.....	190
Figura A.11 Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada introduzindo funções de peso às entradas e saídas do sistema generalizado.....	190
Figura A.12 Diagrama generalizado para um sistema de controle em malha fechada.....	191
Figura A.13 Bloco função de transferência entra as saídas controladas e as entradas exógenas.	192
Figura A.14 Bloco função de transferência entra as saídas controladas e as entradas exógenas.....	195

Sumário

Capítulo 1: Introdução.....	27
1.1 Motivação.....	27
1.1.1 Dificuldades para a Movimentação de um Veículo entre Linhas de Plantio ..	28
1.1.2 Sistema de Controle Aplicado em um Robô Móvel Agrícola	33
1.2 Objetivos	34
1.2.1 Objetivo Geral.....	34
1.2.2 Objetivos Específicos	34
1.3 Contribuições	34
1.3.1 Plataforma Robótica Móvel	34
1.3.2 Sistemas de Controle em malha Fechada	35
1.3.3 Estado da Arte	35
1.4 Definição do Problema	35
1.5 Organização do Texto	35
Capítulo 2: Robotica Móvel na Agricultura	39
2.1 Revisão Bibliográfica sobre Robótica Móvel na Agricultura	39
2.2 Conclusões	52
Capítulo 3: Materiais e Métodos	55
3.1 Descrição Geral do Robô Móvel #Elvis-3.1	55
3.1.1 Subsistema de Propulsão	61
3.1.2 Subsistema de esterçamento	65

3.1.3	Dispositivos embarcados no h Elvis-3.1	74
3.1.4	Iteração entre dispositivos e Mecanismos no h Elvis-3.1	80
3.2	Desenvolvimento de um Sistema de Controle em malha Fechada H^∞	81
3.2.1	Seguidor de Muro	82
3.2.2	Projeto e simulação do Sistema de Controle em malha Fechada H^∞	84
3.3	Especificação de Testes.....	106
3.3.1	Especificação de Experimentos para Seguimento de Muro com o h elvis-3.1.....	107
3.3.2	Especificação de Experimentos para Seguimento de Barreira Vegetal Artificial.....	110
3.3.3	Especificação de Experimentos para Seguimento de Barreira Vegetal Real com o h elvis-3.1	116
3.4	Conclusões	128
Capítulo 4		131
4.1	Resultados Alcançados com o Seguimento de Muro	131
4.2	Resultados Alcançados com o Seguimento de Barreira Vegetal Artificial.....	133
4.3	Resultados Alcançados com o Seguimento de Barreira Vegetal Real.....	140
4.3.1	Resultados para Espaçamento entre fileiras de 1,80m.....	140
4.3.2	Resultados para Espaçamento entre Fileiras de 1,0m.....	140
4.4	Conclusões.....	160
Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros		159
5.1	Conclusões.....	159
5.2	Trabalhos Futuros	161
REFERÊNCIAS		165
Apêndice A: Elementos de Controle		175
A.1	Aspectos Gerais de Controle Robusto.....	176
A.1.1	Objetivos de Controle	177
A.2	Projeto de Controle Robusto através da conformação de funções de transferência de malha fechada.....	187
A.2.1	Conformação de funções de transferência de malha fechada	187
A.3	Conclusões	195

Capítulo 1

Introdução

A agricultura mostrou-se fundamental no desenvolvimento da humanidade ao longo da sua história. Segundo Mazoyer e Roudart (2006) foi no período neolítico que o homem começou a cultivar plantas e a domesticar animais, iniciando assim um processo histórico relacionado com o desenvolvimento da agricultura. Na atualidade, a tecnologia se tornou fundamental no suporte do processo de produção de alimentos (GORLISKI, 2003; REID *et al.*, 2011; MING *et al.*, 2009). Este aproveitamento tecnológico motivou o desenvolvimento de pesquisas direcionado à construção de veículos autônomos agrícolas. De acordo com Ming *et al.*, (2009), historicamente o primeiro sistema autônomo remonta a década de 1920 através da aplicação de estratégias de autoguiagem. Os avanços obtidos nesta primeira etapa, levaram ao surgimento de pesquisas focadas na aplicação de robôs móveis no setor produtivo agrícola.

1.1 Motivação

Levando em conta que segundo Ming *et al.*, (2009); Cheein e Carelli (2013) e Bergerman *et al.*, (2015), historicamente existe um alto interesse no desenvolvimento de pesquisas orientadas ao uso de robôs móveis autônomos, como ferramentas de suporte na agricultura. Deve-se destacar que nos países da América do Sul, a agricultura é um setor prioritário da economia. Tendo em vista este cenário, considera-se motivador, utilizar o conhecimento relacionado com a robótica móvel aplicada em ambiente do tipo agrícola, contribuindo com a disseminação e consequente popularização do conhecimento adquirido.

Dado que as técnicas relacionadas com a robótica móvel exigem o domínio de diversas áreas do conhecimento, tanto das ciências básicas como da Engenharia, tem-se que a aplicação de robôs no ambiente agrícola exige o emprego de diversos conceitos relacionados com a agronomia, conduzindo a uma abordagem interdisciplinar que facilite o desenvolvimento desta tese.

1.1.1 Dificuldades para a Movimentação de um Veículo entre Linhas de Plantio

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (do inglês *FAO: Food and Agriculture Organization*) o plantio de plantas ou árvores em fileiras, facilita a realização de tarefas tais como a inspeção de pragas, detecção de doenças e a colheita, dado que possibilita o trânsito de pessoas, ferramentas e dispositivos através dos caminhos disponíveis entre as respectivas linhas de plantio. Em concordância, deve-se destacar a possibilidade de utilizar sistemas mecanizados que se desloquem autonomamente através dos espaçamentos entre fileiras para a realização de diversas tarefas (como as anteriormente mencionadas), com o intuito de melhorar o rendimento produtivo ao longo do tempo (PORTAL TECA, 2011).

Figura 1.1 Pomares de laranja configurados em fileiras

Fonte: **Portal Portaldoagronegocio (2015).**

Como na maioria das plantações e fazendas do mundo, também na América do Sul, tem-se que diversos tipos de plantas que produzem alimentos, são cultivadas em configuração de fileiras. Considerando apenas os sistemas de plantio retangulares e pelo tanto, linhas retas de plantio Portal *Agriculture for Engineers* 4 (2013), é possível encontrar diversos exemplos de culturas nas quais se observa espaçamentos entre as respectivas fileiras. Na Figura 1.1 é apresentado um caminho de cultura existente entre duas fileiras de árvores de laranja, a seguir, na Figura 1.2 visualiza-se uma cultura de abacaxi BRS imperial com os respectivos caminhos, enquanto que na Figura 1.3 apresenta-se uma imagem relacionada com fileiras e caminhos de cultura de milho.

Figura 1.2 Cultura de abacaxi BRS imperial configurada em fileiras

Fonte: **Portal Embrapa Multimídia: Banco de Imagens (2015).**

De acordo com o apresentado nas Figuras 1.1 a 1.3, pode-se observar que o espaçamento entre fileiras determina a existência de caminhos que podem ser mais ou menos regulares, em função da natureza do solo cultivado. Dado que estes caminhos estão dispostos para a realização de tarefas de manutenção da cultura, isto implica na possibilidade de trânsito de pessoas e veículos. Por conseguinte, considera-se como um aspecto motivador o desenvolvimento de uma plataforma robótica móvel que seja capaz de deslocar-se, mantendo-se entre as linhas de plantio apesar das irregularidades do terreno.

Figura 1.3 Cultura de milho configurada em fileiras

Fonte: Cruz *et al.* (2012).

Espaçamento entre Fileiras e a Distribuição de Plantas

Figura 1.4 Sistema de plantio retangular

Fonte: Portal Agriculture for Engineers 4 (2013).

Figura 1.5 Distribuição uniforme de plantas de milho na respectiva fileira

Fonte: Cruz *et al.* (2012).

Figura 1.6 Falha de distribuição e plantas de milho na respectiva fileira

Fonte: Cruz *et al.* (2012).

Figura 1.7 Falha de distribuição de plantas de milho na respectiva fileira por presença de plantas dominadas

Fonte: **Cruz *et al.* (2012).**

A disposição espacial organizada de fileiras de cultura faz parte de um tópico agrônômico denominado sistemas de plantio, entre os quais se têm os sistemas quadrados e retangulares (PORTAL AGRICULTURE FOR ENGINEERS 4, 2013). Em particular, no caso dos sistemas retangulares, o campo usado para o plantio se configura dentro de um retângulo geral delimitado pelas unidades de cultura nos extremos de fileiras retas. Um exemplo gráfico de um sistema de plantio retangular é apresentado na Figura 1.4. No sistema de plantio retangular, deve-se configurar um espaçamento entre fileiras e uma separação entre as plantas que integram cada uma das respectivas fileiras, de forma que esta separação seja de valor constante. No caso representado na Figura 1.4, pode-se observar que o espaçamento entre fileiras é de $3m$, enquanto que, a separação entre as plantas é de $2m$.

O sistema de plantio retangular facilita a determinação da sua densidade de plantas. De acordo com Cruz *et al.* (2012), a densidade de plantio está definida como o número de plantas por unidade de área. Esta variável é determinante, por exemplo, no rendimento da lavoura de

milho e está relacionada com a distribuição de plantas nas linhas de cultura e o espaçamento entre as linhas. Segundo Balbinot e Fleck (2005), no caso da cultura de milho usualmente o espaçamento entre as fileiras simples é uniforme, de aproximadamente entre 0,8m e 1,0m. Além disso, de acordo com o exposto por Cruz *et al.* (2012); Silveira (2016) e Cazarotto (2014), diversos fatores como, a velocidade durante o plantio quando se empregam semeadoras de propulsão manual ou mecanizada, a profundidade de semeadura desuniforme, entre outros, fazem com que a distribuição entre as plantas não seja necessariamente uniforme. Na Figura 1.5, apresenta-se um exemplo de uma cultura de milho em fileiras em que a distribuição entre plantas é uniforme. Já na Figura 1.6, é apresentado um caso em que a distribuição entre plantas não é uniforme devido à má distribuição das sementes no momento do plantio. Por sua vez, na Figura 1.7, apresenta-se um caso similar de falha na distribuição de plantas diferenciando-se do caso apresentado na Figura 1.6 porque esta falha se caracteriza pela presença de plantas dominadas (CRUZ *et al.*, 2012).

Segundo o apresentado neste subitem, considera-se como um aspecto motivador que o veículo autônomo proposto nesta tese, seja capaz de determinar apropriadamente as fileiras de cultura apesar do espaçamento não constante entre fileiras e da distribuição de plantas correspondente. Desta forma, ele deve realizar adequadamente o seu deslocamento de forma autônoma entre os caminhos de cultura.

1.1.2 Sistema de Controle Aplicado em um Robô Móvel Agrícola

A área de sistemas de controle autônomo constitui um campo de pesquisa particular que oferece possibilidades para a sua aplicação em diversas áreas. Segundo Skogestad e Postlethwaite (2007); Damen e Weiland (2002) e Bosgra *et al.* (2007), em um sistema de controle em malha fechada, baseado no modelo matemático da planta, o projeto de um controlador robusto considera a rejeição a efeitos dinâmicos não desejados que são ocasionados pela existência de incertezas no modelo empregado e pela presença de distúrbios ou ruídos. Adicionalmente, de acordo com o exposto por Damen e Weiland (2002), o desenvolvimento de controladores robustos baseados no método de otimização H_{∞} correspondem a um campo de pesquisa em contínuo desenvolvimento desde a sua proposição na década de 1980.

Considera-se como um argumento motivador a utilização do conhecimento desde a teoria de sistemas de controle, com o intuito de aplicá-lo no sistema robótico apresentado nesta

tese, projetando e implementado um sistema de controle em malha fechada H_{∞} tal que o robô móvel se desloque entre as fileiras de cultura de forma autônoma.

1.2 Objetivos

O desenvolvimento do projeto de robótica móvel aplicado à agricultura apresentado nesta tese exige o cumprimento de um objetivo geral Além de uns objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de controle H_{∞} aplicado a uma plataforma robótica móvel do tipo “*car-like*” em escala reduzida, que permita o seu emprego na navegação entre fileiras de cultura.

1.2.2 Objetivos Específicos

Projetar e implementar os subsistemas de esterçamento e propulsão, necessários para a locomoção do veículo;

Realizar as adaptações necessárias no subsistema de percepção, para detectar as fileiras de cultura entre as quais o robô móvel deve navegar;

Projetar e implementar um controlador digital baseado na técnica de otimização H_{∞} aplicado à navegação do robô entre fileiras de cultura e, por fim, realizar experimentos em ambiente agrícola para avaliar o desempenho do sistema de controle implementado.

1.3 Contribuições

A realização desta trouxe as seguintes contribuições:

1.3.1 Plataforma Robótica Móvel

O desenvolvimento desta tese apresenta como a primeira contribuição a disponibilização de uma plataforma robótica móvel em funcionamento em ambiente agrícola, segundo a definição do problema (apresentado posteriormente). Os conceitos aplicados ao deslocamento do robô móvel apresentado nesta tese, são portáteis e adaptáveis a outras plataformas de maiores dimensões, sempre que se considerem condições cinemáticas no respectivo deslocamento.

Considera-se que a plataforma robótica, configurada através da abordagem completa desta tese de doutorado, pode ser reaproveitada para assumir pesquisas e trabalhos futuros orientadas a contribuir ainda mais na navegação autônoma.

1.3.2 Sistemas de Controle em malha Fechada

Nesta tese integra-se um sistema de controle em malha fechada, usando a técnica de otimização H_{∞} com o intuito de gerar um método de navegação reativa da plataforma robótica utilizada, de forma que ela se desloque para frente, controlando sempre avançar através dos caminhos de cultura, que estão disponíveis entre as fileiras do plantio.

1.3.3 Estado da Arte

Considera-se que a partir do alcance e respectiva documentação dos objetivos propostos nesta tese, contribui-se ao estado da arte em geral da robótica agrícola que se percebe reportado na literatura.

Em um sentido similar, há se observado uma oportunidade para contribuir ao estado da arte relativo às aplicações dos sistemas de controle em malha fechada, baseados na técnica de otimização H_{∞} . Em concordância, considera-se que esta tese contribui ao estado da arte relacionado com a aplicação de sistemas de controle ótimo de malha fechada H_{∞} , introduzindo este tipo de estratégia de controle na robótica agrícola.

1.4 Definição do Problema

O problema que se busca resolver consiste em realizar o deslocamento de um robô móvel entre fileiras de cultura, para isso foi construído um protótipo robótico móvel do tipo “*car-like*” que foi denominado como #Elvis-3.1, que foi configurado configurada para uso experimental em ambiente agrícola.

O #Elvis-3.1 deve funcionar em concordância com a situação considerada na Figura 1.8, na qual é possível visualizar fileiras retas de cultura configuradas segundo o sistema de plantio retangular (PORTAL AGRICULTURE FOR ENGINEERS 4, 2013). Desta forma, o protótipo deve realizar o percurso desde o ponto de início (I) até o ponto de parada (F), controlando o seu deslocamento nos respectivos caminhos entre os espaçamentos.

1.5 Organização do Texto

Neste capítulo foram apresentadas as motivações e os objetivos deste trabalho, descrevendo a proposta e as respectivas contribuições. No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica orientada a definir a agricultura de precisão e apresentar o estado da arte tanto na área de robôs móveis cujo sistema de locomoção se baseia em rodas e que são empregados na agricultura tanto para pesquisa como para fins empresariais. O capítulo 3 é

dedicado a apresentar os materiais e métodos, apresentando detalhes relacionados com a estrutura e dispositivos que fazem parte do protótipo #Elvis-3.1. Também no capítulo 3, detalha-se o modelo matemático que é utilizado para o desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada. Encerrando o capítulo 3, apresentam-se as especificações dos experimentos que foram realizados. No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos na aplicação do #Elvis-3.1 para a realização da missão especificada previamente na definição do problema. E posteriormente são apresentadas as conclusões, bem como propostas para continuidade desta pesquisa. Finalmente no Apêndice A, são apresentados os conceitos básicos relacionados ao controle autônomo que foram aplicados no desenvolvimento do sistema embarcado no protótipo #Elvis-3.1. Durante este capítulo também é mostrada a arquitetura geral do sistema de controle embarcado no protótipo.

Figura 1.8 Representação do cenário de trabalho do protótipo #Elvis-3.1

Capítulo 2

Robótica Móvel na Agricultura

A abordagem assumida no projeto de pesquisa utilizando o protótipo robótico móvel #Elvis-3.1 foi inspirada nos requisitos e necessidades da área agrícola. Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica relacionada ao desenvolvimento histórico dos robôs móveis agrícolas, cujo deslocamento é realizado através do uso de rodas.

2.1 Revisão Bibliográfica sobre Robótica Móvel na Agricultura

Diversas revisões bibliográficas apresentam evidências que sugerem cronologicamente um começo demonstrável, acerca da aparição de invenções orientadas a facilitar a guiagem em veículos agrícolas. Segundo Heraud e Langue (2009), a história relativa à invenção de mecanismos projetados para auxiliar veículos agrícolas para plantio em fileiras, iniciou-se na década de 1870, época na qual apareceram numerosas patentes relacionadas com marcadores de fileira, incorporação de subsistemas para facilitar o esterçamento manual e autônomo, sensores de esterçamento, entre outros. Segundo Ming *et al.* (2009); Mousazadeh (2013); Rovira-Más (2009) e Wilson (2000), o desenvolvimento de veículos automatizados no campo agrícola, reporta uma etapa inicial de alto interesse na guiagem autônoma, desde os primeiros anos da década de 1920. Em concordância, Heraud e Langue (2009) fornecem informação relacionada a patentes orientadas ao desenvolvimento de sistemas para facilitar a guiagem de veículos agrícolas, abrangendo o período compreendido desde a década de 1870 até o ano 2000.

Consequentemente com o exposto por Wilson (2000), apesar de que a teoria de sistemas de controle em malha fechada tinha sido desenvolvida na década de 1930, só no final da década de 1940, essa teoria começou a ser introduzida na indústria sob a forma de controle de processos. Subsequentemente, esta foi aplicada na indústria militar associada à Segunda Guerra Mundial, conduzindo a humanidade ao sucesso da aplicação prática da teoria de controle em malha fechada, que posteriormente foi amplamente aplicada entre as décadas de 1950 e 1960. O sucesso demonstrado na aplicação desta teoria gerou um alto interesse em incorporá-la na agroindústria. Segundo Mousazadeh (2013) e Ming *et al.* (2009), nas décadas de 1950 e de 1960, foram testados os primeiros protótipos de tratores autônomos que incorporavam o conceito dos sistemas de controle em malha fechada, e que utilizavam um cabo guia como ferramenta de guiagem.

O grande interesse existente no desenvolvimento de sistemas de auto-guiagem para tratores na área agrícola, demandou a utilização de sensores que permitissem medir a distância lateral entre o veículo e a cultura. Nos trabalhos desenvolvidos por Tillet (1991) e Wilson (2000), foram realizadas revisões bibliográficas relativas à aplicação de diversos tipos de sensores na guiagem automática de veículos agrícolas, abrangendo desde o uso de cabos guia até sensores ópticos, entre outros.

Em concordância com o reportado por Wilson (2000) e Ming *et al.* (2009), durante a década de 1980 foi valorizado o potencial de combinar computadores e sensores de imagem, com o intuito de gerar sistemas de guiagem baseados em visão computacional. Consequentemente, durante meados dos anos 1980, pesquisadores da *Michigan State University* e da *Texas A&M University* realizaram estudos sobre a guiagem baseada em visão computacional; durante a mesma década, um grupo de pesquisa em robótica da *University of Florida*, cujo foco era a colheita de laranja usando visão computacional, reportaram os seus resultados (HARREL *et al.*, 1990). Segundo Sistler (1987), Kondo e Kawamura, apresentaram um robô de colheita de frutas que foi desenvolvido no Japão. A detecção das frutas era realizada através de um sistema de visão computacional, que também era empregado para guiar um manipulador no processo da colheita. Também no Japão, um grupo de pesquisadores desenvolveu um veículo autônomo, com o intuito de realizar tarefas de pulverização de substâncias químicas e pesticidas na cultura (SISTLER, 1987). Harries e Ambler (1981), apresentam um sistema de guiagem para um trator agrícola usando sensores ópticos para evitar o contato do veículo com a cultura.

Figura 2.1 Protótipo de robô móvel agrícola

Fonte: **Garcia *et al.* (2011).**

No caso da década de 1990, a disponibilidade de sensores ópticos baseados na tecnologia *laser*, contribuiu com a melhoria das aplicações orientadas aos sistemas de auto-guiagem em veículos agrícolas (WILSON, 2000 e TILLET, 1991). Não obstante, a popularização e redução de custos dos microcomputadores, Além dos avanços alcançados na área de processamento de imagem, levaram ao desenvolvimento de sistemas de auto-guiagem baseados em visão computacional (WILSON, 2000; BILLINGSLEY e SCHOENFISCH, 1997; MARCHANT *et al.*, 1997 e HAGUE *et al.*, 1997). Em particular, o protótipo apresentado no trabalho documentado em Hague *et al.* (1997) se exemplifica uma abordagem de auto-guiagem baseada em visão computacional para o protótipo mostrado na Figura 2.1. Este robô móvel foi desenvolvido pela empresa *Tillett and Hague Technology Ltd* a qual se dedica ao desenvolvimento e pesquisa em tecnologia para a automação do setor agrícola e de setores afins. Esta empresa aplicou o protótipo mencionado no desenvolvimento de um sistema para reduzir o uso de produtos agroquímicos aplicando-os seletivamente. Este sistema, basicamente classificava em tempo real as ervas invasoras na cultura detectando-as pelo uso da visão computacional, e tomava decisões sobre a aplicação seletiva de produto químico. O deslocamento do veículo se baseava no uso do sistema GPS (*Global Positioning System*) e outros sensores adequados para tal tarefa.

A tabela 2.1, assim como a tabela 2.2, estão baseadas na informação fornecida em Mousazadeh (2013), a qual está orientada a generalizar tipos de sensores, algoritmos, controladores de esterçamento e o histórico de contribuições. Todo orientado à guiagem autônoma de veículos agrícolas de acordo com as respectivas revisões bibliográficas consideradas nesta tese. Em concordância, na tabela 2.1 pode-se observar que a primeira coluna apresenta diversos tipos de sensores utilizados, em quanto a segunda coluna apresenta os algoritmos reportados na literatura. Tanto para aprofundar nos tópicos acerca de sensores e algoritmos, os trabalhos publicados em Borestein *et al.* (1996); Thrun *et al.* (2005) e Siegwart *et al.* (2011) são recomendados. A terceira coluna da tabela 2.1 lista algumas das diversas técnicas associadas com as estratégias de controle de esterçamento de mais aplicadas. Pode-se notar que para todas as colunas, no final há se incluído pontos suspensivos com o intuito de destacar que respectivo campo de desenvolvimento encontra-se aberto à pesquisa.

Tabela 2.1 Sensores, algoritmos e estratégias de controle comuns na guiagem de veículos agrícolas
Fonte: Mousazadeh (2013).

<i>Sensores</i>	<i>Algoritmos</i>	<i>Controle de esterçamento</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Visão computacional. • RTK-GPS. • Sensores Mecânicos. • Sensores Inerciais. • GDS • Sensores ultrassônicos • FOG • LADAR • LIDAR • Sensores Óticos. • Potenciômetros. • Receptores RF. • Sensores piezoelétricos. • NIR. • Sensores acústicos. • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Dead Reckoning. • Métodos estatísticos. • Transformada Hough. • Lógica Fuzzy. • Algoritmos genéticos. • Filtro de Markov. • Filtro de Kalman. • Processamento de Imagem. • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Controle em malha aberta. • Controle PID. • Controle Fuzzy PID. • Controle Adaptativo. • ...

Adicionalmente às pesquisas reportadas na tabela 2.2, considera-se importante mencionar mais algumas, particularmente correspondendo aos resultados reportados desde o ano 2000, dado que estas contribuíram de maneira importante à motivação que levou ao

desenvolvimento apresentado nesta tese em capítulos a seguir. Em particular, na década de 2000, utilizaram-se como exemplo vários robôs móveis listados em Wilson (2000); Reid *et al.* (2000); Torii (2000) e Mousazadeh (2013), dos quais se toma como exemplo para apresentar nesta tese:

Hortibot

O Hortibot, descrito em Jørgensen *et al.* (2007), é um robô móvel autônomo (Figura 2.2) que foi coordenado pelo *Danish Institute of Agricultural Sciences* da Dinamarca. Este protótipo foi projetado para remover ervas invasoras em uma horta, suportando a sua movimentação no controle da propulsão das suas 4 rodas e no esterçamento independente das mesmas, as quais deviam se deslocar entre fileiras de cultura de uma horta (É importante ressaltar que o que devia se deslocar entre fileiras eram as rodas e não o corpo todo do robô). A detecção de fileiras de cultura se realizava usando um sistema de visão estéreo.

Figura 2.2 Robô Móvel Hortibot

Fonte: Jørgensen (2007).

Protótipo 4WSD

Este protótipo descrito em Bakker *et al.* (2010) consiste em um robô móvel agrícola com quatro rodas independentemente propulsáveis e esterçáveis, o qual apresenta-se na Figura 2.3. A energia requerida para o deslocamento do veículo é fornecida através de um motor a diesel, adicionalmente, o esterçamento e a propulsão das rodas são realizados a partir de um circuito eletro-hidráulico apropriadamente instalado. Este protótipo foi projetado para se deslocar entre fileiras de cultura de beterraba sacarina, de forma que as dimensões do veículo deviam ser apropriadas para este tipo de plantio. Segundo Bakker *et al.* (2010), na Holanda, a largura para máquinas de capinagem mecânica para cultura de beterraba sacarina esta padronizada em 1.50m, de maneira que a largura do protótipo corresponde a esta medida.

Considerando que o espaçamento entre fileiras da cultura em questão é de $0.50m$, em consequência o veículo cobre 3 caminhos de cultura, tendo espaço suficiente para o estercem-no das rodas já que elas são de uma largura de $0.16m$. O protótipo da Fig. 2.3 conta com diversos sensores que permitiram abordar a navegação desde diversas estratégias como as mencionadas na tabela 2.1 (Algoritmos), dado que o protótipo conta com diversos sensores como GPS, *encoder* nas rodas, câmeras para visão computacional, sensores ultrassônicos e sensores ópticos.

Figura 2.3 Robô móvel com 4 rodas esterçáveis

Fonte: **Bakker et al. (2010).**

No caso de resultados reportados posteriormente ao ano 2012, é possível encontrar grupos de pesquisa trabalhando em robótica agrícola na Austrália, Ásia, Europa, e Américas (CHEEIN e CARELLI, 2013; BERGERMAN *et al.*, 2015). Pode-se citar: a pesquisa desenvolvida por Bayar (2013), a qual apresenta os resultados alcançados no desenvolvimento de um projeto de pesquisa intitulado *Comprehensive Automation for Specialty Crops project (CASC)*. Este projeto foi realizado no Departamento de Engenharia Mecânica da *Middle East University* em Ankara na Turquia em parceria com o Instituto de Robótica da Universidade *Carnegie Mellon* - EUA. Esta contribuição utiliza o veículo que é observado na Figura 2.4(a) com o intuito de se deslocar de modo autônomo em longas distâncias nos caminhos em cultura de árvores frutíferas, apresentadas na Figura 2.4(b). A informação relacionada ao posicionamento do veículo que é empregada no controlador embarcado é proveniente de um sistema de posicionamento de alta precisão RTK-GPS;

Shalal *et al.* (2015) apresentam resultados relacionados à navegação autônoma de um robô móvel que pode ser observado na Figura 2.5 em cultura de frutas. O seguimento do caminho de cultura entre as fileiras de árvores foi desenvolvido a partir do uso de um sistema de detecção dos troncos das árvores. Tal sistema é baseado na fusão sensorial dos dados provenientes de uma câmera e de um sensor *scanner laser* 2D.

Figura 2.4 Projeto CASC

Fonte: **Bayar (2013)**.

Figura 2.5 Plataforma robótica CoroWare

Fonte: Shalal et al. (2015).

Tabela 2.2 Avanços técnicos em veículos agrícolas autônomosFonte: **Mousazadeh (2013).**

Ano	Avanço
1924	Primeira patente de trator com esterçamento automático (WILLROT, 1924).
1941	Trator com controle de esterçamento usando um cabo guia (ANDREW, 1941).
1950	Primeiros protótipos de tratores autônomos que usavam um cabo de referência para a guiagem (MING <i>et al</i> , 2009).
1968	A ideia de usar cabos enterrados para auxiliar o esterçamento autônomo foi proposta pela primeira vez (AGHKHANI e ABBASPOUR, 2009).
1974	Desenvolvimento de um trator com esterçamento autônomo baseado na traça dos sulcos (AGHKHANI e ABBASPOUR, 2009).
1978	Modelos veiculares para um trator usando esterçamento articulado (WEISE <i>et al.</i> , 2000).
1980	O potencial para combinar computadores com sensores de imagem providenciou oportunidades para gerar sistemas de guiagem usando visão computacional (MING <i>et al</i> , 2009).
1991	Uso de um par de rádio-balizas para triangular a posição em campo (STENTZ <i>et al</i> , 2001).
1997	Uso de um algoritmo para realinhamento baseado em filtro de Kalman (GUO <i>et al</i> , 2003).
2001	Metodologia baseada em mapas para implementação de operações autônomas em campo (HAN <i>et al</i> , 2001).
2002	Desenvolvimento de um trator autônomo para realização de todo tipo de tarefas em campo (KISE <i>et al</i> , 2002).
2003	Uso do filtro de Kalman para estimar posição, velocidade e orientação (GUO <i>et al</i> , 2003).
2004	Desenvolvimento de um Sistema de monitoramento de áreas de turfeira usando um escâner <i>laser</i> em um robô agrícola (MIZUSHIMA <i>et al</i> , 2002).
2005	Controle fuzzy para guiagem autônoma de um robô de floresta (ANDERSON <i>et al</i> , 2005).
2005	Geração de mapas 3-D usando <i>scanner laser</i> , GPS-RTK (YOKOTA <i>et al</i> , 2010).
2007	Controle de seguimento de trajetória baseado em redes neurais BP e GIS para mapeamento de caminhos para um robô plantador de arroz (LUO e ZHANG, 2007).
2007	Sincronização do deslocamento para frente de dois veículos experimentais (maestro - escravo) para autopropulsão em fileiras de árvores frutíferos (LEE <i>et al</i> , 2007).
2008	Um sistema de detecção de fileiras em uma cultura de beterraba sacarina (BAKKER <i>et al</i> , 2008).
2009	Avaliação da efetividade de sistema de medição baseado em <i>laser</i> na detecção de objetos externos em culturas em pé (DOER <i>et al</i> 2009).
2010	Projeto de uma plataforma robótica autônoma usada para capinar (BAKKER <i>et al</i> , 2010).
2011	Deteção de plantas e mapeamento para robôs agrícolas usando um sensor LIDAR 3D (WEISS e BIBER, 2011).
2012	Robô agrícola para seguimento de fileiras de cultura usando visão computacional (XUE <i>et al</i> , 2012).

Figura 2.6 Plataforma robótica empregada por Hiretmath et al., (2014)

Fonte: **Hiretmath et al. (2014).**

Figura 2.7 Robô móvel Tuscarora.

Fonte: **Bayar et al. (2015).**

Na literatura da área, a contribuição de diferentes autores evidencia que recentemente existe uma tendência de desenvolvimento de sistemas de navegação autônoma entre fileiras de cultura sem a dependência do GPS nem de sensores inerciais. Sobre isso, pode-se citar o trabalho publicado por: Hiremath *et al.* (2014) publicaram os resultados alcançados no controle de navegação de uma plataforma robótica (Figura 2.6) com o emprego de um sensor LIDAR 2D para detectar e determinar as fileiras de milho entre as quais o veículo deve-se deslocar; Zhang *et al.* (2015), apresenta o uso de um sensor LIDAR 2D como elemento fundamental de percepção para registrar dados em 3D e que são usados na navegação de um robô móvel entre fileiras de árvores; o trabalho publicado por Bayar *et al.* (2015) em que foi proposta a implementação de um sistema de controle baseado no modelo para que o robô móvel *Tuscarora* (Figura 2.7) conseguisse percorrer os caminhos entre fileiras de árvores frutíferas. A metodologia proposta não depende de um sistema de posicionamento baseado em GPS; uma técnica para realizar mapeamento em sulcos de árvores frutíferas é apresentada no trabalho publicado por (GIMENEZ *et al.*, 2015). Esta metodologia propõe o mapeamento do ambiente agrícola sem o uso de sistemas de auto localização como o GPS, nem unidades inerciais ou odometria. Toda a percepção é baseada apenas em um sensor LIDAR instalado na frente do robô, como apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8 Robô Pioneer 3-AT (P3-AT) usado na pesquisa do Gimenez et al., (2015)

Fonte: **Gimenez *et al.* (2015).**

Adicionalmente ao desenvolvimento de pesquisas em ambiente acadêmico, desde a década de 2010 é possível encontrar na Internet várias empresas dedicadas à configuração e a

aplicação de soluções agrícolas baseadas em robôs móveis, tal como é reportado por (TOBE, 2014). Segundo o autor, pode-se citar como exemplo: o AgroBOT SW6010 e o AGSHydro que são robôs móveis projetados para serem empregados em funções de suporte na cultura de morangos. O AgroBOT pode ser observado na Figura 2.9.

Figura 2.9 Plataforma robótica AgroBOT

Fonte: Tobe (2014).

A empresa Wall-Ye desenvolve projetos de robótica móvel agrícola para trabalhos de suporte em vinhedos. Alguns dos modelos produzidos por essa empresa são apresentados na Figura 2.10.

Figura 2.10 Wall-Ye

Fonte: Tobe (204).

O robô móvel “todo-terreno” Grizzly (Figura 2.11) é produzido pela empresa Clearpath e possui o desempenho de um trator agrícola.

Figura 2.11 Robô móvel Grizzly

Fonte: **Tobe (2014).**

A empresa Harvest Automation apresenta o sistema robótico móvel HV-100 (Figura 2.12) que possui a habilidade de realizar tarefas de manuseio de materiais em ambientes indoor e outdoor, tal como o ambiente agrícola.

Figura 2.12 Robô móvel HV-100 oferecido pela empresa Harvest Automation.

Fonte: **Tobe (2014).**

A empresa Rowbot apresenta o seu produto, o robô móvel RowBOT (Figura 2.13), o qual é uma plataforma multiuso que percorre os caminhos de cultura de milho utilizando um sistema auto-localização por GPS, além de outros sensores embarcados para evitar bater na cultura.

Figura 2.13 Robô móvel da empresa RowBOT

Fonte: **Tobe (2014).**

Com a participação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, conta-se com o protótipo robótico agrícola apresentado na Figura 2.14 e o AgriBOT que é apresentado na Figura 2.15 (TABILE *et al.*, 2011; TABILE, 2012). Os dois protótipos apresentados atualmente são objeto de estudo e constantes melhorias.

Figura 2.14 Protótipo robótico agrícola do Departamento de Engenharia Mecânica na USP-EESC

Fonte: **Tabile *et al.* (2012).**

Figura 2.15 Protótipo robótico agrícola do AgriBOT do Departamento de Engenharia Mecânica na USP-EESC

Fonte: **Tabile (2012).**

2.2 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se uma revisão bibliográfica relacionada com pesquisas sobre o uso de robôs móveis na agricultura, demonstrando que o desenvolvimento tem uma evolução contínua desde a década de 1920. Pode se notar que o avanço tecnológico da humanidade, há impactado até um ponto no qual já na atualidade se estabeleceram empresas que ofertam comercialmente robôs móveis para uso na agricultura.

O contínuo desenvolvimento tecnológico permite determinar que a pesquisa orientada à configuração de robôs móveis para uso agrícola, se constitui em um campo aberto, levando em conta que na atualidade a agricultura ainda requer soluções que melhorem a sua produtividade. Dessa forma, o desenvolvimento de novas plataformas robóticas, a aplicação de técnicas de navegação não aplicadas em robôs móveis agrícolas, além do desenvolvimento de novas técnicas de navegação, representa um espaço para o estabelecimento de contribuições inovadoras.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos relacionados à configuração da plataforma robótica móvel *#elvis-3.1*. Inicialmente, apresenta-se uma descrição geral do protótipo e dos componentes embarcados em sua estrutura. Posteriormente é feita uma apresentação da metodologia executada para o projeto de um sistema de controle em malha fechada, aplicado ao controle de caminho de cultura agrícola. Finalmente, especificam-se as condições para a realização de diversos testes.

3.1 Descrição Geral do Robô Móvel *#Elvis-3.1*

No Laboratório de Robótica Móvel (LabRoM), do grupo de Mecatrônica da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (USP-EESC), foi desenvolvida uma plataforma denominada HELVIS-1 (*Hybrid Electric Vehicle in Low Scale*), a qual é descrita em detalhes em Sampaio *et al.* (2011), e que pode ser observada na Figura 3.1. O protótipo mencionado passou por modificações de forma a configurar um veículo exclusivamente elétrico, que devido ao histórico do protótipo recebeu o nome *#Elvis-2* e pode ser observado na Figura 3.2.

Segundo o reportado em Borrero *et al.* (2014), experimentos iniciais foram realizados no *#Elvis-2*, os quais permitiram obter conclusões parciais sobre o seu desempenho em ambiente *outdoor*, conduzindo à construção de uma nova plataforma com maiores dimensões, de

acordo com o desenho CAD apresentado na Figura 3.3; a nova plataforma é apresentada na Figura 3.4. Esta plataforma foi nomeada *#Elvis-3*.

Figura 3.1 Plataforma HELVIS-1

Fonte: **Sampaio et al. (2011).**

O *#Elvis-3* foi reconstruído desde a abordagem apresentada e discutida em Velásquez (2015), trabalho que foi orientado à caracterização da plataforma. Esse trabalho serviu como guia na realização de experimentos que conduziram a modificações estruturais, gerando-se a plataforma *#Elvis-3.1*.

Figura 3.2 Visão geral do *#Elvis-2*

Fonte: **Borrero et al. (2014).**

Em geral, todas as versões do protótipo *#Elvis* correspondem a um veículo do tipo “*car-like*”, já que a sua manobrabilidade depende do esterçamento das rodas frontais do protótipo. Especificamente nas versões 2 e 3.X do *#Elvis*, um subsistema de propulsão assim como um subsistema de esterçamento atuam sobre as rodas dianteiras do veículo.

No caso particular do subsistema de esterçamento, este era acionado a partir da atuação de um servo. Contudo, foi necessário reformar este subsistema de maneira a ganhar maior torque, gerando-se a última versão plataforma, a qual foi denominada *#Elvis-3.1*. No *#Elvis-3.1*, o atuador sobre o subsistema de esterçamento passou a ser um motor DC fabricado pela empresa MAXON MOTORS, que devidamente acoplado a um parafuso de potência, transfere o seu torque ao resto do mecanismo de esterçamento. O subsistema de esterçamento da plataforma *#Elvis-3.1* será apresentado com mais detalhe na seção 3.2.

As dimensões da plataforma foram conservadas desde versão 3, o que pode ser observado na Fig. 3.3, evidenciando-se no desenho CAD da Fig. 3.5(a) que corresponde ao *#Elvis-3.1*. Em concordância, esta última versão da estrutura do robô conta com um chassi de 0,65m de comprimento, o qual está suportado por 4 rodas com um diâmetro de 0,15m e 0,08m de largura, de tal forma que o chassi se posiciona a 0,05m acima do solo. O veículo conta com uma distância entre eixos de 0,4m e a separação entre os discos rotores das rodas frontais é de 0,225m. O desenho CAD da Fig. 3.5 (a) descreve os dispositivos que foram embarcados na estrutura. De acordo com isso, além do chassi e das rodas, *#Elvis-3.1* conta com o seguintes itens embarcados: 1 - um sensor LIDAR Hokuyo UTM30LX; 2 - o arranjo para a propulsão; 3 - o arranjo para o esterçamento das rodas frontais; 4 - um computador industrial ADVANTECH ARK 1122H; 5 - um conjunto de baterias LiPo para o computador e os sensores; 6 - uma unidade inercial IG500N; 7 - uma antena GPS; 8 - um conjunto de baterias LiPo para os mecanismos de propulsão e esterçamento; 9 - uma placa EPOS-2 24/5; 10 - uma placa EPOS-2 50/5 e 11 - um roteador de rede sem fio. A Figura 3.5(b) apresenta uma imagem do *#Elvis-3.1*.

A Figura 3.6 apresenta informação adicional relacionada com as dimensões do *#Elvis-3.1*, podendo-se observar que a base de suporte ao sensor inercial encontra-se a uma altura de 0,24m; o chassi é constituído por uma placa de alumínio de espessura de 2mm e sobre ele, todos os dispositivos e mecanismos são colocados. Os sensores LIDAR instalados foram colocados sobre uma base de forma que o plano de varredura está acima dos 0,155m e abaixo dos 0,2m.

Figura 3.3 Desenho CAD do protótipo #Elvis-3

Fonte: Velásquez (2015).

Figura 3.4 Plataforma #Elvis-3

Fonte: Velásquez (2015).

Figura 3.5 Plataforma #Elvis-3.1. (a) Representação CAD; (b) O protótipo

Figura 3.6 Vistas lateral e frontal do hElvis-3.1

3.1.1 Subsistema de Propulsão

Figura 3.7 Diagrama de blocos geral do sistema de propulsão

O subsistema eletromecânico representado na Figura 3.7 apresenta de forma geral os blocos funcionais necessários para o funcionamento do subsistema de propulsão. De acordo com o diagrama, pode-se observar que a atuação do subsistema de propulsão do #Elvis-3.1 está baseada no controle de velocidade angular em revoluções por minuto (rpm) de um motor Maxon EC-4Pole fabricado pela empresa Maxon Motors (PORTAL MAXON MOTORS PART NUMBER 309756, 2013). Esse motor é controlado por uma placa de controle e potência conhecida como EPOS2 50/5, que também é fabricada pela empresa Maxon Motors (EPOS2 50/5, 2013).

Figura 3.8 Acoplamento DKN-15/26 da empresa Kalatec

Fonte: **Portal Kalatec (2015).**

A informação relacionada com a rotação que se deseja alcançar e manter no motor de propulsão (rpm_d) é fornecida através de um dispositivo digital externo por meio de um barramento de dados serial RS-232. O alcance e manutenção dos rpm_d corresponde a uma função assumida por um controlador de malha fechada embarcado na placa EPOS2 50/5, a

qual recebe a informação relativa ao *set point* (rpm_d). O valor real de rpm é medido por um *encoder* acoplado ao motor e é realimentado, de forma que esse sinal é comparado com a condição desejada gerando-se um sinal de erro. O sinal de erro é entregue ao controlador que calcula um sinal de controle que será aplicado no motor (VELÁSQUEZ, 2015).

Figura 3.9 Imagem subsistema de propulsão

O eixo de saída do motor Maxon é ligado a um *encoder* (PORTAL MAXON PART NUMBER 225778, 2013) e a um redutor (PORTAL MAXON PART NUMBER 326661, 2013). A velocidade angular e o torque na saída do motor Maxon são transmitidos até as rodas através do uso de um arranjo mecânico de forma que o eixo de saída do redutor é acoplado a um cardam através de um acoplamento flexível de referência do fabricante Kalatec: DKN-15/26 apresentado na Figura 3.8. O cardam é acoplado a um mecanismo diferencial, o qual conta com dois eixos de saída conectados diretamente às rodas dianteiras do protótipo. Na Figura 3.9 apresenta-se uma fotografia relativa ao subsistema de propulsão.

Arranjo Motor, Redutor e *Encoder*

Segundo a folha de dados do fabricante, o motor de referência 309756 (Figura 3.10) é um motor sem escovas que precisa de uma alimentação de 24V, apresenta um consumo nominal de corrente de 5,7A, a faixa de velocidade vai desde 0 até 16.700 rpm e torque nominal de 61,9 mNm . O eixo de saída do motor está acoplado a um redutor planetário (referência 326661) com uma redução de 23:1 e um torque máximo de 4 Nm . O eixo de saída do redutor

tem um diâmetro de 10mm. A parte externa do redutor é apresentada na Figura 3.11 e a parte interna na Figura 3.12 (VELÁSQUEZ, 2015).

Figura 3.10 Motor Maxon EC-4Pole
Velásquez (2015).

Figura 3.11 Redutor Maxon
Fonte: **Velásquez (2015).**

Figura 3.12 Planetário do redutor Maxon
Fonte: **Velásquez (2015).**

Para medir a velocidade angular do motor de propulsão foi usado um *encoder* (referência 225778, Maxon Motor) de 3 canais com uma resolução de 500 contagens por volta, máxima velocidade mecânica é 24.000rpm e frequência máxima de operação de 200 KHz. A Figura 3.13 representa a montagem do *encoder* no motor.

Figura 3.13 *Encoder* usado no motor Maxon

Fonte: **Velasquez (2015).**

Placa EPOS2 50/5

Figura 3.14 Placa EPOS2 50/5

Fonte: **Portal Maxon Part Number 347717 (2015).**

A placa Epos2 embarcada no #Elvis-3.1, de referência 50/5, (Figura 3.14) também é fabricada pela empresa Maxon motor. Segundo o fabricante (PORTAL MAXON PART NUMBER 347717), a Epos2 50/5 é um controlador digital inteligente. Devido a suas características, a Epos2 tem a capacidade de controlar motores DC com escovas e motores EC

sem escovas mediante o uso de sensores Hall ou *encoders* digitais. O uso de uma comutação senoidal com o controle de vetores de espaço faz com que a Epos2 possa oferecer a possibilidade de controlar um motor EC sem escovas com uma ondulação de torque mínima e um baixo nível de ruído (VELASQUEZ, 2015).

A placa Epos2 50/5 conta com três modos de operação: posição, velocidade e controle de corrente. Uma etapa inicial de configuração desta placa é requerida. Uma das formas de realiza-la é através do *software* fornecido pelo fabricante (*Epos Studio*) (VELASQUEZ, 2015). Uma vez que a placa tenha sido configurada, o seu respectivo uso na propulsão do #Elvis-3.1 pode ser abordado com a aplicação de comandos utilizando uma linguagem de programação como C, C++, C# ou *Visual Basic*, em concordância com o especificado na biblioteca “EposCmd”, a qual é fornecida pelo fabricante em seu *sítio web*. Os protocolos de comunicação suportados pela placa Epos2 são RS232, USB (serial) ou CAN. A alimentação mínima requerida é de 11 V e a máxima suportada é de 50 V, sendo o valor definido pela alimentação do motor, que deve estar nessa faixa de tensões.

3.1.2 Subsistema de esterçamento

No caso de veículos do tipo “*car-like*”, como no caso do protótipo #Elvis-3.1, o esterçamento das rodas frontais (do inglês *FWS: Front-wheel-steering*) é fundamental para a realização de percursos com curvatura durante o deslocamento do veículo. Portanto, a manobrabilidade do #Elvis-3.1, depende do controle do esterçamento das rodas frontais.

No #Elvis-3.1 se usa o modo de esterçamento tipo Ackerman, o qual é amplamente utilizado por apresentar considerações cinemáticas adequadas para veículos se deslocando a baixas velocidades. (JAZAR, 2013 e RAJAMANI, 2006).

A Condição de Ackerman

Quando um veículo do tipo FWS, como o representado na Figura 3.15, desloca-se para frente enquanto suas rodas dianteiras se encontram esterçadas por causa da adequada atuação de um mecanismo de esterçamento, o centro de massa do veículo (*C*) descreverá uma trajetória circular com um raio de curvatura (*R*) cujo valor pode ser calculado a partir do uso da equação que define a condição de Ackerman. O uso da distância formada entre os pontos $\overline{OD}$ a partir da região interior do carro em relação à curvatura, como representado na Figura 3.16, permite encontrar as equações correspondentes ao esterçamento da roda interior do veículo.

Figura 3.15 Veículo FWS e a condição de Ackerman

Fonte: Jazar (2013).

Figura 3.16 Base do equacionamento para o esterçamento de um veículo FWS segundo a condição de Ackerman no caso das rodas interiores.

$$R_1 = \frac{1}{2}w + \frac{l}{\tan \delta_i} = -\frac{1}{2}w + \frac{l}{\tan \delta_o} \quad \text{Eq. (3.5)}$$

E, portanto:

$$\cot \delta_o - \cot \delta_i = \frac{w}{l} \quad \text{Eq. (3.6)}$$

A Equação 3.6 é conhecida como a condição de Ackerman (JAZAR, 2013).

Figura 3.18 Modelo cinemático simplificado da bicicleta equivalente ao veículo FWS

Fonte: **Jazar (2013)**

O modelo simplificado da bicicleta representado na Figura 3.18 facilita a determinação do raio R de curvatura, quando o veículo se desloca para frente descrevendo uma curvatura. Pode-se observar que tanto as rodas dianteiras quanto as traseiras do veículo de 4 rodas FWS são reduzidas a uma roda na frente e uma roda atrás, respectivamente, de forma que as duas rodas se encontram posicionadas em relação ao eixo longitudinal central e coincidindo com a grandeza R_l . O raio de curvatura R é perpendicular ao vetor de velocidade v no centro de massa C . Usando a geometria do modelo da bicicleta obtêm-se as expressões definidas nas Equações 3.7 e 3.8:

$$R^2 = a_2^2 + R_1^2 \quad \text{Eq. (3.7)}$$

$$\cot \delta = \frac{R_1}{l} = \frac{1}{2}(\cot \delta_i + \cot \delta_o) \quad \text{Eq. (3.8)}$$

Uma análise trigonométrica realizada no modelo representado na Figura 3.18 leva a determinar a expressão definida na Equação 3.9:

$$R = \sqrt{a_2^2 + l^2 \cot^2 \delta} \quad \text{Eq. (3.9)}$$

Assumindo velocidades de deslocamento do veículo menores que 10km/h e ângulos de escorregamento das rodas muito próximos a zero, é possível utilizar a condição de Ackerman (RAJAMANI, 2006). Nessas condições, pode-se considerar que não há presença de forças laterais nos pneus, o que segundo Rajamani (2006) e Jazar (2013) se define como uma condição de esterçamento cinemático.

Esterçamento Cinemático (Ackerman) e o Mecanismo Trapezoidal

Figura 3.19 Partes principais do sistema de esterçamento de um veículo FWS

Fonte: Portal UF (2015).

O mecanismo de esterçamento trapezoidal que é mostrado na Figura 3.19 está baseado no mecanismo de 4 barras (JAZAR, 2013). Este mecanismo tem sido utilizado por mais de 100 anos como conector de esterçamento entre as rodas de veículos “car-like” e o seu respectivo atuador, que usualmente corresponde ao volante controlado manualmente pelo motorista (JAZAR, 2013; KHRISTAMTO *et al.*, 2015). No caso de veículos FWS, a atuação do esterçamento das rodas frontais depende do emprego de um mecanismo dedicado a esta tarefa, o qual é comumente conhecido como o mecanismo de esterçamento de Ackerman. Na Figura 3.19 é apresentado um esquema que ajuda a compreender as principais partes de um sistema de esterçamento, o qual é composto fundamentalmente pelas seguintes partes principais: a coluna esterçamento junto com o seu respectivo eixo; uma caixa redutora de

esterçamento (geralmente do tipo pinhão-cremalheira) e a haste de ligação da direção e os braços de esterçamento. Basicamente, um torque aplicado ao volante pelo motorista com o objetivo de esterçar as rodas dianteiras para a direita, esquerda ou inclusive manter as rodas direcionadas à frente, faz com que o torque seja transmitido pela coluna de esterçamento até a caixa redutora que serve para aumentar o momento aplicado no volante. Um submecanismo trapezoidal foi projetado para esterçar as rodas a partir do momento transmitido pela caixa redutora (PORTAL UF, 2015).

A mudança na direção do deslocamento de um veículo do tipo “*car-like*” depende da atuação do mecanismo trapezoidal para o esterçamento das rodas frontais. Na Figura 3.20 é mostrado um esquema que representa o mecanismo trapezoidal de esterçamento atuando quando não se executa esterçamento nas rodas (esterçamento nulo). Tal como se pode observar, as rodas dianteiras (1) encontram-se ligadas às barras (2) que fazem parte do eixo dianteiro do veículo (3), o qual se encontra acoplado aos braços de esterçamento (4) através dos pivôs em (5), assim como também se encontra conectado com a haste de ligação da direção (6) através dos pivôs em (7). A haste de ligação da direção conta com uma caixa redutora (8), a qual se acopla com a coluna de esterçamento previamente apresentada na Figura 3.19.

De acordo com a representação da Figura 3.20, o mecanismo de esterçamento faz com que as rodas dianteiras se mantenham com esterçamento nulo, o que implica que o veículo terá que seguir um caminho em linha reta se deslocando para frente ou para trás. Segundo o caso especificado, o volante da Figura 3.19 deve estar posicionado de maneira tal que a caixa redutora ((8) na Figura 3.20) mantenha a haste de ligação da direção ((6) na Figura 3.20), de tal forma que os braços de esterçamento (os quais têm um comprimento d), se posicionem fazendo um ângulo β com o eixo longitudinal da roda que corresponde com o seu respectivo lado no veículo. Pode-se notar que o ângulo β é do mesmo valor dos dois lados.

Quando o volante do veículo é acionado para esterçar as rodas dianteiras para a direita ou esquerda, o mecanismo de trapezoidal modifica seu posicionamento. Na Figura 3.21, representa-se o caso no qual o veículo é induzido a esterçar-se à esquerda. Tal como pode-se ver, o mecanismo trapezoidal faz com que a haste de ligação da direção e os braços de esterçamento sejam deslocados gerando o reposicionamento das rodas, facilitando assim o esterçamento do veículo. O mecanismo de esterçamento trapezoidal está configurado de tal forma que quando se precise de esterçamento, este deve ser realizado de maneira que a roda interior se encontre esterçada com um ângulo δ_i de maior valor em comparação com o ângulo

δ_o na roda exterior à curvatura. Em relação à curvatura que o veículo deve realizar, o ângulo de esterçamento da roda interior deve ser maior que o ângulo na roda exterior como está explicado de modo detalhado por (REIMPELL *et al.*, 2001; MALHOTRA, 2006), assim mesmo para todo o mecanismo de esterçamento de veículos de passeio.

Figura 3.20 Representação do mecanismo de esterçamento ressaltando o sub-mecanismo trapezoidal quando não se executa esterçamento

Fonte: **Portal H2ecomarathon (2016).**

Figura 3.21 Mecanismo de esterçamento de um veículo do tipo “car-like” induzindo o seu esterçamento à esquerda

Fonte: **Portal H2ecomarathon (2016).**

Subsistema de Esterçamento no #Elvis-3.1

A manobrabilidade do protótipo #Elvis-3.1 além do subsistema de propulsão dependem da atuação do subsistema de esterçamento. No diagrama de blocos apresentado na Figura 3.22 é representado o subsistema eletromecânico implementado para a atuação no esterçamento das duas rodas frontais do #Elvis-3.1.

Figura 3.22 Diagrama de blocos generalizado do subsistema de esterçamento

O esterçamento é realizado pela atuação de um motor DC da marca Maxon (referência do fabricante: 226802) o qual é controlado por uma placa Epos 2 24/5 com um sistema de controle malha fechada similar ao descrito para o caso da placa Epos2 do subsistema de propulsão. Neste caso, a posição desejada (δ_d) do eixo de saída do motor é fornecida por um dispositivo digital externo. O sinal correspondente à posição real (δ) do eixo de saída do motor é medido por um *encoder*, e é realimentado para comparação com a posição desejada, gerando assim um sinal de erro que ingressa no controlador. O torque e posição no eixo de saída do motor de esterçamento são transferidos a um mecanismo de Ackerman através de uso de um parafuso de potência comumente chamado *fuso*. O mecanismo de Ackerman conta com dois eixos de saída que estão acoplados às duas rodas frontais do #Elvis-3.1.

Conjunto Encoder-Motor-Redutor

O esterçamento das rodas frontais do #Elvis-3.1 é feito por um conjunto *encoder-motor-redutor* que é manufaturado pela empresa *Maxon Motors*. O motor cujo modelo é *REmax29* atua com corrente contínua a uma tensão de alimentação de 12V e 22 W de potência (referência do fabricante: 226802). O eixo de saída que se considera traseiro à estrutura do

motor encontra-se ligado a um encoder incremental (*referência do fabricante: 225805*). O eixo de saída que se considera dianteiro à estrutura do motor está ligado a um redutor (*referência do fabricante: 166938*) gerando uma redução de 33:1.

Placa Epos2 24/5

Figura 3.23 Placa EPOS2 50/5

Fonte: **Portal Maxon Motors Part Number 275512 (2014).**

A placa Epos2 24/5 embarcada no #Elvis-3.1 (Figura 3.23), também é fabricada pela empresa Maxon Motors. O processo de configuração da placa Epos2 24/5 se realiza de maneira similar em comparação ao da placa Epos2 50/5.

Mecanismo Fuso

Figura 3.24 Mecanismo de fuso implementado no #Elvis-3.1 e as suas principais partes

Um mecanismo comumente conhecido como parafuso de potência, parafuso de avanço ou simplesmente fuso é conectado ao eixo de saída dianteiro do motor encarregado de atuar para proporcionar o esterçamento das rodas dianteiras. O fuso é um elemento de transmissão que no caso é utilizado horizontalmente em relação ao chassi do protótipo. Ele está encarregado de transformar o movimento de rotação do motor em movimento linear (translação retilínea), transmitindo também a potência necessária para conseguir esterçar as rodas dianteiras (GALDINO, 2014).

Na Figura 3.24 apresenta-se o mecanismo de fuso implementado no #Elvis-3.1 indicando as suas principais partes. Pode-se observar que o movimento axial da força é transferido ao mecanismo de Ackerman do protótipo através de um braço apropriadamente acoplado ao mecanismo de Ackerman.

3.1.3 Dispositivos embarcados no #Elvis-3.1

O desenvolvimento de experimentos relacionados com o controle para o deslocamento do #Elvis-3.1 exigiu o uso de sensores embarcados na sua estrutura. Neste sentido, foi apropriadamente instalado um sistema inercial cujo modelo comercial é *IG500N* e que é fabricado pela empresa *SBG systems*. Também foi embarcado um sensor LIDAR (*Light Detection and Ranging*) cujo modelo comercial é UTM 30LX e que é fabricado pela empresa HOKUYO. Além destes sensores, também foram instalados dispositivos que serão apresentados em essa seção.

Sistema Inercial IG500N

Figura 3.25 Sistema Inercial IG500N

Fonte: Velásquez (2015).

O sistema inercial *IG500N* apresentado na Figura 3.25 corresponde a um dispositivo que fornece medições relacionadas com a sua localização segundo o sistema GPS além das medições tomadas por uma IMU (do inglês, *Inertial Measurement Unit*) (GROVES, 2008). No trabalho desenvolvido por Velásquez, (2015) é possível encontrar informações detalhadas sobre experimentos realizados para conhecer sobre a precisão do receptor GPS correspondente. No trabalho mencionado também se encontram informações relacionadas com a IMU.

A leitura dos dados relativos às medições realizadas pela unidade inercial *IG500N* é realizada através do uso de um sistema computacional de arquitetura x86 utilizando o sistema de comunicação *RS232*. Essa leitura implica o desenvolvimento de uma aplicação computacional desenvolvida com a linguagem de programação C utilizando as bibliotecas para essa linguagem fornecidas pelo fabricante.

Figura 3.26 Medição da orientação (ψ) do veículo usando o Sistema Inercial *IG500N*

O sensor SBG é usado para fornecer a informação relacionada com o ângulo de orientação medido no veículo (ψ). A Figura 3.26 representa o modo no qual a orientação é medida. Em concordância, a circunferência de cor vermelha representa o rango completo de medição da orientação (ψ). Para o caso da figura em questão, assumindo que o robô está posicionado de tal forma que a sua orientação é de 90° , então o ângulo 0° está localizado à direita do veículo,

enquanto que no lado esquerdo tem-se $+180^\circ$. De acordo com o apresentado, o sensor IMU utilizado não fornece a orientação com valores entre 0° a 360° . Em contraste, a medida da orientação é fornecida com valores entre $+0^\circ$ a 180° e -180° a 0° . O ângulo ψ medido é enviado para o computador embarcado através de uma porta RS232.

Sensor Laser UTM-30LX

Figura 3.27 Sensor LIDAR UTM 30LX da empresa Hokuyo.

Fonte: **Portal Hokuyo (2014).**

O sensor UTM-30LX apresentado na Figura 3.27 corresponde a um sistema LiDAR (do inglês, *Light Detection And Ranging*), o qual fundamentalmente corresponde a um desenvolvimento da tecnologia de detecção remota que mede propriedades da luz refletida a fim de obter a distância ou outra informação sobre um determinado objeto distante (PALLEJÀ *et al.*, 2009). O método mais usado para determinar a distância a objetos distantes usando o sensor LiDAR se baseia na utilização de *laser* pulsado. Em concordância com isso, a distância até um objeto é determinada medindo a diferença de tempo entre a emissão de um pulso *laser* e a detecção do sinal refletido.

A tecnologia LiDAR é aplicada no âmbito da geodesia, arqueologia, geografia, geologia, geomorfologia, sismologia, engenharia florestal, oceanografia costeira e detecção remota e física da atmosfera. O acrônimo LaDAR (do inglês, *Laser Detection and Ranging*) é utilizado predominantemente em contextos militares. O termo "*radar laser*" é também usado, no entanto a tecnologia LiDAR não utiliza ondas de rádio ou micro-ondas, que definem a tecnologia radar (PALLEJÀ *et al.*, 2009).

Figura 3.28 Representação do ângulo de abertura para detecção no sensor UTM- 30LX

Fonte: Hokuyo Automatico (2012).

Segundo o fabricante, o UTM 30LX precisa ser alimentado por uma fonte de 12V DC e tem um consumo nominal de 1A de corrente (PALLEJÀ et al., 2009; HOKUYO AUTOMATICO, 2012). O UTM-30LX tem uma velocidade de varredura igual a 2.400 rpm, trabalha a temperaturas de -10°C até 50°C, sua massa é 210g, sua vida útil é de 5 anos e tem um nível de ruído menor que -25 dB. Este sensor conta com uma fonte *laser* de $\lambda = 905\text{nm}$ para fazer uma varredura total em um ângulo de abertura igual a 270° a qual é particionada em 1.080 passos de forma tal que o sensor conta com uma resolução entre passos de 0,25°. Na Figura 3.28 se representa o ângulo de varredura do sensor LiDAR de forma que o passo 0 representa o primeiro feixe *laser* emitido pelo sensor, assim como o passo 1.080 corresponde ao último feixe *laser* emitido. A região de cor cinza representa a região completa que é possível utilizar para fazer medições com o UTM30LX. Também segundo o fabricante é possível detectar objetos correspondendo à frente de cada passo desde 0,1 m até uma distância máxima 30m. Não obstante, têm-se realizado experimentos para demonstrar o alcance do sensor, os quais foram documentados em (VELÁSQUEZ, 2015).

O sensor UTM 30LX fornece informação sobre a distância na qual foram detectados obstáculos à frente de cada um dos feixes de luz emitidos (para cada um dos 1.080 passos). Porém, através de uma adequada programação das bibliotecas disponíveis para o sensor, é possível configurá-lo para fornecer as medições somente de uma determinada região dentro

do ângulo de varredura disponível. As bibliotecas para a configuração e leitura dos dados do sensor demandam o desenvolvimento de uma aplicação computacional com as linguagens C e C++.

Computador Industrial Advantech

Figura 3.29 Computador ARK-1120 de Advantech

Fonte: **Portal Advantech (2014).**

O #Elvis-3.1 conta com um computador embarcado cujo modelo comercial é o *ARK-1120*, o qual pode ser observado na Figura 3.29. Este dispositivo é um computador de arquitetura x86 comercializado pela empresa Advantech o qual conta com um processador Intel Atom N455 de 1,66 GHz, memória RAM DDR3 de 1 GB e disco rígido de 1 TB. Possui 2 portas de comunicação do tipo USB 2.0 e 4 RS-232. O computador ARK-1120 trabalha com uma alimentação de 12V DC e tem um consumo máximo de potência igual a 10,8W. A sua massa é 0,7 Kg e pode trabalhar a temperaturas de -40°C até 85°C. As suas dimensões são de 133,8 x 43,1 x 94,2mm e ele permite trabalhar com sistemas operacionais como Windows XP, WINDOWS 7, e Linux. Também conta com uma porta RJ45 para conexão Ethernet de 10/100/1000 Mbps e uma porta VGA (do inglês, *Vídeo Graphics Array*) (PORTAL ADVANTECH, 2014). Todos os algoritmos desenvolvidos foram armazenados neste computador.

Roteador *wireless*

A realização de experimentos no #Elvis-3.1 foi planejada de forma que todos os algoritmos relacionados com o seu controle foram programados e implementados diretamente no seu computador embarcado, o Advantech *ARK-1120*. Sendo assim, foi decidido acessar

remotamente este computador através do uso de um roteador que foi instalado para criar uma rede sem fio. O roteador instalado corresponde com a referência comercial *TL-MR3040* que é fabricado pela TP-LINK.

Segundo o fabricante, o roteador *TL-MR3040* tem uma porta WAN/LAN de 10/100 Mbps, uma USB 2.0 para modem 3G/4G e uma porta micro-USB para alimentação. Suas dimensões são 100 x 62 x 16mm, sua massa é 94g e a antena é interna. A velocidade da rede sem fio é de 150Mbps e sua frequência é 2,4 – 2,4835 GHz. O roteador pode trabalhar em temperaturas entre 15°C e 41°C e é compatível com Windows, Linux ou MAC®OS. O TL-MR3040 tem uma bateria interna recarregável de 5V e 2000mAh para um tempo de uso aproximado de 4 horas contínuas.

Fonte de Energia

Figura 3.30 Bateria LIPO do tipo utilizado no #Elvis-3.1

Fonte: **Portal Hobbyking, 2016**

O fornecimento de energia aos dispositivos elétricos, eletrônicos e eletromecânicos instalados no #Elvis-3.1 é feito por dois pares de baterias LiPO (do inglês, *Lithium-ion Polymer*). Na Figura 3.30 é apresentada uma bateria como as empregadas no fornecimento de energia para o #Elvis-3.1. Cada uma das baterias possui 4 células, fornecendo 14.8V DC e 5000mA.

Um par de baterias é utilizado para fornecer energia às placas e motores correspondentes aos subsistemas de propulsão e esterçamento. Outro par de baterias é usado para fornecer energia ao restante dos dispositivos embarcados no #Elvis-3.1.

Dado que o uso de cada um dos dispositivos embarcados no veículo determina a aplicação de tensões máximas de diferente magnitude, o subsistema elétrico implementado conta com etapas de regulação adequadamente configurados e instalados.

3.1.4 Iteração entre dispositivos e Mecanismos no #Elvis-3.1

Como foram instalados diversos dispositivos no #Elvis-3.1, existe uma interação entre eles que determina o adequado funcionamento do veículo na realização da tarefa de controle de caminhos na cultura agrícola.

Figura 3.31 Diagrama de blocos representando a interação entre dispositivos e mecanismos no #Elvis-3.1

Na Figura 3.31 é mostrado um diagrama de blocos representando a interação entre os dispositivos embarcados no #Elvis-3.1, tal que são consideradas duas camadas gerais. No alto nível encontram-se o sensor de orientação IG500N, o sensor LiDAR e o computador ARK1120. Em concordância, as informações correspondentes com a orientação (ψ) medida pelo sensor IG500N e as 1.080 distâncias medidas pelo sensor LiDAR são transferidas ao

computador *ARK1120* usando comunicação serial RS232. Também no alto nível, as informações relacionadas com as *rpm* desejadas (rpm_d) para o motor da propulsão, assim como a distância lateral desejada (y_d) são fornecidas remotamente ao computador embarcado por parte do usuário. No *ARK1120* encontram-se programadas as rotinas de controle de deslocamento do *#Elvis-3.1* que se apresentarão com mais detalhes na subseção 3.2.

De acordo com o apresentado na Figura 3.31, a camada de alto nível o computador recebe os parâmetros externos dos sensores instalados com o intuito de calcular os parâmetros que serão transferidos à camada de baixo nível. De acordo com esse parâmetro externo, o rpm_d é transferido diretamente enquanto que o parâmetro relacionado à posição do parafuso de potência no subsistema de esterçamento (δ_d) é um parâmetro que é calculado usando o controlador apresentado na subseção 3.2. O δ_d corresponde à posição em que se deseja posicionar a força do fuso do subsistema de esterçamento, mas dado que a placa Epos2 24/5 exige um valor numérico (u_d) da respectiva posição, é necessário definir um polinômio que relacione a posição angular com o valor numérico para esta placa, o que será apresentado mais para frente. O valor numérico (u) também é transferido à camada de baixo nível. A troca de informação entre as camadas de controle é realizada com o uso de comunicação RS232.

Especificamente, na camada de baixo nível, o rpm_d é transferido à placa Epos2 50/5, enquanto o (u_d) é transferido à placa Epos2 24/5. As placas Epos2 instaladas contam com a capacidade de calcular e aplicar os sinais de controle necessários nos respectivos motores a partir do uso de controladores embarcados pelo fabricante (VELÁSQUEZ, 2015).

Deve-se ressaltar que os motores de propulsão e esterçamento contam com *encoders* adequadamente instalados. Na Figura 3.31 pode-se notar que os valores instantâneos medidas para as revoluções por minuto (*rpm*) e o ângulo de esterçamento (u) são transferidos às respectivas placas Epos2, que por sua vez envia estas informações ao computador *ARK-1120* na camada de alto nível.

O sistema operacional do computador *ARK1120* é o UBUNTU LINUX 14.04. Os programas realizados para experimentos de avaliação, assim como controle do *#Elvis-3.1* estão elaborados na linguagem de programação C++, os quais são compilados utilizando o compilador g++.

3.2 Desenvolvimento de um Sistema de Controle em malha Fechada H_∞

O protótipo *#Elvis-3.1* foi projetado como um veículo do tipo “*car-like*” que foi convertido em um robô para facilitar o desenvolvimento de experimentos orientados à pesquisa em

navegação autônoma de robôs móveis na área agrícola. Em concordância, foi abordado o projeto de um sistema de controle em malha fechada para governar o deslocamento do protótipo no meio de fileiras retas de cultura. Nesta subseção são apresentadas as diversas considerações que correspondem ao *projeto* do controlador desejado, para posteriormente expor os resultados alcançados.

3.2.1 Seguidor de Muro

Figura 3.32 (a) - Representação do *helvis-3.1* seguindo um muro à sua direita; (b) Configuração utilizada do sensor LIDAR.

A observação das necessidades de controle de caminho de cultura agrícola levou a se considerar que era possível assumir a solução do respectivo problema sabendo que a aplicação pretendida para o *helvis-3.1* é bastante semelhante ao controle de seguimento de um muro lateral reto, o que é representado na Fig. 3.32(a). Dado que o protótipo se desloca para frente, o sistema de controle deve manter o robô afastado a uma distância (y) do respectivo muro, o que exige o desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada. A Figura 3.31 apresenta a interação entre dispositivos de forma que na camada de alto nível o sensor IMU mede a orientação (ψ) do veículo, enquanto que usando o sensor LiDAR se medem as distâncias até os objetos remotos de acordo com o seu correspondente intervalo de varredura. Em conformidade com o representado na Figura 3.32(b), o seguimento de muro foi abordado com o emprego do sensor LiDAR para realizar as suas medições em uma varredura de 720 passos de tal forma que foi definido que o passo 0 corresponde a 0° até que o passo 720 corresponde a 180° .

Para o caso particular de controle seguimento de muro, a medição da distância lateral que separa a região frontal do veículo com a respectiva parede é uma tarefa que é realizada pelo sensor LiDAR com o uso de apenas um dos seus passos disponíveis na varredura configurada. A Figura 3.33 representa três diferentes situações que podem acontecer durante o deslocamento *helvis-3.1* tal que, além do controle de distância lateral, é desejado que o veículo mantenha uma orientação desejada (ψ_d) ao longo do percurso à frente. O ângulo (ψ_d) pode ser comparado com a orientação medida do veículo com o intuito de determinar o erro de orientação ($e_\psi = \psi_d - \psi$) o qual define o valor do passo no sensor LiDAR que será utilizado para medir a distância lateral.

Figura 3.33 Representação para diversas situações do erro de orientação durante o deslocamento do *helvis -3.1*.

Na Figura 3.33 (a) é apresentada uma situação na qual o veículo se desloca para frente com uma orientação do mesmo valor que a orientação desejada, gerando-se um erro de orientação nulo. Diante dessa situação, define-se que o raio *laser* usado corresponde com o passo 0. Na situação representada na Figura 3.3 (b) tem-se que $\psi_d < \psi$ fazendo com que $e_\psi < 0$. Para essa situação, foi observado experimentalmente que é possível manter o passo 0 para leitura do sensor LiDAR. Na Figura 3.33(c) é representada uma situação em que $\psi_d > \psi$ fazendo que com $e_\psi > 0$. Para essa situação, o passo do sensor LiDAR que se utiliza está definido pela Equação 3.10 na qual o índice i representa o passo do LiDAR que será utilizado para a medida de distância e o operador ($\lfloor \cdot \rfloor$) representa o truncamento para o menor valor inteiro.

$$i = \left\lfloor \left(0 + \left\lceil \frac{e_\psi}{0.25} \right\rceil \right) \right\rfloor \quad \text{Eq. (3.10)}$$

Em termos de controle de distância lateral ao muro à direita do veículo como representado na Figura 3.32 e na Figura 3.33(a), a distância lateral à que se deseja que o protótipo se mantenha afastado (y_d), é um parâmetro de entrada ao bloco de controle de alto nível previamente representado na Figura 3.31. As situações apresentadas na Figura 3.33 facilitam também a descrição do que o controlador a ser projetado terá de realizar. Quando a distância lateral medida é menor que a distância desejada ($y < y_d$) tem-se que o erro de distância ($e_y = y_d - y$) é maior do que zero de forma que as rodas dianteiras devem ser esterçadas para se afastar do muro; quando a distância lateral medida é maior que a distância desejada ($y > y_d$) tem-se que o erro de distância é menor do que zero de forma que as rodas dianteiras devem ser esterçadas para que o veículo manifeste tendência de se aproximar do muro. Quando o erro de distância é nulo, as rodas devem se manter com esterçamento nulo.

3.2.2 Projeto e simulação do Sistema de Controle em malha Fechada H_∞

O procedimento realizado prévio à implementação do controlador está relacionado com seu projeto e subsequente avaliação desde os resultados obtidos em simulação. Neste trabalho foi feita a modelagem matemática da planta para desenvolver o sistema de controle em malha fechada que foi embarcado no *helvis*-3.1.

Modelo Cinemático Lateral para um Veículo “Car-Like”

Segundo Rajamani (2006) e Jazar (2006), sob certas hipóteses, é possível desenvolver um modelo cinemático para um veículo cardo tipo “*car-like*” correspondente ao seu deslocamento lateral, descrevendo o seu movimento desconsiderando as forças que o afetam.

O procedimento de projeto do sistema de controle se realizou a partir da definição de um modelo cinemático lateral de um veículo do tipo “*car-like*”. O modelo mencionado foi previamente definido quando se definiu o modelo simplificado apresentado na Figura 3.18. Contudo na Figura 3.34 se redefine o esquema utilizado para determinar as equações do modelo (ASTRÖM *et al.*, 2010).

Como citado anteriormente, assumindo que o veículo realiza um deslocamento sobre um plano, a geração do modelo cinemático pode ser abordada a partir do uso de um sistema simplificado que se extrai a partir da representação lateral plana do veículo de 4 rodas, como o representado na Figura 3.34(a) em que se observa que as duas rodas frontais são representadas por uma roda central; Similarmente, as duas rodas traseiras são representadas por uma única roda central; A distância entre eixos está representada pela grandeza b enquanto que a separação entre o centro de gravidade ($c.g$) e o eixo traseiro se representa com a grandeza a .

Considerando que um veículo definido pelo modelo cinemático apresentado se desloca para frente, pode-se definir como ângulo de esterçamento nulo o posicionamento da roda dianteira quando esta se encontra em paralelo com o eixo longitudinal do veículo. Sempre que o ângulo de esterçamento da roda frontal seja mantido num ângulo diferente de 0° , a orientação do veículo muda e pelo tanto o centro de gravidade do veículo descreverá uma trajetória circular de raio R em torno ao ponto **ICR** (do inglês, *Internal Center of Rotation*).

Figura 3.34 (a) Representação gráfica do modelo cinemático de um veículo tipo *car-like*. (b) Representação gráfica do modelo cinemático simplificado para um veículo *car-like*.

Fonte: **Astrom et al. (2010).**

Em concordância com o modelo cinemático assumido, a Fig. 3.34(b) representa uma descrição do movimento que se baseia no uso das coordenadas X, Y, ψ onde (X, Y) são as coordenadas inerciais relacionadas à localização do centro de gravidade (**CG**), enquanto que ψ descreve a orientação do veículo. A velocidade no **CG** do veículo é denotada por (v) e forma um ângulo β com o eixo longitudinal do veículo. O ângulo β é conhecido como o ângulo de escorregamento do veículo.

O desenvolvimento de um modelo cinemático lateral para o deslocamento de um veículo do tipo “*car-like*” deve considerar certas premissas. A premissa mais forte usada no desenvolvimento do modelo cinemático consiste em assumir que os vetores de velocidade nos pontos de contato com o solo nas rodas tanto traseira como dianteira coincidem com os seus correspondentes eixos longitudinais. Segundo Rajamani (2006), esta premissa é razoável

assumindo baixas velocidades do veículo (p.e.: 5 m/s) porque em baixas velocidades as forças laterais geradas pelos pneus são de baixo valor.

De acordo com o apresentado na Figura 3.34(b), pode-se deduzir o definido nas Equações (3.11) e (3.12).

$$b = R \tan(\delta) \quad \text{Eq. (3.11)}$$

$$a = R \tan(\beta) \quad \text{Eq. (3.12)}$$

Realizando as correspondentes substituições obtém-se a expressão definida na Equação 3.13:

$$\tan \beta = \frac{a}{b} \tan (\psi) \quad \text{Eq. (3.13)}$$

E portanto é possível encontrar a função definida na Equação 3.14 que relaciona o ângulo de escorregamento β e o ângulo de esterçamento δ .

$$\beta(\delta) = \arctan \left(\frac{a}{b} \tan (\delta) \right) \quad \text{Eq. (3.14)}$$

Assumindo que as rodas rolam sem escorregamento e que a velocidade na roda traseira é v_0 , é possível encontrar a partir da Figura 3.34 que a velocidade no centro de gravidade está definida pela Equação 3.15:

$$v = \frac{v_0}{\cos \beta} \quad \text{Eq. (3.15)}$$

O que permite determinar as Equações 3.16 e 3.17, que definem o movimento nesse ponto em relação com o sistema de coordenadas globais:

$$\frac{dx}{dt} = v \cos(\beta + \psi) = v_0 \frac{\cos(\beta + \psi)}{\cos \beta} \quad \text{Eq. (3.16)}$$

$$\frac{dy}{dt} = v \sin(\beta + \psi) = v_0 \frac{\sin(\beta + \psi)}{\cos \beta} \quad \text{Eq. (3.17)}$$

Segundo Aström *et al.* (2010), a mudança da orientação do veículo pode ser definida como a velocidade angular do centro de massa do veículo e dita velocidade angular está definida na Equação 3.19:

$$v = \frac{v_0}{\cos \beta} \quad \text{Eq. (3.18)}$$

$$\dot{\psi} = \frac{v_0}{R} = \frac{v_0}{b} \tan \delta \quad \text{Eq. (3.19)}$$

Quando se assume um ângulo de escorregamento nulo, as Equações 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19, resultam, respectivamente definindo Equação 3.20, 3.21 e 3.22:

$$v = \frac{v_0}{\cos 0} \Rightarrow v_0 = v \quad \text{Eq. (3.20)}$$

$$\dot{x} = v \cos(\psi) \quad \text{Eq. (3.21)}$$

$$\dot{y} = v \sin(\psi) \quad \text{Eq. (3.22)}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos(\beta(\delta) + \psi) \\ v \sin(\beta(\delta) + \psi) \\ \frac{v_0}{b} \tan \delta \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (3.23)}$$

As equações relativas ao esterçamento do veículo, enquanto ele se encontra deslocando para frente, correspondem então às equações não lineares de movimento do sistema que podem ser escritas como se define na Equação 3.23.

De acordo com as condições do projeto, existe um interesse no deslocamento do veículo para frente, descrevendo percursos de linha reta. Em concordância com o anterior, sabendo que se pretende propor a implementação de uma técnica de controle linear, resulta necessária a linearização do modelo não linear (ASTRÖM et al, 2010).

Assumindo que se precisa compreender o desvio lateral do veículo em relação a uma linha reta e estabelecendo que dita linha reta corresponde ao eixo X global, segundo a Figura 3.34 pode-se estabelecer também que o respectivo erro de orientação é nulo, ou seja, além da orientação ao longo do percurso em linha reta, pretende-se controlar que se mantenha a uma distância lateral nulo (sempre sobre o eixo X). Dessa forma, pode-se focar nas equações de movimento nas direções Y e ψ . Seja o estado $\mathbf{x} = (Y, \psi)$ e a ação de controle $\mathbf{u} = \delta$, o sistema

definido pelas equações 3.14 e 3.23 pode ser reescrito como se define nas Equações 3.24 e 3.25:

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} v \sin(\beta(u) + \psi) \\ \frac{v_0}{b} \tan(u) \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (3.24)}$$

$$\beta(\delta) = \arctan\left(\frac{a \tan(u)}{b}\right), \quad \text{Eq. (3.25)}$$

O interesse existe no ponto de equilíbrio $x = (0, 0)$ e $u = 0$. Para encontrar o modelo linearizado ao redor do ponto de equilíbrio é possível abordar o processo de linearização jacobiana que fornece os seguintes resultados no espaço de estados:

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\substack{x=0 \\ u=0}} = \begin{bmatrix} 0 & v_0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{x=0 \\ u=0}} = \begin{bmatrix} \frac{av_0}{b} \\ \frac{v_0}{b} \end{bmatrix};$$

$$C = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\substack{x=0 \\ u=0}} = [1 \quad 0];$$

$$D = \left. \frac{\partial h}{\partial u} \right|_{\substack{x=0 \\ u=0}} = 0$$

As matrizes A, B, C e D fazem parte do sistema expressado no espaço de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

Em que x corresponde ao estado do sistema, u é ação de controle (no caso o esterçamento δ da roda frontal) e y , corresponde à saída do sistema.

A partir dos experimentos realizados por Velásquez (2015), é possível conseguir que o robô se desloque com uma velocidade de $0,2m/s$ a partir da aplicação controlada de *r.p.m* desejada no motor Maxon da propulsão, tarefa realizada diretamente pela correspondente placa Epos2 50/5. Segundo o anterior e de acordo com as dimensões do *helvis-3.1*, as matrizes A,B,C,D do modelo no espaço de estados são:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,22 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0,11 \\ 0,5 \end{bmatrix}; C = [1 \quad 0]; D = [0];$$

A partir das matrizes A, B, C, D, é possível encontrar a função de transferência da planta correspondente, a qual se define na Equação 3.26.

$$G = \frac{0,11s+0,11}{s^2} \quad \text{Eq. (3.26)}$$

Projeto do Sistema de Controle H_∞

A partir do uso das funções de simulação disponíveis no *toolbox* de sistema de controle do ambiente de desenvolvimento *MatlabTM*, realizou-se a simulação da resposta ao degrau do sistema de controle em malha fechada no qual o controlador é de ganho unitário e a planta G definida na Equação 3.26. Dessa forma, encontrou-se a respectiva resposta que demonstrou que o sistema é estável, sub-amortecido com um tempo de estabelecimento superior a 80 segundos, como pode ser observado na Figura 3.35.

Figura 3.35 Resposta ao degrau unitário do sistema de controle em malha fechada para a planta da Equação (3.26) com controlador proporcional de ganho 1.

Considerando que se pretende obter um sistema de controle em malha fechada no qual o controlador deve ser implementado computacionalmente no computador ARK11120

embarcado na estrutura do *helvis-3.1*, torna-se necessário ter um conhecimento do tempo de trabalho com que pode se contar para realizar a tarefa de controle.

Tem-se que o sistema eletrônico embarcado no *helvis-3.1*, além do computador ARK1120, conta com o sensor IMU IG500N, um sensor LiDAR URG30LX, uma placa Epos2 24/5 que executa o controle de baixo nível do atuador de esterçamento e uma placa Epos2 50/5 que executa o controle de baixo nível do atuador de propulsão. A partir da realização de testes experimentais em laboratório foi encontrado que o sistema eletrônico embarcado completo emprega em torno de 60 milissegundos. Isto levou à decisão de assumir esse tempo como o tempo de trabalho do *loop* de controle ($T_c = 60mS$), reassumindo todo o processo de projeto do controlador levando em conta o T_c .

O tempo T_c foi assumido na discretização do modelo matemático da planta (G) utilizando o algoritmo de desratização *c2d* (FRANKLIN et al, 1998), consequentemente se gerou a função de transferência em tempo discreto que se define na Equação 3.27.

$$G(z) = \frac{0,006798z - 0,006402}{z^2 - 2z + 1} \quad \text{Eq. (3.27)}$$

Levando em conta que o projeto de controle foi realizado em tempo contínuo, foi necessário realizar uma transformação bilinear da função de transferência discretizada ($G(z)$), obtendo-se uma função de transferência ($G_w(s)$) no tempo contínuo (apresentada na Equação 3.28), a qual considera a perda de informação ocasionada pela discretização da função original G .

$$G_w(s) = \frac{-0,0033s^2 + 0,1067s + 0,11}{s^2} \quad \text{Eq. (3.28)}$$

Deve-se ressaltar que se tem como objetivo definido a implementação de um sistema de controle em malha fechada baseado no método de otimização H_∞ . Por isto, torna-se imprescindível abordar a construção da planta generalizada. Não obstante, a presença de polos na origem do plano s , em que s se refere a ($s = \sigma + j\omega$), não obedece às condições necessárias para se conseguir executar o procedimento de otimização H_∞ , razão pela qual é necessário realizar um reposicionamento dos polos que se encontram na origem, deslocando-os até $s = 0,1 + j0$ (XUE et al., 2007). Redefinido assim a função de transferência $G_I(s)$ que se apresenta na Equação 3.29. Dado que $G_I(s)$ não têm polos na origem, então cumpre com os requerimentos necessários para abordar o processo de obtenção e um controlador a partir do processo de otimização H_∞ para a planta generalizada.

$$G_1(s) = \frac{-0,0033s^2 + 0,1074s + 0,0993}{s^2 - 0,2s + 0,01} \quad \text{Eq. (3.29)}$$

Figura 3.36 Planta aumentada do sistema projetado

A configuração da planta generalizada foi realizada baseando-se no diagrama de blocos apresentado na Figura 3.36 na qual se pode observar o uso das funções de peso W_1 e W_2 . A W_1 é a função de limite superior $\left(\frac{1}{|W_1(s)|}\right)$ que se projeta utilizar para impor um limite superior à magnitude da função sensibilidade (S). A função W_1 permite restringir a magnitude da ação de controle ($u = KS(r - Gd)$) estabelecendo uma fronteira superior definida por $1/|\omega_l|$ para a magnitude de KS . A função W_1 foi determinada a partir da definição de parâmetros assintóticos apresentados no Apêndice A. Eles são: $M = 1,5$; $A = 10^{-4}$ e uma largura de banda $\omega_b = 20 \text{ rad/s}$. A função W_2 foi definida como um valor constante ($W_2 = 0.01$) enquanto que a função W_1 foi definida segundo a Eq. (A.20) do Capítulo 3 e é transcrita na Eq. (3.30). A W_2 é definida na Equação 3.31.

Uma vez definidas as expressões correspondentes a cada um dos elementos que compõem a planta aumentada da Figura 3.36, exceto o controlador (K), contava-se com uma expressão geral baseada no método de modelagem da planta aumentada conhecido como sensibilidade

combinada, consequentemente, fazendo uso do método de otimização H_∞ proceder a procurar um controlador ótimo que completasse a planta aumentada. A Equação 3.32 mostra que a norma infinito da expressão relacionada à sensibilidade combinada deve ser teoricamente menor do que 1.

$$W_1(s) = \frac{\frac{s}{M} + \omega_B^*}{s + \omega_B^* A} \quad \text{Eq. (3.30)}$$

$$W_2 = 0,01 \quad \text{Eq. (3.31)}$$

$$\left\| \frac{W_1 S}{W_2 K S} \right\|_\infty < 1 \quad \text{Eq. (3.32)}$$

A procura do controlador (K) foi realizada aproveitando as facilidades oferecidas pelo toolbox de controle robusto de *Matlab*TM através de um processo de simulação (BALAS *et al.*, 2015; SKOGESTAG e POSTLETHWAITE, 2007). Em concordância, uma primeira etapa de simulação foi abordada mantendo a definição da função W_2 da mesma forma como na Eq. (3.31), enquanto para a função W_1 se definiram os valores das suas variáveis para serem ($M = 1,5$; $\omega_b = 5$; $A = 10^{-4}$). Como resultado, obteve-se um valor *gamma* de **1,0082**. O respectivo controlador gerado foi assumido para simular a resposta do sistema de malha fechada ao estímulo de entrada do tipo degrau; a respectiva simulação foi realizada assumindo que se deseja uma distância lateral ($y_d = 0,4\text{m}$), tal que a respectiva resposta é mostrada na Figura 3.37 na cor vermelho. Uma segunda simulação foi realizada mudando apenas a largura de banda em $\omega_b = 10\text{rad/s}$, obtendo-se $\gamma = \mathbf{1,3243}$, tal que a correspondente resposta é representada na Figura 3.37 na cor preto. Posteriormente, uma terceira etapa de simulação foi realizada mudando novamente apenas a largura de banda em $\omega_b = 20\text{rad/s}$, obtendo-se $\gamma = \mathbf{1,8643}$ e cuja resposta se visualiza na Figura 3.37 na cor verde.

Experimentalmente, encontrou-se que a resposta do *helvis*-3.1, durante testes realizados no seguimento de muro, demonstrou mais rapidez para o caso em que $\gamma = \mathbf{1,8643}$. Posteriormente no Capítulo 4 os resultados experimentais gerados são apresentados. O controlador K encontrado para o domínio da frequência está definido segundo a Equação 3.33.

$$K(s) = \frac{-14,67s^3 + 1,753(10^7)s^2 + 8,08(10^6)s + 1,647(10^6)}{s^3 + 1,698(10^5)s^2 + 1,531(10^5)s + 305,5} \quad \text{Eq. (3.33)}$$

Figura 3.37 Resposta ao degrau com referência em amplitude de 0,4 do sistema de controle em malha fechada H_∞ para diferentes larguras de banda

O controlador $\mathbf{K}$ obtido até agora foi projetado para a planta $\mathbf{G}_I(s)$, de maneira que vale a readaptar este controlador à planta original, a qual tem dois polos na origem. Aproveitando que o controlador $\mathbf{K}$ inicialmente obtido, o qual conta com uma representação no espaço de estados, a readaptação do controlador se faz subtraindo à matriz $\mathbf{A}$ deste controlador inicialmente obtido o valor de 0,1, assim como se indica na Equação 3.34, para assim obter uma nova matriz $\mathbf{A}$ (que agora se chamara $\mathbf{A}_f$) do controlador readaptado, que agora se chamara $\mathbf{K}_f$, cuja função de transferência se apresenta na Equação 3.35. Nas Figuras 3.38 e 3.39 apresentam-se os diagramas de bode correspondentes ao desempenho no domínio da frequência da função de sensibilidade gerada ($/S/$) e ação de controle ($/KS/$) em relação às funções de limitação estabelecidas W_1 e W_2 .

$$\mathbf{A}_f = \mathbf{A}_k + (-0,1)\text{size}(\mathbf{A}_k) \quad \text{Eq. (3.34)}$$

$$K_f(s) = \frac{-14,67s^3 + 1,753(10^7)s^2 + 1,159(10^6)s + 2,63(10^6)}{s^3 + 1,698(10^5)s^2 + 1,87(10^5)s + 1,731(10^4)} \quad \text{Eq. (3.35)}$$

Figura 3.38 Diagrama de Bode relacionada à magnitude da sensibilidade ($|S|$) e à função de limite superior ($1/|W_1|$) no sistema de malha fechada gerado.

Figura 3.39 Diagrama de Bode relacionado à magnitude do limite superior ($1/|W_2|$) estabelecido para a ação de controle ($K_f S$) no sistema de malha fechada gerado.

Assumindo que se pretende que o robô móvel mantenha uma distância de $0,4m$ durante o seu deslocamento para frente, tal como se descreveu para a geração do modelo matemático e a planta aumentada, na Figura 3.40 apresenta-se a resposta simulada ao degrau por parte do sistema de controle malha fechada gerado, exclusivamente para o caso em que $\omega_b = 20rad/s$. Pode-se observar que o sistema tem um tempo de resposta de aproximadamente 1 segundo.

Figura 3.40 Resposta ao degrau de magnitude 0,4 por parte do sistema de malha fechada gerado

Na Figura 3.41, exibe-se o comportamento da ação de controle ao longo do tempo tanto no tempo contínuo como em tempo discreto.

De acordo com as respostas plotadas na Figura 3.37, foi decidido assumir o controlador gerado para o qual o valor *gamma* era de ($\gamma = 1,8643$), dado que foi observado que o sistema de controle responde de maneira mais rápida; de acordo com a Fig. 3.41, observa-se que a ação de controle requerida por causa do controlador selecionado exige aproximadamente 40° de esterçamento em condições extremas.

Figura 3.41 Comportamento contínuo da ação de controle no sistema de malha fechada gerado (u para tempo contínuo; u_d para tempo discreto)

Implementação do Sistema de Controle de Um Grau de Liberdade no *helvis-3.1*

A incorporação do controlador H_∞ no computador embarcado no *helvis-3.1* foi realizada usando a expressão no espaço de estado discretizada do controlador K_f que foi obtido para sistema de controle de um grau de liberdade, cuja planta aumentada encontra-se definida graficamente na Figura 3.36; deve-se ter o cuidado de observar que, segundo o diagrama da planta aumentada da Figura 3.36, para o caso do controlador, o sinal (y) é uma entrada, enquanto o sinal (u) é a sua saída. Dessa forma, A Equação 3.36 representa a expressão geral no espaço de estados do controlador H_∞ . Consequentemente, apresenta-se as matrizes que constituem a expressão no espaço de estados para este controlador.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + By \\ u &= Cx + Dy\end{aligned}\tag{Eq. (3.36)}$$

Onde,

$$A = \begin{bmatrix} -0,9725 & -4,365 & 22,15 \\ -0,01187 & 0,9147 & 0,261 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0,9547 \\ -0,006337 \\ 0,08241 \end{bmatrix}; C = [-206 \quad -454,2 \quad 2321]; e$$

$$D = [101,9];$$

Sistema de Controle em malha Fechada de 2 Graus de Liberdade

Segundo Zhou (1998), conta-se com um controlador ótimo sempre que o valor obtido para o coeficiente *gamma* seja menor do que o valor *I*.

Dado que o respectivo valor obtido para o coeficiente *gamma* é maior do que *I*, foi assumido o orientado por Skogestad e Postlethwaite (2007), tal que se propõe configurar um sistema de controle de dois graus de liberdade. O diagrama da Fig. 3.36, basicamente representa a planta aumentada para um sistema de controle em malha fechada de um grau de liberdade.

Figura 3.42 Planta aumentada do sistema de controle de dois graus de liberdade

O processo de geração do controlador *K* para a planta aumentada da Fig. 3.42 foi realizado usando os mesmos parâmetros definidos para a planta aumentada previamente apresentada para Fig. 3.36, mas adicionando a função de transferência (*W_R*) em cascata com a entrada de referência (*r*), para conformar assim um sistema de controle de dois graus de liberdade. Definindo

uma largura de banda ($\omega_b = 7 \text{ rad/s}$), as funções de ponderação W_I e W_2 estão definidas como nas Equações 3.30 e 3.31 sem esquecer que a largura de banda é agora ($\omega_b = 7 \text{ rad/s}$). Posteriormente, usando o toolbox de controle robusto do *Matlab*TM, gerou-se o controlador K_f para cada W_R , mais uma vez por meio do método de otimização H_∞ . Na tabela 3.1 apresentam-se várias funções (W_R), o respectivo controlador K_f gerado e o correspondente valor γ . É importante lembrar que o controlador K_f resulta do mesmo procedimento explicado previamente para o sistema de controle de um grau de liberdade, em que se deslocava o polo à origem de volta, tal como corresponde com a realidade da planta. Segundo a informação apresentada na tabela 3.1, quando ($W_R = I$), a situação é equivalente ao uso de um sistema de controle de um grau de liberdade, no qual ainda se observa um valor γ maior do que um (I); observa-se também que para as demais funções de transferência (W_R) resulta em controladores com valor γ gerado menor do que um.

Nas Figuras 3.43 até 3.46 apresentam-se os diagramas de Bode relativos à amplitude do ganho em relação com a fronteira definida pela função W_I . Cada um dos diagramas apresentados corresponde ao sistema de controle para cada um dos valores γ apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Funções de transferência W_R para constituir um sistema de controle de 2 graus de liberdade. Inclui-se o controlador K_f gerado assim como o respectivo valor γ (γ)

$(s) =$	$K_f(s) =$	$\gamma =$
1	$\frac{-14,67s^3 + 2,618(10^6)s^2 + 1,693(10^6)s + 3,786(10^5)}{s^3 + 4,249(10^4)s^2 + 4,668(10^4)s + 4269}$	1,1399
$\frac{s + 0,5}{1,25s + 0,1}$	$\frac{-14,67s^4 + 1,14(10^6)s^3 + 1,192(10^6)s^2 + 4,01(10^5)s + 4,031(10^4)}{s^4 + 1,809(10^4)s^3 + 2,314(10^4)s^2 + 5,398s + 327,4}$	0,9275
$\frac{s + 0,5}{2s + 0,1}$	$\frac{-14,67s^4 + 6,064(10^6)s^3 + 6,737(10^6)s^2 + 2,492(10^6)s + 2,453(10^5)}{s^4 + 9,525(10^4)s^3 + 1,19(10^5)s^2 + 2,528s + 1437}$	0,5836
$\frac{s + 0,5}{4s + 0,1}$	$\frac{-14,67s^4 + 5,781(10^5)s^3 + 7,539(10^5)s^2 + 3,402(10^5)s + 3,233(10^4)}{s^4 + 8887s^3 + 1,088(10^4)s^2 + 2115s + 111,7}$	0,297

Na Figura 3.47 apresenta-se o diagrama de Bode para a ação de controle ($K_f S$). Também se plota a fronteira imposta pela função W_2 de acordo com o valor γ ($\gamma = 0,9275$) da tabela 3.1. Somente o gráfico para ($\gamma = 0,9275$) é mostrado já que ele é muito similar para o caso dos

outros sistemas de controle com diversos valores de γ na tabela 3.1. Comparando o gráfico da Figura 3.39 e a Figura 3.47, pode-se observar que a inclusão de uma função de penalização (W_R) gera um efeito, tal que a ação de controle é de menor magnitude e de fato não alcança a saturação imposta pela função W_2 .

Figura 3.43 Diagrama de Bode apresentando a função de magnitude da função sensibilidade e da função de ponderação W_I para o sistema de controle com $\gamma = 1,1399$ da tabela 3.1

Figura 3.44 Diagrama de Bode apresentando a função de magnitude da função sensibilidade e da função de ponderação W_I para o sistema de controle com $\gamma = 0,9275$ da tabela 3.1

Figura 3.45 Diagrama de Bode apresentando a função de magnitude da função sensibilidade e da função de ponderação W_I para o sistema de controle com $\gamma = 0,5836$ da tabela 3.1

Figura 3.46 Diagrama de Bode apresentando a função de magnitude da função sensibilidade e da função de ponderação W_I para o sistema de controle com $\gamma = 0,2970$ da tabela 3.1

Figura 3.47 Diagrama de Bode relacionado à magnitude do limite superior ($1/|W_2|$) estabelecido, de acordo com o valor γ ($\gamma = 0,9275$)

Figura 3.48 Ação de controle H_∞ para o sistema de controle de 2 graus liberdade, de acordo com o valor γ ($\gamma = 0,9275$) na tabela 3.1. Se plota a ação de ação de controle para tempo contínuo e para tempo discreto.

Para apresentar o que acontece com a ação de controle, a Figura 3.48 apresenta um gráfico que corresponde à ação de controle aplicada quando o controlador corresponde a um valor γ de 0,9275. Incluiu-se somente o gráfico para este valor de γ , dado que para os valores restantes (γ) na tabela 3.1 o gráfico é similar. A ação de controle foi plotada segundo uma simulação na qual o sistema de controle devia responder à mudança de tipo degrau na entrada de referência (r), tal que essa mudança fosse desde o valor nulo até 0,4. Pode-se observar que em comparação com sistema de controle de um grau de liberdade, ação de controle aplicada é de menor magnitude, e de fato apresenta valores extremos em concordância com os limites mecânicos do subsistema de esterçamento do *Elvis-3.1*.

Figura 3.49 Resposta na saída para o sinal de entrada degrau de amplitude 0,4 para cada sistema de controle segundo cada valor γ da tabela 3.1.

Para conhecer a resposta na saída do sistema de controle, o mesmo sinal degrau, mencionado previamente para simular a ação de controle, foi aproveitado para visualizar a respectiva resposta. Em concordância, a Figura 3.49 exibe as respostas ao degrau, para cada um dos sistemas de controle segundo o valor γ correspondente na tabela 3.1. De acordo com a informação que se pode extrair a partir dos gráficos gerados, observa-se que para um menor valor de γ o sistema de controle pode fornecer uma resposta mais rápida, mas implicando uma maior ultrapassagem (maior overshoot). Enquanto que para controladores com maiores valores do valor γ tem-se menor overshoot, em sacrifício de um maior tempo na respectiva resposta. Segundo Zhou (1998) e K. Zhou (1995), conta-se com um

controlador ótimo sempre que o valor obtido para o coeficiente *gamma* seja menor do que o valor *I*. Consequentemente, optou-se por realizar experimentos para o sistema de um grau de liberdade apresentado nesta tese e para o sistema de dois graus de liberdade cujo valor *gamma* corresponde a ($\gamma = 0,9275$)

A Figura 3.50 apresenta a atenuação do distúrbio de entrada por parte do sistema de controle de dois de liberdade para cada valor de *gamma* segundo a tabela 3.1. Para este caso, aplicou-se um distúrbio do tipo degrau unitário, e pode-se observar que, ainda com a permanência do sinal de distúrbio, o sistema de controle é capaz de atenuar consideravelmente o seu efeito na sua respectiva saída.

Figura 3.50 Atenuação de distúrbio de entrada do sistema de dois graus de liberdade para cada valor *gamma* da tabela 3.1

Implementação *helvis-3.1* no do sistema de Controle de 2 Graus de Liberdade

A incorporação do controlador H_∞ no computador embarcado no *helvis-3.1* foi realizada usando a expressão no espaço de estado discretizada do controlador K_f que foi obtida para o sistema de controle de dois graus de liberdade, cuja planta aumentada encontra-se definida graficamente na Figura 3.42. Deve-se ter o cuidado de observar que, segundo o diagrama da planta aumentada, para o caso do controlador, o sinal (*y*) é uma entrada, enquanto que o sinal (*u*) é a sua saída.

A mesma Equação 3.36 definida previamente representa a expressão geral no espaço de estados do controlador H_∞ . Consequentemente, para o caso do sistema de controle de dois

graus de liberdade, apresentam-se as matrizes que constituem a expressão no espaço de estados para este controlador com γ ($\gamma = 0,9275$). Pode-se observar o aumento na ordem do controlador, o qual acontece por causa da inclusão da função W_R na planta aumentada.

$$A = \begin{bmatrix} -0,9594 & -4,318 & 5,084 & 21,2 \\ -0,01619 & 0,905 & 0,1049 & 0,2497 \\ 6,368(10^{-5}) & 0,0001455 & 0,9891 & -4,948(10^{-15}) \\ -8,266(10^{-17}) & 8,206(10^{-15}) & -4,118(10^{-15}) & 0,994 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0,4808 \\ -0,01457 \\ 7,727(10^{-5}) \\ 0,04104 \end{bmatrix}; C = [-242,5 \quad -532,4 \quad 627,1 \quad 2639]; D = [62,47];$$

Polinômio do atuador no esterçamento

Como se descreveu previamente para o respectivo subsistema do *hElvis-3.1*, o esterçamento das rodas da frente do *hElvis-3.1* depende da atuação de um motor DC MAXON, o qual se encontra acoplado a um redutor, de tal forma que o seu respectivo eixo de saída foi acoplado a um mecanismo de fuso, cuja saída linear está apropriadamente acoplada ao mecanismo de esterçamento de Ackerman do veículo.

Figura 3.51 Representação do Fuso indicando a sua posição central e máximas posições extremas

Em concordância com o apresentado para a Figura 3.24, a Figura 3.51 representa o fuso utilizado no subsistema de esterçamento. Indica-se a posição central da força como (F_0) e as suas posições máximas extremas como $-F_M$ e $+F_M$. O subsistema de esterçamento, foi instalado de forma que quando a força do fuso encontra-se na posição central (F_0) , então o mecanismo de Ackerman posiciona as rodas dianteiras do *hElvis-3.1* na posição nula de esterçamento ocasionado que o veículo descreva um deslocamento em linha reta seja propulsado para a frente ou para trás; Quando a força do fuso encontra-se posicionada em uma posição entre F_0 e $-F_M$, o mecanismo de Ackerman esterça as rodas dianteiras à direita

da estrutura do robô; caso contrário, quando a força do fuso encontra-se posicionada em uma posição entre F_0 e $+F_M$, o mecanismo de Ackerman esterça as rodas dianteiras à esquerda da estrutura do robô. Segundo o apresentado, a posição absoluta do *encoder* do motor Maxon está representada como (F). A respectiva placa Epos2 foi configurada de tal forma que para a posição que corresponde ao posicionamento centrado da força no fuso, fosse definida com um valor numérico nulo. Os valores numéricos negativos correspondem a localizações entre a posição nula (F_0) e a posição máxima possível na região frontal do protótipo ($-F_M$). Os valores numéricos positivos correspondem a localizações entre a posição nula (F_0) e a posição máxima possível na região traseira do protótipo ($+F_M$). Na tabela 3.2, apresentam-se os valores aplicados para o posicionamento da força do fuso. As posições extremas determinadas pelo parafuso de potencia acoplado são: $+F_M = 450000$, $-F_M = -450000$.

Tabela 3.2 Resultados do experimento de esterçamento

F	Diâmetro medido (m)	$R(m)$	$\delta (^\circ)$
450000	2,02	1,01	22
400000	2,34	1,17	19
350000	2,9	1,45	15
300000	3,6	1,8	13
250000	4,9	2,45	9
200000	7,2	3,6	6
150000	12,6	6,3	4
100000	28,9	14,45	2
-50000	16	8	-3
-100000	8,6	4,3	-5
-150000	6,5	3,25	-7
-200000	4,72	2,36	-10
-250000	3,6	1,8	-13
-300000	2,9	1,45	-15
-350000	2,5	1,25	-18
-400000	2,2	1,1	-20
-450000	1,9	0,95	-23

Levando em conta que um ângulo de esterçamento diferente de zero implica o deslocamento do veículo descrevendo trajetórias com curvatura, foi realizado um experimento baseado no exposto por (KHRISTAMTO *et al.*, 2015). Em dito experimento, através dos respectivos comandos por computador para a placa Epos2 24/5, diferentes valores de posição (F) eram aplicados para a força do fuso segundo é apresentado na Tabela 3.2. Dado que o

veículo se deslocava para a sua frente com uma velocidade de aproximadamente $0,22m/s$, então o protótipo descrevia uma trajetória circular segundo cada valor F , medindo para cada uma das trajetórias o respectivo diâmetro. Sabendo que o raio da curvatura percorrida corresponde à metade do diâmetro, o raio R foi calculado e introduzido na Tabela 3.2.

Em concordância ao modelo cinemático lateral para um veículo do tipo “*car-like*”, segundo Rajamani (2006), assumindo que a distância entre eixos (b) é muito menor comparada com a grandeza do raio de curvatura e que o ângulo de escorregamento é desprezível, então pode-se encontrar a Equação 3.37 ou a Equação 3.38.

$$\frac{\dot{\psi}}{V} = \frac{1}{R} = \frac{\delta}{b} \quad \text{Eq. (3.37)}$$

$$\delta = \frac{b}{R} \quad \text{Eq. (3.38)}$$

Para cada valor calculado relativo a um raio de curvatura, aplicou-se a Equação 3.38 a fim de determinar o respectivo ângulo de esterçamento δ do modelo cinemático previamente exposto. De acordo com os dados apresentados na Tabela 3.1, para cada ângulo δ , há um valor correspondente para a força no fuso.

Com os valores encontrados e apresentados na Tabela 3.1 para δ e F , realizou-se um processo de interpolação para obter um polinômio que permitisse relacionar ditos valores através de um polinômio. A determinação deste polinômio foi realizada com o uso da função “*polyfit*” no software *Matlab*TM. O polinômio obtido é apresentado na Equação 3.39.

$$\delta = (4,67791735819689 * 10^{-5})F - 1,27789384774807 \quad (3.39)$$

A definição da posição (F) da força no fuso a partir do parâmetro do ângulo de esterçamento (δ) é realizado a partir do uso da Equação 3.40.

$$F = \frac{\delta - 1,27789384774807}{(4,67791735819689 * 10^{-5})} \quad (3.40)$$

3.3 Especificação de Testes

Uma vez que o controlador H_{∞} gerou resultados considerados satisfatórios no processo correspondente às simulações, procedeu-se a realizar experimentos orientados à respectiva

adaptação do projeto de controle, com o intuito de aplicar este sistema de controle ao de caminhos de cultura utilizando o *#Elvis-3.1*, em concordância com a definição do problema, o qual foi definido na introdução desta tese.

3.3.1 Especificação de Experimentos para Seguimento de Muro com o *#elvis-3.1*

Uma vez que o processo simulação do sistema de controle H_∞ de malha fechada demonstrou resultados aceitáveis pela simulação do sistema de controle em malha fechada, procedeu-se a sua respectiva implementação no computador *ARK-1120* através da linguagem de programação *C++*, para consequentemente realizar experimentos que permitissem avaliar o funcionamento real. A Figura 3.52 foi incluída com o intuito de orientar, como o diagrama de planta aumentada da Figura 3.36 ou 3.42 se relacionam com a aplicação de controle de caminhos de cultura desta tese. Consequentemente, a entrada (y_d) corresponde à magnitude da distância à qual se deseja que o veículo se mantenha afastado enquanto se desloca para frente; o (δ_d) corresponde à ação de controle H_∞ , note-se que esta ação de controle consiste no esterçamento desejado, segundo o modelo cinemático previamente definido; o sinal (z_2) corresponde a uma saída monitorada da ação que está sendo aplicada diretamente à planta; o sinal (z_1) corresponde a uma saída monitorada do erro de distância (e_y); para este caso, a saída nomeada como (y) corresponde à entrada ao controlador, que por sua vez é também o erro de distância.

Figura 3.52 Diagrama de blocos para determinação de um controlador K baseado na técnica de otimização H_∞ para seguimento de muro usando o *#Elvis-3.1*

Segundo o definido para o polinômio do atuador no esterçamento, o parâmetro δ_d é o valor de ângulo de esterçamento desejado para o modelo cinemático simplificado, cujo valor angular deve ser transformado a um valor numérico que a placa Epos2 24/5 possa assumir

para atuar sobre o respectivo motor DC. A transformação a um valor numérico para atuar no esterçamento é realizada através do uso do polinômio que já foi definido. O valor numérico determinado corresponde à posição da força no parafuso de potência do subsistema de esterçamento. Segundo o explicado para o subsistema de esterçamento, a posição desta força é transformada ao esterçamento das duas rodas frontais através da transmissão do movimento do parafuso de potência ao mecanismo de esterçamento de Ackerman.

A realização de experimentos de controle utilizando o sistema de controle projetado para o *hElvis-3.1* foi realizada executando o controle de seguimento de muro contínuo, o qual demandou a definição de um procedimento para a sua respectiva realização. O fluxograma apresentado na Figura 3.53 representa o procedimento geral para a realização do experimento de seguidor de muro, e inclui tarefas humanas e computacionais.

Consequentemente, no início dos experimentos, o veículo devia ser posicionado manualmente de forma a descrever uma orientação em paralelo ao muro que se desejava seguir; uma vez que o robô tenha sido posicionado, procede-se a ingressar os valores para a propulsão (rpm_d), a distância lateral desejada (y_d) e a orientação desejada (ψ_d), segundo é descrito no fluxograma representado na Figura 3.53. O procedimento pode iniciar posicionando o protótipo manualmente como é representado na Figura 3.32, procurando que as distâncias separando o muro e os eixos dianteiro e traseiro do veículo sejam da mesma magnitude. Considerando que o veículo está posicionado adequadamente, a aplicação computacional embarcada no *hElvis-3.1* procede a medir a orientação do protótipo e carrega o correspondente valor em uma variável de orientação inicial (ψ_0); considerando que o projetista já informou à aplicação computacional a distância desejada para que o *hElvis-3.1* se mantenha afastado do muro, subsequentemente, esta aplicação computacional inicia a propulsão do veículo e o controle de esterçamento; durante o deslocamento do protótipo, faz-se a medição da sua orientação atual (ψ) para determinar o erro de orientação ($e_\psi = \psi_0 - \psi$). Segundo as características do sensor IMU utilizado, e_ψ pode ser positivo ou negativo.

Retomando o fluxograma da Figura 3.53, uma vez medida a distância (y) segundo a condição do e_ψ , pode-se determinar o erro de distância ($e_y = y_d - y$), que se constitui em uma informação vital para o controlador calcular a ação de controle que subsequentemente será aplicada. O *loop* de controle é executado até receber comando de parada, momento em que interrompe o movimento do veículo.

Figura 3.53 Fluxograma correspondendo com o procedimento relacionado com o controle de seguimento de muro do *helvis-3.1*

Experimentalmente, encontrou-se que para a velocidade de $0,22\text{m/s}$, a velocidade angular do motor de propulsão corresponde a aproximadamente um valor 2000rpm (VELASQUEZ, 2015), de tal maneira que o controlador foi projetado para uma velocidade à frente de $0,22\text{m/s}$, o qual se informa ao computador ARK-1120, para que o motor de propulsão se mantenha em 2000rpm .

3.3.2 Especificação de Experimentos para Seguimento de Barreira Vegetal Artificial

Uma vez considerado que a tarefa de seguimento de muro demonstrou resultados aceitáveis, procedeu-se a assumir uma abordagem orientada ao seguimento de fileiras de cultura agrícola, realizando as adaptações necessárias. Assim, foram configuradas fileiras que se aproximassem estruturalmente das fileiras de cultura natural, com o intuito de se aproximar ao sistema de plantio retangular, facilitando a realização de uma etapa inicial de experimentação relacionada ao aproveitamento do controle de muro contínuo em uma aproximação agrícola.

Figura 3.54 Estrutura construída para emular um muro-fila vegetal

A Figura 3.54 apresenta uma das unidades de cultura artificial que foi configurada. As estruturas em questão constam de uma base de madeira de $0,7m$ de comprimento e $0,2m$ de largura. Ao longo do eixo longitudinal da base, a cada $0,2m$ foi instalado um cano de PVC de $1/2$ polegada. Utilizando várias unidades como a apresentada, pode-se configurar uma barreira vegetal artificial como é apresentado nas imagens apresentadas na Figura 3.55. Uma vantagem do uso das estruturas para cultura artificial consiste no fato de facilitar a realização de experimentos em áreas *indoor*, considerando que em muitas ocasiões as condições do clima não facilitam o desenvolvimento de experimentos *outdoor*.

Figura 3.55 Fotografia do *Helvis-3.1* durante a realização de experimento *indoor* usando cultura artificial.

O controle de seguimento de barreira artificial, implicou no desenvolvimento de adaptações no sistema de percepção, com o intuito de determinar a distância lateral entre o veículo e a fileira de cultura que se deve seguir. Na Figura 3.56, o *Helvis-3.1* é mostrado quando se encontra seguindo uma fileira de cultura. Em concordância, três situações são mostradas em um sentido similar ao apresentado para a Figura 3.33.

Figura 3.56 Representação de três possíveis situações de orientação quando o #Elvis-3.1 executa a tarefa de controle de seguimento de filas de cultura pelo meio

As situações representadas na Figura 3.56 permitem expor com mais detalhe como se utiliza o sensor LIDAR, em relação à aplicação computacional implementada para medir distâncias à direita ou à esquerda da estrutura do protótipo, apoiando-se na determinação do erro de orientação. Na situação representada na Figura 3.56(a), dado que o erro de orientação é zero, em consequência o passo inicial no sensor LIDAR é o passo 0, e somente as medições de distância de todos os passos subsequentes até o passo 180 são consideradas, cobrindo assim 45°. De acordo com o representado, as setas de cor vermelho correspondem a raios *laser* que refletiram num cano de PVC na fileira de cultura que deve ser seguida, enquanto setas de cor preto representam raios *laser* que não refletiram em nenhum talo da fileira de cultura mais perto à direita; Na situação representada na Figura 3.56(b), nota-se que o robô sofreu uma mudança na orientação, tal que que o e_ψ é positivo. Nessa situação, novamente 180 passos do sensor LIDAR são considerados, mas o primeiro passo está determinado pelo erro de orientação de acordo com a Equação 3.41, na qual se observa que se o resultado não fornece um número inteiro, então o valor para passo inicial corresponderá ao valor inteiro anterior ao resultado, localizando o passo final a 180 passos adicionais, para assim abranger 45°, o qual se representa na Equação 3.42; Retomando a Figura 3.56, para o caso representado na parte superior (situação C), observa-se que o robô apresenta um erro de orientação negativo. Para esta situação, as medições de distância à direita do robô são consideradas de mesma maneira que na situação A, já que a atuação do sistema será tendente a virar para ficar mais perto do muro.

$$passo_{ini} = \left\lfloor \frac{e_\psi}{0.25} \right\rfloor \quad \text{Eq. 3.41}$$

$$passo_{fim} = passo_{ini} + 180 \quad \text{Eq. 3.42}$$

Para determinar a distância lateral à direita do robô, deve-se levar em conta que, de acordo com o especificado para o modelo cinemático do veículo, a abscissa ($\mathbf{x}$) do sistema de coordenadas local ao veículo encontra-se sobre o seu eixo longitudinal, e consequentemente, a ordenada ($\mathbf{y}$) corresponde à distância lateral considerada para seguimento do muro e a respectiva ordenada local. Segundo isto, dado que o sensor LIDAR conta com um alcance de 30m, para qualquer uma das situações representadas na Figura 3.56, pode-se observar que as setas de cor preto representam detecções de distâncias que ultrapassam a fileira a ser seguida, enquanto as setas de cor vermelha representam detecções na fileira que deve ser seguida;

para definir que distâncias detectadas respresentadas pela cor vermelha na Figura 3.56 correspondem à fileira que deve ser seguida, assumiu-se um parâmetro denominado (W), correspondendo ao espaçamento entre fileiras. Em concordância, as medidas representadas com setas de cor preta ultrapassam o valor da variável (W), em comparação com as medidas representadas pela cor vermelha, as quais representam medidas que não ultrapassam o valor (W).

Em consequência, as medições que estão dentro do espaçamento entre fileiras, são consideradas como válidas, e serão consideradas para o cálculo da distância lateral (y). Essa restrição se impõe com o intuito de estabelecer as considerações, que deveriam ser aplicadas quando se configurem várias fileiras de cultura artificial ou vegetal, levando em conta que as plantas detectadas só podem estar localizadas a distâncias menores que o espaçamento entre fileiras, ainda se o robô estivesse encostado muito perto de uma das filas de talos da cultura.

A informação adquirida sobre o panorama “visualizado” pelo robô quando deve seguir uma fileira de cultura à direita é utilizada para determinar distância lateral medida que separa o robô da fileira de cultura mais perto. O cálculo da distância lateral (y), para qualquer das situações representadas na Figura 3.56, é realizado considerando só a quantidade de detecções definidas como válidas, posteriormente projetando estas medições na ordenada local do veículo segundo se define na Equação 3.43, onde (d) representa a medição para cada um dos passos considerados do sensor LiDAR, o índice (j) representa todos os passos considerados do sensor LiDAR, desde passo inicial até o passo final definidos nas Equações 3.42 e 3.43 respectivamente, ou se for o caso, desde o passo 0 até o passo 180 como se definiu previamente. Em concordância, todas as projeções das medições válidas são somadas para determinar a distância lateral (y) segundo se define na Eq. (3.44), em que ***passo_{ini}*** e ***passo_{fim}*** se definem segundo as situações representadas na Fig. 3.56, lembrando que o número de projeções válidas, corresponde a aquelas que não ultrapassam o valor de espaçamento entre fileiras.

$$pro_y[j] = (d[j])\cos(0,25j) \quad \text{Eq. 3.43}$$

$$y = \frac{\sum_{j=passo_{ini}}^{j=passo_{fim}} pro_y[j]}{\# \text{ projeções válidas}} \quad \text{Eq. 3.44}$$

Figura 3.57 Fluxograma da aplicação desenvolvida para que o *helvis-3.1* se desloque para frente seguindo fileira de cultura à sua direita.

O fluxograma apresentado na Figura 3.57 representa o programa, construído usando a linguagem de programação C++, que é aplicado para que o *helvis-3.1* se mantenha seguindo

uma fileira de cultura artificial, de forma muito similar ao controle de seguimento de muro, previamente apresentado, enquanto o veículo se desloca para frente com uma velocidade aproximada de $0,22m/s$. Em concordância, uma vez vai que um experimento será realizado, posteriormente à inicialização, o primeiro que deve se fazer é posicionar o robô no começo da fileira da barreira vegetal com uma orientação paralela à fileira reta que deverá ser seguida; uma vez que o robô encontra-se posicionado, indica-se o respectivo ao programa desenvolvido em C++, para proceder-se a capturar a orientação medida pelo sensor de inercial, de forma que esta orientação (ψ_0) servirá de referência para determinar o modo em que o sensor LIDAR realizará a detecção de fileira, tal como se explicou para a Figura 3.52; Seguindo o fluxograma em explicação, o seguimento de fileira iniciará através da ativação manual do comando “*iniciar controle*”; uma vez indicado que se deve iniciar a tarefa de controle, as seguintes funções são realizadas: ativa-se a propulsão para frente do veículo uma velocidade de $0,22m/s$, mede-se a orientação do veículo, calculam-se o respectivo erro de orientação, a distância lateral (y) até a fileira que se deve seguir, o erro de distância, e também calcula-se a ação de controle H_∞ ; posteriormente, a ação de controle calculada para esterçar a roda da frente (do modelo cinemático) é avaliada se ultrapassa os limites à direita e à esquerda do mecanismo de Ackerman do veículo. Segundo o fluxograma, se a ação de controle δ_d está dentro dos limites mecânicos (-25° , $+25^\circ$), permite-se que a respectiva ação de controle passe ao respectivo baixo nível; retomando o fluxograma da Figura 3.57, caso não haja indicação de que o robô deve parar, então o seguimento de fileira continuará.

O desenvolvimento que tem sido realizado utilizando uma cultura artificial facilitou a realização de experimentos em áreas *indoor* e *outdoor* sem depender da disponibilidade de uma cultura real. Além disso, permitiu continuar experimentos em áreas *indoor* quando as condições do clima não permitiam experimentos em área aberta. Pode-se expressar que toda a abordagem experimental com cultura artificial corresponde com uma classe de protótipo de experimentos que foi abordada em ambientes de fácil acesso.

3.3.3 Especificação de Experimentos para Seguimento de Barreira Vegetal Real com o *helvis-3.1*

Uma vez considerado que os resultados alcançados para seguimento de barreira vegetal artificial à direita do robô (os quais se apresentam posteriormente no capítulo de resultados) geraram resultados aceitáveis, procedeu-se à realização de experimentos em um ambiente de uma cultura real.

Na Figura 3.58, o ambiente em que o veículo deve desenvolver a sua tarefa de navegação autônoma é representado. Pode-se observar que existem 4 fileiras retas de plantas, entre as quais nota-se que o espaçamento entre estas fileiras é uniforme e de valor W .

Figura 3.58 Representação de ambiente agrícola composto por fileiras retas de plantas

(a)

(b)

Figura 3.59 (a) Plantas de milho em contêdores de solo do lado do #Elvis-3.1. (b) Imagem do protótipo durante o seu percurso entre fileiras de cultura.

O ambiente agrícola configurado está composto por plantas de milho que foram plantadas em vasos de plantio a fim de dispor de unidades vegetais portáteis. A Figura 3.59(a) tem sido incluída para demonstrar que os vasos usados são cilindros com base circular de $0,1m$ de diâmetro e $0,12m$ de altura de maneira que o sensor LIDAR realiza a detecção da planta e não do vaso correspondente. A Figura 3.59(b) apresenta uma imagem do #Elvis-3.1 durante o percurso no ambiente configurada quando o espaçamento entre fileiras era de $1,80m$.

A Figura 3.60 mostra o método usado para detectar a fileira de plantas mais próxima à direita da estrutura do robô. A metodologia apresentada é idêntica à apresentada para as situações da Figura 3.56.

O controle autônomo de seguimento de fileiras de cultura foi desenvolvido a partir de um controlador de seguimento de barreira vegetal artificial. Uma vez considerado que este sistema de controle demonstrava um desempenho aceitável, foram realizadas as adaptações necessárias no subsistema de percepção (como apresentado no subitem anterior), com o intuito de usar o mesmo sistema de controle de seguimento de barreira vegetal artificial no seguimento de fileiras de cultura agrícola.

Figura 3.60 Representação CAD do ambiente de cultura e método de percepção de fileiras.

Figura 3.61 Fluxograma para seguimento de fileiras de cultura real.

O fluxograma apresentado na Figura 3.61 representa o modo em que o seguimento de fileiras retas de cultura à direita do robô foi realizado. De acordo com isso, uma etapa de inicialização é realizada; subsequentemente, a orientação do veículo, assim como as fileiras de cultura, são medidas para proceder a calcular o erro de distância lateral à direita, que separa o veículo da fileira mais próxima, para proceder a executar a ação de controle;

posteriormente se realiza a detecção de final de fileira, através da detecção de muito poucas projeções válidas segundo o esquema de detecção de fileiras de plantas explicado previamente. Caso a fileira de cultura ainda esteja presente, o controle de seguimento deve continuar, caso contrário uma manobra para passar a uma seguinte fileira deve ser realizada; De acordo com o apresentado, todas as fileiras que são seguidas são contabilizadas, de maneira que o veículo deve parar após percorrer todas as fileiras.

Realização de Curvatura com o *helvis*-3.1

Uma vez o percurso de uma fileira de plantio tenha sido completado e se ainda há fileiras a percorrer, então o protótipo deve realizar a manobra necessária para ingressar na fileira seguinte. A realização dessa tarefa depende das capacidades mecânicas relacionadas ao esterçamento das rodas frontais do veículo, para o qual foram definidos os máximos ângulos de esterçamento possíveis de serem aplicados.

O fluxograma apresentado na Figura 3.61 leva a ter que descrever as condições que implicam a realização de curvatura à esquerda ou à direita do mundo local do veículo. De acordo com isso, primeiramente deve-se mencionar, que o contador fileiras na etapa de inicialização foi inicializado com valor 1. Uma vez que o final de fileira é detectado, procede-se a determinar se é a última fileira, caso não, procede-se a revisar um contador de fileiras seguidas, de tal maneira que se o robô encontrava-se percorrendo fileiras ímpares, então uma curvatura à esquerda do robô deve ser feita. Quando o robô encontrava-se percorrendo caminhos pares, então o robô deve virar à direita. Quando o veículo realiza a curvatura para a direita, a manobra é mantida até que a orientação do protótipo tenha mudado 180° em relação à orientação com que o veículo começou o percurso na primeira fileira (orientação inicial). Quando o veículo realiza a curvatura para a esquerda, a manobra de giro é mantida até que a orientação do protótipo chega a ser novamente o valor da orientação inicial. Após o veículo completar a manobra, o robô deve continuar na execução do seguimento de fileira reta.

Experimentos realizados em fileiras com menos espaçamento

Inicialmente, foi determinado um seguimento de fileiras com espaçamento entre elas de $1,80m$. Procede-se a reduzir dito espaçamento a uma distância de $1,0m$. A partir do uso das ferramentas gráficas disponíveis no entorno de desenvolvimento do *MatlabTM*, diversas variáveis foram exibidas em gráficos, permitindo verificar o desempenho do veículo na realização da tarefa de controle de seguimento de todos os caminhos de cultura que foram configuradas.

O seguimento de fileiras foi realizado a partir da detecção das duas fileiras aos dois lados do protótipo com o intuito de manter o veículo no meio dos caminhos de cultura configurados pelo espaçamento entre estas fileiras. Em concordância, para frente do texto se utilizará a expressão: *seguimento de caminho*.

Figura 3.62 Representação do modo em que se realiza a detecção das fileiras de cultura aos dois lados do veículo.

A Figura 3.62 representa o modo em que a detecção das fileiras de cultura é realizada. Na situação (A), representa-se que o veículo desloca com erro de orientação nulo, de forma que a aplicação computacional configurada determina que o ângulo de varredura considerado para o lado direito vai desde -45° até $+45^\circ$, o que determina o uso do LIDAR desde o *passo 0* até a *passo 360*. Para o lado esquerdo, considera-se o uso dos valores detectados correspondentes com um ângulo de varredura que vai desde $+135^\circ$ até -135° , o que corresponde ao uso do sensor LIDAR desde o *passo 720* até o *passo 1080*; na situação (B), representa-se que o veículo sofreu um evento que gerou a sua desorientação, gerando-se um erro de orientação

positivo. Dessa forma pode-se apreciar que o ângulo de varredura ao lado direito do veículo é deslocado em uma proporção relativa ao erro de orientação, tal como se define nas Equações 3.45 e 3.46, em que $passo_{iniD}$ define o primeiro passo do ângulo de varredura à direita, e_ψ corresponde ao erro de orientação, e $passo_{fimD}$ é o passo final considerado à direita. Pode-se apreciar que uma varredura de 90° é utilizada. Na mesma situação, define-se que o ângulo de varredura à esquerda deve se manter em uma varredura constante que vai desde o passo 720 até o passo 1080 abrangendo assim as medições que vão desde $+135^\circ$ até -135° ; e na situação (C), representa-se que o veículo sofreu um evento que gerou a sua desorientação com um erro de orientação negativo. Dessa forma, pode-se apreciar que o ângulo de varredura ao lado esquerdo do veículo é deslocado em uma proporção relativa ao erro de orientação tal como se define nas Equações 3.47 e 3.48 em que $passo_{iniE}$ define o primeiro passo do ângulo de varredura à esquerda, e_ψ corresponde ao erro de orientação, $passo_{fimE}$ é o passo final considerado à esquerda. Pode-se apreciar que também é utilizada uma varredura de 90° . Na mesma situação, define-se que o ângulo de varredura à direita deve se manter em uma varredura constante que vai desde o passo 0 até o passo 360 abrangendo assim as medições que vão desde -45° até $+45^\circ$.

$$passo_{iniD} = \left\lceil \frac{|e_\psi|}{0.25} \right\rceil \quad \text{Eq. 3.45}$$

$$passo_{fimD} = passo_{iniD} + 360 \quad \text{Eq. 3.46}$$

$$passo_{fimE} = 720 - \frac{e_\psi}{0.25} \quad \text{Eq. 3.47}$$

$$passo_{iniE} = passo_{fimE} - 180 \quad \text{Eq. 3.48}$$

Para todos os casos representados na Figura 3.62, definiu-se que as medidas representadas com setas de cor preta ultrapassam o valor do espaçamento entre fileiras (W) em comparação às medidas representadas pela cor vermelha, representando medidas que não ultrapassam o valor de espaçamento entre fileiras. As medidas que estão dentro do espaçamento entre fileiras são consideradas como válidas, e serão consideradas para o cálculo das distâncias laterais à esquerda (y_e) e à direita (y_d) do robô.

A determinação das distâncias laterais (y_e) e (y_d), para qualquer das situações representadas na Figura 3.53, é realizada considerando só a quantidade de detecções definidas como válidas,

projetando-as na ordenada local do veículo segundo as Equações 3.49 e 3.50 para as projeções que correspondem à direita e a esquerda, em que (d) representa a medição para cada um dos passos considerados do sensor LIDAR, o índice (j) representa todos os passos considerados do sensor LIDAR, em que o passo inicial e o passo final para as medições à direita e à esquerda são definidos segundo o explicado para as situações da Figura 3.62. Tanto para esquerda como para a direita, todas as projeções das medições válidas são somadas para determinar a distância lateral (y_e) e (y_d) segundo se define nas Equações 3.51 e 3.52.

$$pro_{y_d}[j] = (d[j])\cos(0,25j - 45 + e_\psi) \quad \text{Eq. 3.49}$$

$$pro_{y_e}[j] = (d[j])\cos(0,25j - 45 + e_\psi) \quad \text{Eq. 3.50}$$

$$y_d = \frac{\sum_{j=passo_{iniD}}^{j=passo_{fimD}} pro_{y_d}[j]}{\# \text{ projeções à direita válidas}} \quad \text{Eq. 3.51}$$

$$y_e = \frac{\sum_{j=passo_{iniE}}^{j=passo_{fimE}} pro_{y_e}[j]}{\# \text{ projeções à esquerda válidas}} \quad \text{Eq. 3.52}$$

Dado que se pretende que o #Elvis-3.1 se desloque no meio dos caminhos de cultura entre as respectivas fileiras, o valor de referência de distância desejada (y_d) que se informa ao sistema de controle em malha fechada é de valor *zero*. O valor medido para distância lateral que se entrega ao sistema de controle, corresponde à diferença entre as distâncias laterais medidas y_d e y_e ($y = y_d - y_e$). O sinal negativo é característico da distância lateral pela esquerda, como consequência das projeções realizadas usando cossenos, o que pode se verificar nas Equações 3.51 e 3.52.

Manobra em plantio em fileiras com menos espaçamento

A ausência de plantas no final das fileiras de cultura determina o final de cada uma destas fileiras, o que se considera como o final de caminho. Uma vez que se detecta o final do caminho que está se seguindo, deve proceder-se a realizar uma manobra que garanta a entrada do veículo no caminho de cultura vizinho seguinte. Dado que o espaçamento entre fileiras é de menor magnitude (no caso 1,0m), resulta necessário realizar uma manobra composta de vários movimentos do veículo, até o momento em que o protótipo consegue entrar no caminho de cultura seguinte. A realização da manobra está suportada em um

sistema de controle baseado em regras que pode ser explicado a partir do representado nas Figuras 3.63, 3.64 e 3.65.

Figura 3.63 Primeira parte da manobra. (A) - Representação em sequência da primeira parte da manobra; (B1) – Representação do estado três da manobra quando o sensor LIDAR detecta fileira; (B2) - Representação do estado três da manobra quando o sensor LIDAR detecta espaçamento.

Na Figura 3.63(A) se representa a primeira parte correspondente à manobra para o encontro e entrada no caminho de cultura seguinte. Segundo se observa no primeiro momento, que foi detalhado como o estado (1), o veículo deve continuar o seu deslocamento para frente, mas com as suas rodas esterçadas à direita, o que gera a passagem pelo estado intermediário (2), enquanto que sensor IMU constantemente mede a orientação do veículo, de forma que este é forçado a parar quando se detecta que a sua orientação mudou 90° em relação à orientação desejada para o seguimento do caminho de cultura anteriormente

realizado, o que se representa com o estado (3). Assumindo como primeira fileira a que está localizada à esquerda do robô durante o seguimento do caminho e antes de iniciar a primeira parte da manobra, experimentalmente foi observado que, para a localização no estado (3), o veículo podia se encontrar do lado da terceira fileira de cultura ou um pouco mais para frente, como o representado na Figura 3.63(B1) e 3.63(B2) respectivamente. Uma vez que o veículo se encontrava localizado como representado no estado (3), então o veículo devia iniciar a segunda parte da manobra.

Figura 3.64 Representações das diversas situações de detecção de fileiras e espaçamentos durante a execução da segunda parte da manobra quando se inicia com detecção de fileira.

A segunda parte da manobra começa no estado (3), seja nas circunstâncias (B1) ou (B2) como representado na Figura 3.63. De acordo com o representado, desde este momento o veículo deve iniciar o seu deslocamento em reverso utilizando o sensor LIDAR para detectar

as fileiras e os caminhos da cultura no percurso. Durante a realização desta tarefa, foram considerados só os dados detectados entre -10° até $+10^\circ$, o que implica a consideração das medições entre os passos 140 e 220 do LIDAR. Na Figura 3.64 se representam as situações gerais que acontecem quando o veículo encontra-se realizando o percurso indo de ré. Consequentemente, na Figura 3.64(A), representa-se que o veículo encontra-se em situação idêntica à descrita para a Figura 3.63(B1), detectando-se uma primeira fileira; posteriormente, dado que o robô se desloca para trás, haverá um momento em que o sistema de percepção detecta um primeiro espaçamento entre fileiras tal como se representa para o estado (4) na Figura 3.64(B); depois, detecta-se uma segunda fileira como se representa para o estado (4.1) na Figura 3.64(C); finalmente, um segundo espaçamento é detectado, representado pelo estado (5).

A sequência apresentada na Figura 3.65 representa as situações que acontecem de forma similar ao apresentado para a Figura 3.64, mas diferenciando-se em que no estado (3) detecta-se inicialmente um espaçamento, tal como se representa na Figura 3.65(A); uma vez que o veículo se desloca em ré, há de se detectar uma primeira fileira segundo representado no estado (4) na Figura 3.65(B). Na medida em que o veículo continua com o seu percurso, há de acontecer as situações de detecção de espaçamentos como se representa para os estados (4.1) e (5) na Figura 3.65(c), assim como detecção de fileiras como se representa para o estado (4.2); quando o veículo se encontra localizado como se representa para o estado (5) nas Figuras 3.64 ou 3.65, a terceira parte da manobra deve começar. Deve-se aclarar que o deslocamento veículo em ré foi realizado mantendo as rodas fixas com esterçamento nulo.

A terceira parte da manobra inicia quando o veículo se encontra localizado como se representa para o estado (5) nas Figuras 3.64(D) ou 3.65(E), deslocando o veículo para frente, mas mantendo as rodas esterçadas à sua direita, passando pelo estado (6) representado na Figura 3.66 até que o veículo se encontre posicionado com uma orientação de 180° adicionais à orientação desejada no seguimento para o caminho de cultura anteriormente seguido, o que se representa com o estado (7) da Fig. 3.66. Posteriormente, o veículo deve iniciar o seguimento do segundo caminho de cultura usando uma vez mais o controlador H_∞ .

De acordo com o anterior, foi decidido numerar os caminhos a seguir de forma que, no caso da finalização para os caminhos ímpares, o veículo deve realizar a manobra como explicado para as Figuras 3.63, 3.64 e 3.65. Para o caso da finalização do percurso de fileiras pares, o veículo deve manobrar similarmente ao explicado para a manobra explicada previamente só se diferenciando em que os esterçamentos são realizados à esquerda.

Figura 3.65 Representações das diversas situações de detecção de fileiras e espaçamentos durante a execução da segunda parte da manobra quando se inicia com detecção de espaçamento.

Figura 3.66 Representação relacionada com a terceira parte da manobra de encontro do seguinte caminho de cultura.

3.4 Conclusões

Segundo o apresentado neste capítulo, configurou-se um sistema robótico no qual, além da estrutura e componentes mecânicos, foram adequadamente instalados e configurados diversos dispositivos, sensores e atuadores levando à utilização de bibliotecas programáveis com a linguagem de programação C++. Como consequência, o uso da informação fornecida pelos sensores instalados, o acionamento dos atuadores e a implementação do controlador desenvolvido implicaram no aperfeiçoamento no apropriado uso da linguagem de programação C++ e o sistema operacional Linux.

Neste capítulo foram apresentados vários elementos importantes para o desenvolvimento de um projeto, que levassem ao cumprimento da missão estabelecida desde definição do problema na introdução desta tese. Inicialmente, realizou-se uma apresentação o mais detalhada possível do protótipo #Elvis-3.1, para posteriormente, definir o modelo cinemático que seria fundamental na definição de um sistema de controle em malha fechada. Há se realizado o projeto de controle linear utilizado a técnica de otimização H_{∞} . Consequentemente, há se considerado um sistema de controle SISO, de forma que para

modelo cinemático considerado do #Elvis-3.1, foi desenvolvido e simulado um sistema de controle para seguimento de muro. As simulações foram realizadas considerando um sistema de controle de um grau de liberdade, assim como de dois graus de liberdade. Para o caso do sistema de controle de dois graus de liberdade, foram realizadas as simulações para vários controladores correspondendo com diversos coeficientes (γ). O projeto de controle apresentado considera a ocorrência de distúrbios, aproximando-se à robustez do sistema de um controle ótimo.

Em concordância com a sequência temática apresentada neste capítulo, finalmente define as especificações requeridas para a realização de experimentos tanto de seguimento de muro, como de seguimento de fileiras de cultura artificial para realizar experimentos *indoor* e seguimento de fileiras de cultura real. Em concordância, se define o modo de uso dos diversos dispositivos embarcados, tais como sensores, etapas de potência, atuadores e unidade de controle.

Capítulo 4

Resultados

Nesse capítulo, apresentam-se os resultados alcançados segundo os experimentos especificados no capítulo 3. Para todos os casos experimentados, de acordo com o apresentado no capítulo anterior, foi implementado um sistema de controle H_∞ , correspondente ao coeficiente $\gamma = 0,9275$.

4.1 Resultados Alcançados com o Seguimento de Muro

De acordo com as especificações definidas no capítulo anterior para realizar testes de controle de seguimento de muro, foram realizados experimentos com o intuito de coletar informação, que permitisse determinar a confiabilidade do sistema configurado, para posteriormente, passar a realizar adaptações que permitissem aproveitar esta aplicação em função do seguimento de fileiras de cultura agrícola.

A Figura 4.1 apresenta uma fotografia do *helvis-3.1*, durante a realização de um experimento de seguimento de muro contínuo, usando o controlador H_∞ projetado e implementado. Na Figura 4.2 se plota o sinal de controle e a distância lateral a qual se encontra afastado o *helvis-3.1* em relação ao muro que se pretende seguir. É possível visualizar o vídeo do experimento realizado através de Internet em (PORTAL YOUTUBE_2, 2016).

Figura 4.1 Fotografia do #Elvis-3.1 durante um experimento para a realização da tarefa de seguimento de um muro contínuo usando controle H_∞

Segundo o apresentado nos gráficos da Figura 4.2, é adequado esclarecer que as ações de controle descritas correspondem ao grau de esterçamento aplicado à roda dianteira central no modelo virtual simplificado da bicicleta, que corresponde com o modelo cinemático definido no capítulo anterior. Esse valor angular finalmente é assumido pelo mecanismo de Ackerman do veículo. Também pode-se observar que se tenta sempre que o robô se mantenha afastado a uma distância de $2m$ em relação ao muro seguido.

Figura 4.2 Gráficos obtidos de um experimento real. São apresentados os dados correspondentes com o sinal de controle e distância lateral a qual se encontra afastado o #Elvis-3.1 em relação ao muro que se pretende seguir.

4.2 Resultados Alcançados com o Seguimento de Barreira Vegetal Artificial

Uma vez se considerou que os resultados alcançados com a realização de experimentos de seguimento de muro demonstraram ser aceitáveis, procedeu-se a realizar as adaptações que foram especificadas no capítulo 3, para assim realizar o seguimento de fileiras de cultura artificial à direita do robô, todo com o intuito de aproximar ao seguimento de um muro descontínuo.

Figura 4.3 Apresentação de experimentos de seguimento de barreira vegetal artificial. (a) Imagem *#Elvis-3.1* durante o experimento. (b) Visualização do ambiente usando o sensor LIDAR

Para a realização dos experimentos de seguimento de barreira vegetal artificial, configurou-se uma fileira de $6m$ de comprimento utilizando várias unidades como as apresentadas na Figura 3.54 no Capítulo 3. Também no Capítulo 3, na Figura 3.55 apresentam-se algumas imagens que correspondem ao *#Elvis-3.1* durante realização de experimentos com barreira vegetal artificial.

A tarefa a realizar, em relação com o seguimento de uma barreira vegetal artificial, consistia em manter o veículo afastado a uma distância lateral de $0,4m$. Na Figura 4.3(A) apresenta-se uma imagem do *#Elvis-3.1* seguindo a barreira vegetal artificial à sua direita, enquanto que, na Figura 4.3(B), apresenta-se uma visualização do ambiente através do uso do sensor LiDAR em um instante de tempo. De acordo com o apresentado, a respectiva barreira vegetal artificial é delimitada por uma elipse de cor vermelho. Adicionalmente, o sensor

LIDAR no robô é representado por um círculo de cor marrom na coordenada $(0,0)$. Pode se observar a visualização se realiza para o sistema de coordenadas solidário ao robô e pelo tanto, o robô sempre estará na origem. Em concordância, todos os demais dados visualizados correspondem a objetos que estão no ambiente, mas que não são considerados para a realização da tarefa de controle. É adequado mencionar que os dados são visualizados segundo o sistema de coordenadas local do veículo definido com o modelo cinemático utilizado e apresentado no Capítulo 3. Também é adequado mencionar que a visualização da informação detectada pelo sensor LIDAR se realiza através do uso das ferramentas gráficas disponíveis com o ambiente de desenvolvimento *MatlabTM*.

Figura 4.4 Visualização do ambiente detectado pelo sensor LIDAR do #Elvis-3.1 em 4 instantes diferentes de tempo

Figura 4.5 Gráficos relacionados com a distância lateral medida e o erro de distância lateral durante a realização de um experimento de seguimento de barreira vegetal artificial

Figura 4.6 Gráficos relacionados com o erro de distância e δ_d a ação de controle H_∞ durante a realização de um experimento de seguimento de barreira vegetal artificial

Através do uso das utilidades gráficas disponíveis no *MatlabTM*, especificamente usando o comando *plotyy*, foram gerados os gráficos apresentados na Figura 4.5, na qual se plota a distância lateral medida (y) e o erro de distância lateral (e_y) durante o seguimento da fileira configurada e visualizada de acordo com a Figura 4.3 e 4.4. De acordo com a informação plotada, se observa que o veículo inicialmente encontrava-se afastado uma distância de aproximadamente $0,49m$ da fileira a ser seguida, correspondendo isso a um erro de distância de $-0,09m$. Posteriormente, pode-se notar que perto do final da fileira, o erro de distância é aproximadamente zero; para o caso do mesmo experimento, na Figura 4.6, plota-se o erro de distância e ação de controle H_∞ . Segundo o observado, pode-se notar que à medida em que o erro de distância diminui então a ação de controle também diminui.

4.3 Resultados Alcançados com o Seguimento de Barreira Vegetal Real

Nessa subseção, apresentam-se alguns resultados correspondentes à realização de experimentos para avaliar o comportamento do sistema de *controle de caminho*, enquanto o robô avançasse mantendo-se no meio da rua disponível entre duas filas de cultura. Neste caso já contando com plantas de milho, que foram plantadas em vasos adequados para a sua conservação e fácil transporte, tal como foi apresentado no capítulo anterior.

4.3.1 Resultados para Espaçamento entre fileiras de $1,80m$

Primeiramente, a realização de experimentos de controle de seguimento de caminhos de cultura, foi abordada levando em conta a limitação mecânica relacionada com os máximos ângulos de esterçamento para as rodas frontais do *4Elvis-3.1*, de forma tal que se configurou um cenário de cultura com plantas de milho com um espaçamento entre fileiras de $1,80m$. Consequentemente, na Figura 4.7 apresentam-se as fileiras de cultura detectadas para um instante de tempo durante uma viagem do veículo no meio da cultura. Pode-se observar que a cultura foi configurada com fileiras retas de plantio, respeitando o espaçamento de $1,80m$ entre estas. As respectivas fileiras eram de aproximadamente de $6m$ de comprimento; de acordo com apresentado na Figura 4.7(A), as fileiras detectadas estão delimitadas por elipses de cor vermelha. Além disso, estas fileiras foram numeradas, notando-se 4 fileiras conformando um sistema de plantio retangular. O conjunto de dados enfatizado com a letra H corresponde com o veículo, enquanto que os objetos detectados que não correspondem com a cultura configurada são apenas circundados em vermelho; na Figura 4.7(B) apresentam-se os dados que são considerados para definir a distância lateral que separa o veículo da fileira mais

próxima à direita sobrepondo pontos de cor vermelha. Estes dados considerados se definem segundo algoritmo apresentado previamente para seguimento de fileira vegetal artificial.

Figura 4.7 Fileiras de cultura detectadas.

Figura 4.8 Visualização de dados relacionados com o ambiente detectado.

Figura 4.9 Gráficos relacionados com o desempenho do Sistema de controle no seguimento de fileiras com espaçamento de 1,80m entre elas. (a) Distância lateral medida. (b) Ação de controle H_{∞} .

O percurso completo das fileiras de cultura configuradas é muito similar ao representado na Figura 1.8 no subitem 1.4 do Capítulo 1. A Figura 4.8 foi incluída para apresentar uma visualização do ambiente detectado, para 4 instantes de tempos diferentes, durante a realização da tarefa de seguimento de fileiras retas à direita do robô. Para todas as situações apresentadas, todos os objetos detectados são plotados utilizando pontos de cor preta, enquanto os dados considerados para determinar a distância lateral a ser utilizada no sistema de controle foram realçados usando pontos de cor vermelha. A distância lateral calculada é também plotada usando uma cruz de cor vermelha; para todas as situações plotadas, o robô móvel é representado por um pequeno círculo de cor marrom que se encontra sempre posicionado na origem do sistema de coordenadas.

De acordo com o apresentado na Figura 4.8, nas situações *A* e *B* foram plotados os respectivos instantes de tempo em momentos em que o veículo encontrava-se certamente longe de acabar o percurso do caminho correspondente, em comparação com as situações *C* e *D* em que foram plotados os respectivos instantes de tempo em momentos em que o veículo encontrava-se perto do final da fileira correspondente; dado que os experimentos foram realizados para um espaçamento entre fileiras de $1,80m$, o controlador foi configurado para tentar manter o robô a $0,90m$ da fileira seguida durante o seu deslocamento pra a frente.

Sabendo que o seguimento de fileiras de cultura é realizado através do adequado desempenho de um sistema de controle em malha fechada usando um controlador H_{∞} , a Figura 4.9 permite apresentar informação relacionada ao respectivo desempenho. A Figura 4.9(A) plota a distância lateral medida até a fileira de cultura à direita do robô que está sendo seguida, enquanto o robô se desloca para frente nas fileiras *R1*, *R2* e *R3*; na Figura 4.9(B) se plota a respectiva ação de controle H_{∞} ao longo do percurso de cada fileira; para toda a informação plotada na Figura 4.9, observa-se que durante a realização de curvaturas não se plotou informação alguma, apresentando-se isso durante os períodos de tempo *T1* e *T2*; para o seguimento da primeira fileira, o veículo é posicionado manualmente com uma orientação paralela às fileiras retas. Subsequentemente, a respectiva orientação é medida e reconhecida como a orientação desejada para o seguimento da primeira e terceira fileira. Para o caso do seguimento da segunda fileira, a orientação desejada corresponde à orientação na primeira fileira, mas deslocada 180° . Um vídeo relacionado ao experimento encontra-se em (PORTAL YOUTUBE_3, 2016).

Figura 4.10 Uma visão aumentada das fileiras de cultura. (a) *#Elvis-3.1* no meio de fileiras. (b) Uma imagem aumentada de uma fileira.

De acordo com a informação plotada na Figura 4.9, durante o seguimento da primeira fileira (*R1*) o veículo começou o seu deslocamento a uma distância lateral perto do valor desejado para a respectiva separação. Contudo, durante o seu respectivo percurso, o veículo experimentou variações que são causadas pelas irregularidades do solo, a variação da distância lateral medida por causa de folhas caídas, e também irregularidades na forma dos talos das plantas nas fileiras; uma vez finalizado o seguimento da fileira *R1*, o veículo manobra durante o período de tempo *T1* para entrar no caminho de cultura que corresponde com a fileira *R2*. Pode-se apreciar que, no começo da realização da tarefa de seguimento da fileira *R2*, o veículo já entra apresentando um erro de distância de aproximadamente $0,10\text{ m}$. Tal como se observa, esse erro diminui com o passar do tempo e o veículo consegue posicionar-se segundo distância lateral desejada; uma vez finalizado o seguimento da fileira *R2*, durante o período de tempo *T2* o veículo realiza a manobra de curvatura para entrar na fileira *R3*; no começo do seguimento da fileira *R3*, pode-se observar que a distância lateral apresenta um erro negativo de $-0,50\text{ m}$. Também pode-se observar que com o passar do tempo, o erro de distância tende a ser corrigido; a Figura 4.9(B) apresenta a ação de controle que o controlador H_∞ solicita ao baixo nível de controle para o esterçamento das rodas frontais do veículo. Segundo se observa, a ação de controle apresenta variações em concordância com erro de distância lateral.

As imagens incluídas na Figura 4.10 apresentam mais informação relacionada ao cenário em que o veículo deve realizar a sua tarefa de seguimento de fileiras de cultura. Na Figura 4.10(A) apresenta-se o veículo no meio de duas fileiras de cultura, durante a realização da respectiva tarefa de seguimento. Na Figura 4.10(B) visualiza-se uma fileira de cultura em um dos seus lados, para observar que se existem variações laterais ocasionadas pela presença de folhas caídas e irregularidades na forma dos talos.

4.3.2 Resultados para Espaçamento entre Fileiras de $1,0\text{ m}$

Uma vez determinado que o seguimento de fileiras com espaçamento de $1,80\text{ m}$ entre elas demonstrou um desempenho aceitável, procedeu-se a reduzir este espaçamento a $1,0\text{ m}$, segundo as respectivas especificações para testes que foram definidas no Capítulo anterior. Na Fig. 4.11 apresenta-se uma imagem do cenário da cultura configurada.

A partir do uso das ferramentas gráficas disponíveis no entorno de desenvolvimento do *MatlabTM*, foram plotadas diversas variáveis que permitem verificar o desempenho do veículo durante a realização da tarefa de controle de seguimento de todos os caminhos de cultura que

foram configurados. A Figura 4.12 apresenta uma imagem do #Elvis-3.1 enquanto navega entra as fileiras da cultura.

Figura 4.11 Imagem da cultura configurada com espaçamento entre fileiras de 1,0m

Figura 4.12 Imagem do #Elvis-3.1 enquanto se deslocava no meio de fileiras de cultura com espaçamento de 1,0m entre elas

Figura 4.13 Visualização de dados de cultura detectada em um instante de tempo

A determinação da distância lateral medida e considerada para realizar a tarefa de controle se suporta na detecção de fileiras de cultura aos dois lados do robô de acordo com as especificações definidas no Capítulo 3. Consequentemente, o valor de referência relativo à distância lateral desejada foi definido como *zero*, com o intuito de provocar que o robô apresentasse uma tendência a percorrer os caminhos de cultura pelo meio. Dessa forma, dado que o objetivo de controle consiste em manter o veículo no centro do caminho entre as fileiras da cultura, então foram consideradas as distâncias laterais aos dois lados do robô, de modo que a distância lateral, que é informada ao sistema de controle em malha fechada, resulta de um cálculo aritmético, adicionando a distância lateral à direita e a distância lateral à esquerda ($y = y_d - y_e$). O sinal negativo é característico da distância lateral pela esquerda, como consequência das projeções realizadas usando cossenos, o que pode se verificar nas respectivas equações no Capítulo 3.

A Figura 4.13 apresenta uma visualização dos dados detectados pelo sensor LiDAR durante a realização da tarefa de controle para um instante de tempo. No caso, todos os objetos detectados são representados com cruzes de cor preta enquanto os dados considerados para o sistema de controle são diferenciados em cor magenta e cor vermelha. A cor vermelha

permite diferenciar os dados que são considerados para a determinação da distância lateral à direita do protótipo, enquanto a cor magenta corresponde aos dados considerados para definição da distância lateral à esquerda. Pode-se notar que o ponto de medição (representando o sensor LiDAR) para as distâncias laterais se representa com um círculo marrom na posição $(0,0)$ do sistema de coordenadas; na Figura 4.13 se plotaram os dados correspondentes ao começo da primeira fileira quando o veículo foi colocado para iniciar a realização da sua tarefa de controle. Pode-se notar que a distância lateral calculada é $y = -0.03 \text{ m}$.

Figura 4.14 Visualização de dados de cultura detectada em um instante de tempo

A Figura 4.14 apresenta os dados detectados pelo sensor LIDAR em um instante de tempo posterior ao início da realização da tarefa de controle. Pode-se observar que o robô já percorreu parte do caminho que corresponde de acordo com os dados plotados na Figura 4.13, observando-se que o robô se encontra a aproximadamente a 3m do final do caminho,

em comparação com os aproximadamente $5m$ da situação da Figura 4.13. No caso comentado, a distância lateral em relação ao centro do caminho é aproximadamente $0.06m$.

Figura 4.15 Visualização de dados de cultura detectada em um instante de tempo perto ao final do caminho seguido.

A Figura 4.15 apresenta uma situação na qual o veículo se encontrava perto do final do caminho. A distância lateral em relação ao centro de dito caminho é de aproximadamente $-0.01m$. Também é possível observar que a orientação das fileiras detectadas apresenta uma ligeira diferença de orientação em relação com o eixo X_{local} do veículo. Tanto na Figura 4.14, como na Figura 4.15, observa-se que há um objeto plotado no final de cada fileira, certamente separado uma distância de aproximadamente $0,30m$. Esses objetos correspondem a canos de PVC que foram colocados no final de todas as fileiras, dado que experimentalmente se observou que a sua presença gerava uma maior estabilidade na realização de manobra.

Figura 4.16 O *hElvis-3.1* durante a realização de seguimento de caminho de cultura com espaçamento entre fileiras de 1,0m

A Figura 4.16 apresenta uma imagem do *hElvis-3.1* durante a realização da tarefa de controle de seguimento de caminho de cultura quando o espaçamento entre fileiras era de 1,0m e foram colocados canos de PVC no final de todas as fileiras. Um vídeo relacionado com o experimento encontra-se publicado em (PORTAL YOUTUBE_4, 2016).

Na Figura 4.17 se incluem considerações relacionadas à primeira parte da manobra para o veículo se dirigir ao caminho de cultura seguinte, e sobre a qual se fez a descrição detalhada no Capítulo 3. Na Figura 4.17(**B**) apresenta-se uma visualização do ambiente quando o robô está se deslocando no caminho de cultura, e portanto está detectando fileiras para a realização do respectivo controle; essa visualização foi incluída para apresentar informação quando o robô encontra-se perto do final de fileira, e portanto, posteriormente deve-se iniciar a primeira parte da manobra; posteriormente, o final de fileira é detectado, e o veículo encontra-se na situação representada pelo estado (**I**) na Figura 4.17(**A**), iniciando-se a primeira parte da manobra, o que se apresenta na Figura 4.17(**C**), na qual pode-se observar que só se visualizam dados usando cruzes pretas, o que representa que a função de detecção de fileiras deixa de ser realizada, embora o sensor LIDAR continua visualizando o ambiente;

depois, o veículo passa pelo estado (2) na Figura 4.17(A) e cuja visualização de ambiente se apresenta na Figura 4.17(D); posteriormente o veículo alcança o estado (3) na Figura 4.17(A), para o qual, a respectiva visualização do ambiente se apresenta na Figura 4.17(E). Neste momento finaliza a primeira parte da manobra iniciando-se subsequentemente a segunda parte.

Figura 4.17 Visualização de dados relativa à primeira parte da manobra

Figura 4.18 Visualização de dados pelo sensor LIDAR durante a realização da segunda parte da manobra (indo de ré).

Na Figura 4.18 se visualizam algumas situações relacionadas à realização da segunda parte da manobra, na qual o veículo estava indo de ré. Nas Figuras 4.18 (A), (B), (C) e (D) se incluiu novamente a sequência previamente apresentada no Capítulo 3 para a Figura 4.64. De acordo com a informação detectada e visualizada, uma vez o veículo posicionou-se a 90° à direita da orientação desejada para a terceira fileira justamente no estado (3) representado na

Figura 4.18(A). Pode-se notar que o cano de PVC foi detectado e é representado circundando-o em vermelho na visualização do ambiente da Figura 4.18 (E); subsequentemente um primeiro caminho de cultura é detectado tal como se representa na visualização de dados apresentada na Figura 4.18(F) e, a representação deste evento com o estado (4) na Figura 4.18(B); posteriormente, a detecção de uma segunda fileira se realiza como representado pelo estado (4.1) na Figura 4.18(C) e respectiva visualização do ambiente, detectando-se a respectiva fileira como se apresenta na Figura 4.18(G); a finalização da segunda parte da manobra ocorre com a detecção de um segundo espaçamento como se representa com o estado (5) na Figura 4.18(D) e a respectiva visualização do ambiente se apresenta na Figura 4.18(H); o estado (5) determina o fim da segunda parte da manobra e o início da respectiva terceira parte.

A Figura 4.19(A) inclui novamente uma representação da respectiva sequência, enquanto as outras figuras apresentam visualizações do ambiente correspondendo à terceira parte da manobra. A Figura 4.19(B) apresenta-se uma visualização do ambiente de acordo com o estado (5) na Figura 4.19(A); dado que posteriormente o veículo passa pelo estado (6) da Figura 4.29(A), a respectiva visualização do ambiente se apresenta na Figura 4.19(C); a passagem do veículo pelo estado (7) da Figura 4.19(A) corresponde à visualização de dados que se apresenta na Figura 4.19(D). Dado que subsequentemente o veículo deve uma vez mais realizar o controle de seguimento de caminho de cultura, então a Figura 4.19(F) foi incluída para demonstrar que a terceira parte da manobra finalizou e iniciou-se novamente o seguimento de caminho usando o sistema de controle em malha fechada H_{∞} .

Posteriormente ao seguimento de caminhos de cultura pares, deve-se realizar uma manobra similar à anteriormente descrita, diferenciando-se que as rodas dianteiras do veículo devem esterçar à esquerda (quando se requiere) e em que o intervalo dos passos do sensor LIDAR correspondem ao passo 860 até o passo 940 para abranger um intervalo angular desde 170° até 190° ou 20° à esquerda da estrutura do robô móvel.

Figura 4.23(a) apresenta os dados correspondentes ao final do segundo caminho de cultura seguido, justo no começo da realização da manobra para esquerda. Posteriormente na Figura 4.23(b) apresenta-se a informação detectada quando o veículo alcança uma orientação 90° à esquerda da orientação desejada para a segunda fileira, justo no momento em que o robô móvel deve se deslocar indo de ré. Subsequentemente, a Figura 4.23(c) apresenta a informação detectada no momento em que o veículo detecta o espaçamento que corresponde com o início da parte da manobra para entrar no caminho de cultura consecutivo; e a Figura

4.23(d) apresenta-se os dados detectados uma vez que o veículo se encontra dentro da terceira fileira de cultura.

Figura 4.19 Visualização do ambiente durante a realização da terceira parte da manobra.

Análise de Desempenho do Sistema de Controle em malha Fechada H_{∞}

A análise do desempenho do sistema de controle em malha fechada no seguimento dos caminhos de cultura no cenário configurado é realizada a partir da plotagem das variáveis que providenciam informação relacionada ao comportamento do sistema no domínio do tempo.

A Figura 4.20 apresenta a informação correspondente ao desempenho do sistema de controle durante o seguimento de 5 caminhos de cultura. Pode-se notar que somente é considerada a informação relativos aos períodos de tempo $R1$ até $R5$ que correspondem ao seguimento dos respectivos caminhos. Os períodos de tempo $T1$ a $T4$ não são considerados, pois correspondem com a realização da manobra para a entrada no caminho de cultura vizinho. Dado que se pretende que o veículo percorra os caminhos da cultura mantendo-se no meio de estes, então a distância lateral desejada (y_d) durante o percurso todo deve ser zero. Segundo o observado, na primeira rua o veículo começa a realização da sua tarefa com pouco erro de distância (e_y) devido a que ele foi posicionado manualmente muito aproximadamente a uma posição ideal no meio do primeiro caminho e com uma orientação paralela às fileiras de cultura. Como se observa, na medida em que o veículo se deslocava para frente na respectiva rua $R1$, este experimentou mudanças ocasionadas por variações na regularidade do solo, provocando-se desvios forçados de baixa magnitude e consequentemente erros de distância de baixa magnitude. Em concordância, observa-se que o erro de distância se manteve perto de zero; posteriormente, a realização da manobra até encontrar a segunda rua ($R2$) é executada durante o período de tempo $T1$; uma vez que o veículo se encontra dentro do caminho que corresponde ao caminho $R2$, observa-se que o veículo inicia o respectivo percurso com um erro de distância de aproximadamente $0.18m$. No passar do tempo, este erro é diminuído por causa do acionar do controlador, de maneira que finalizando o respectivo percurso se apresenta um erro de distância lateral de erro de aproximadamente $-0.1m$; posteriormente à realização da manobra durante o período de tempo $T2$, pode-se observar que no começo do percurso da terceira rua ($R3$) o veículo entrou em este caminho com um erro de distância de aproximadamente $0.4m$, o qual tende a ser reduzido a zero durante o percurso de dita rua; similarmente para as ruas $R4$ e $R5$, o veículo entra nas respectivas trilhas com erros de distância lateral que foram reduzidos durante o respectivo percurso; para todos os casos analisados para as trilhas percorridas pelo #Elvis-3.1, na Figura 4.20 apresenta-se o gráfico da correspondente ação e controle H_{∞} a qual

consiste no esterçamento desejado (δ_d) que será solicitado ao subsistema de esterçamento na camada de controle de baixo nível.

Figura 4.20 Gráficos relacionados com o erro de distância e a respectiva ação de controle durante a realização de um experimento

A informação plotada na Figura 4.20 também apresenta informação relacionada à ação de controle (δ_d) solicitada pelo controlador H_∞ . Segundo o observado, esta ação de controle supera os limites suportados pelo mecanismo de esterçamento do protótipo robótico que foram definidos no Capítulo 3. Para evitar a destruição deste mecanismo, foi necessário estabelecer os valores máximos de esterçamento que podem ser solicitados ao subsistema de esterçamento. A limitação comentada foi realizada através da aplicação de software programado com a linguagem de programação C++ e implementado no computador embarcado no #Elvis-3.1. O (δ_{d1}) é a ação de controle H_∞ saturada de acordo com os limites mecânicos de esterçamento.

Figura 4.21 Gráficos relacionados com ação de controle requerida e ação de controle limitada para proteger o mecanismo de esterçamento.

O efeito da limitação nos ângulos de esterçamento tanto para a direita como para a esquerda do protótipo pode ser verificado com mais detalhe na Figura 4.21 na qual é possível observar que a ação de controle gerada pelo controlador H_{∞} (δ_d) coincide com a solicitada (δ_{d1}) ao baixo nível de controle exceto quando supera os $+25^{\circ}$ ou os -22° . Esclarecendo assim que $+25^{\circ}$ e -22° são os valores máximos de esterçamento permitidos por causa da realidade mecânica do protótipo.

Durante a realização da tarefa de controle do veículo se apresentam erros de orientação que segundo o observado ocorrem por causa das irregularidades do solo que induzem o desvio do veículo em relação com o meio do caminho de cultura. O desvio do veículo, muitas vezes também ocorre por causa de presença de folhas caídas e irregularidade na forma dos talos das plantas, o que influencia na medição realizada pelo sensor LIDAR modificando ligeiramente as distâncias laterais medidas. A Figura 4.22 mostra o erro de

orientação (e_ψ) do veículo durante a realização da tarefa de controle nos 5 caminhos de cultura como comentado previamente. Ainda na Figura 4.22, o erro de distância é mostrado; dado que inicialmente o veículo é posicionado manualmente com erros de distância e orientação aproximadamente zero, pode-se observar que na primeira rua o veículo finaliza o seu percurso com um erro de orientação de aproximadamente $-4,5^\circ$, enquanto que na segunda rua o veículo começa o respectivo percurso com um erro de orientação de aproximadamente -9° conseguindo finalizar dita rua com um erro de orientação de aproximadamente $-4,6^\circ$; no caso da terceira fileira, pode-se observar que o veículo entrou em dita rua com um erro de orientação de aproximadamente -19° finalizando o respectivo caminho com um erro de orientação de aproximadamente -2° ; nos caminhos R_4 e R_5 , o veículo também entra com erros de orientação que tendem a ser reduzidos durante a realização do seguimento dos respectivos caminhos de cultura. De acordo com os resultados gerados a partir da realização de experimentos correspondentes, é possível observar que apesar da presença de erros de orientação, o veículo se manteve razoavelmente no meio dos caminhos de cultura tal como se pretende para aplicação funcional do robô móvel autônomo #Elvis-3.1.

Figura 4.22 Gráfico relacionados com o erro de distância e o erro de orientação.

Figura 4.23 Gráficos relacionados com a ação de controle requerida em graus e a ação de controle calculada segundo o polinômio de esterçamento.

Levando em conta que o acionamento do mecanismo de Ackerman para o esterçamento das rodas dianteiras do robô implica no uso de um polinômio, relacionando a ação de controle H_∞ solicitada em graus desde um alto nível de controle, e o valor numérico aplicado à placa Epos2 do subsistema de esterçamento, tal como se apresentou no Capítulo 3. De acordo com isto, a Figura 4.23 apresentam os gráficos correspondentes onde (δ_{a1}) é a ação de controle H_∞ saturada de acordo com os limites mecânicos de esterçamento. A variável (u) corresponde ao valor numérico transferido à placa Epos2 do subsistema de esterçamento.

Adicionalmente à realização de múltiplos experimentos durante a etapa de pesquisa do projeto apresentado nesta tese, foi decidido realizar um experimento para avaliar a afetividade da solução proposta nesta tese. Em concordância, realizaram-se 12 repetições de percurso completo na cultura configurada; de acordo com os resultados alcançados, somente em 2 vezes o veículo não conseguiu realizar o percurso completo, esclarecendo que estas duas vezes se apresentaram falhas durante a realização da manobra; portanto, as restantes 10

vezes o robô foi capaz de realizar o percurso completo da cultura configurada, demonstrando uma afetividade do 83,33% para o caso do experimento realizado; vale a pena ressaltar que o robô nunca apresentou falhas no controle de caminhos da cultura; a Figura 4.24 apresenta *boxplots* apresentando informação relacionada com o erro de distância (e_y) para cada uma das 10 vezes que o percurso foi completado; nesse sentido, a Figura 4.24(A) apresenta 10 *boxplots* correspondentes a 10 percursos do caminho 1 na cultura. Consequentemente, as Figuras 4.24 (B), (C) e (D) correspondem aos caminhos 2 até 4, respectivamente.

Figura 4.24 Boxplots of the distance error (e_y) 10 times for all crop paths. (a) First path.

(b) Second path. (c) Third path. (d) Fourth path.

De acordo com a informação plotada na Figura 4.24, observa-se que a média do erro de distância mantém-se perto de zero, enquanto o desvio observado se encontra dentro dos caminhos de cultura, apesar de que o teste finalmente apresentado quando a cultura

configurada já apresentava os efeitos do passar do tempo, sendo mais frequente a aparição de folhas caídas, e adicionalmente, a presença de plantas invasoras ao redor dos vasos de cultura, o qual se pode observar na Figura 4.25.

Figura 4.25 Imagem do ambiente com idade avançada e plantas invasoras

A realização dos experimentos relacionados aos *boxplots* da Figura 4.25 permitem obter informação do desempenho e efetividade do sistema, apesar que o ambiente apresenta mudanças próprias de um ambiente exterior, já que era inevitável a presença do vento movimentando as folhas das plantas, portanto gerando-se mudanças nas características das fileiras detectadas. Contudo, dado que o sistema de controle foi configurado para que o robô se deslocasse no meio dos respectivos caminhos, então se conseguiu que o robô procurasse andar sempre no meio dos caminhos de cultura.

4.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados alcançados de acordo com a realização dos experimentos especificados no Capítulo 3. Em concordância, foram revisados os resultados para controle de seguimento de muro, controle de seguimento de barreira vegetal artificial, para posteriormente revisar os resultados alcançados no seguimento de fileiras de cultura vegetal real com espaçamentos ente fileiras de 1,80m e 1,0m.

Os resultados alcançados demonstraram que o sistema de controle de seguimento caminhos de cultura utilizando o sistema de controle em malha fechada ótimo H_{∞} foi efetivo no total dos experimentos realizados, apresentando-se perda da afetividade na realização da manobra de entrada ao caminho de cultura vizinho seguinte.

O sistema de controle H_∞ aplicado no robô para o seguimento de caminhos de cultura demonstrou afetividade apesar de não contar com um modelo preciso, por causa da respectiva linearização, as incertezas próprias do modelo e dinâmica própria do ambiente. Em síntese, considera-se que a estratégia de controle H_∞ permite o uso de um modelo aproximado.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo se procede a fazer a apresentação das conclusões geradas a partir da realização da tese. Também se procede a propor trabalhos futuros que permitam entender o alcance conseguido com a realização do respectivo projeto de pesquisa.

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos a partir da realização do trabalho documentado nesta tese demonstram que é possível configurar um sistema robótico móvel devidamente projetado para realizar tarefas de suporte no campo agrícola. Nesse sentido, especificamente apontando à mecatrônica, existem diversas áreas do conhecimento que devem ser abordadas e que exigem a realização de um trabalho interdisciplinar, desde um árduo trabalho especificamente técnico e de engenharia até se aproximar à contribuição científica. Gerando-se uma coexistência entre o trabalho técnico e o trabalho científico que resulta fundamental no bom funcionamento do sistema robótico; adicionalmente, o desenvolvimento de um sistema mecatrônico como o ~~Elvis~~Elvis-3.1 orientado ao seu uso na agricultura implica introduzir-se em conceitos relacionados com a área agrônômica o que demonstra amplo panorama de aplicação que ostenta a mecatrônica e em particular a robótica móvel, assim como também demonstra o amplo panorama interdisciplinar de pesquisa com que conta o pessoal que desenvolve e aplica conhecimentos em mecatrônica e robótica.

O projeto de um controlador H_∞ exige o uso de um modelo matemático que representa a planta que se deseja controlar. Dadas as características relacionadas ao controle de deslocamento entre fileiras de cultura que se precisava implementar, um modelo cinemático foi abordado. Apesar de existir características físicas não incluídas no modelo cinemático utilizado, ocorrência de distúrbios durante a execução da tarefa de controle e a inevitável presença de ruído, observou-se que o sistema de controle em malha fechada H_∞ implementado foi capaz de rejeitar os efeitos dinâmicos não desejados, demonstrando assim consistência em relação ao sistema simulado durante a etapa de projeto. O primeiro permite destacar que o projeto de um controlador H_∞ a partir da definição da função de sensibilidade combinada desejada permite especificar com clareza para que efeitos dinâmicos que possam acontecer no sistema de controle em malha fechada, e o compensador deve assumir uma rejeição considerável. Através da análise dos resultados obtidos assim como a observação direta durante a realização de experimentos, observou-se que o sistema robótico teve a capacidade de transitar autonomamente pelo meio dos caminhos de cultura configurados apesar de que o solo apresentava algumas irregularidades e que as plantas da cultura que estavam organizadas em fileiras não necessariamente configuravam uma barreira vegetal descontínua perfeitamente reta por causa que os respectivos talos não são todos exatamente iguais na sua anatomia. Adicionalmente, quanto mais aumentava a idade das plantas, mais aumentava a presença de folhas caídas, o que aumentava a irregularidade da respectiva fileira. Contudo, o sistema de controle implementado apresentou um desempenho aceitável que pode ser reaproveitado para um trabalho futuro em que se aperfeiçoe o subsistema de percepção das fileiras de cultura.

A abordagem dos conceitos relacionados com o controle ótimo e robusto foi aplicada a uma série de situações, como as já expostas no conteúdo desta tese, as quais o #Elvis-3.1 deve enfrentar. Isto implica na abordagem de um considerável labor logístico, orientada à configuração de um ambiente de experimentação, que por se encontrar fortemente ligado à disponibilidade de uma cultura agrícola exigem a realização contínua de tarefas destinadas à conservação do ambiente de experimentos. O interessante do sugerido nessa conclusão se suporta no fato que o pesquisador principal e a sua equipe devem introduzir-se em conceitos relacionados com a agronomia, provocando um enriquecimento cognitivo interdisciplinar e uma abertura do panorama correspondente às novas aplicações da robótica móvel.

Finalmente, pode-se concluir que a realização deste trabalho contribuiu com o desenvolvimento da pesquisa em sistemas robóticos agrícolas, por meio da descrição do

processo de concepção da plataforma utilizada e do modelo matemático utilizado para o projeto e implementação de um controlador adequado, segundo a tarefa e o ponto de equilíbrio desejados para a sua operação. A sistematização das informações obtidas nesta tese de doutorado permitiu a publicação de uma série de trabalhos sobre o tema de robótica agrícola, os quais se espera que sirvam como referência para alavancar uma maior difusão das áreas de pesquisa relacionadas com os diversos tópicos abordados.

Em resumo, entre os resultados apresentados destacam-se:

- Revisão bibliográfica abrangendo as principais pesquisas relacionadas à robótica móvel agrícola, agricultura de precisão, sistemas de percepção, sistemas de controle e métodos para criação de projetos disponíveis na literatura;
- Levantamento dos parâmetros de funcionamento da plataforma robótica construída em específico a aplicações realizadas no ambiente agrícola;
- Definição clara de um modelo matemático que corresponda com a plataforma robótica utilizada. Dito modelo se relaciona diretamente com a tarefa de controle que se deseja executar assim como também com o ponto de equilíbrio. Os conceitos relacionados neste parágrafo são utilizáveis em outras plataformas similares que sejam projetadas para realizar tarefas similares sob condições cinemáticas;
- Desenvolvimento de uma rotina de controle;
- Realização de uma etapa de projeto e simulação do controlador implementado e experimentação real do sistema embarcado implementado;
- Realização de experimentos em uma aproximação de um ambiente agrícola para avaliar o desempenho do sistema de controle projetado;

5.2 Trabalhos Futuros

Considera-se que o projeto apresentado nesta tese constitui um avanço e é deixado em aberto a possibilidade de abordar projetos de desenvolvimento que superem o desempenho do trabalho entregue.

Considera-se necessário e possível considerar incertezas no modelo matemático da planta a fim de melhorar a estabilidade robusta do sistema de controle malha fechada implementado. Também em relação ao sistema de controle, propõe-se abordar a respectiva temática para o desenvolvimento de um sistema de controle robusto com múltiplas entradas e múltiplas saídas.

O método de navegação entre os caminhos de cultura que emprega o #Elvis-3.1 se assemelha a um método de navegação reativa. Aproveitando a existência da plataforma e a configuração de um espaço propício para a realização de experimentos, propõe-se abordar estratégias de navegação deliberativa utilizando o #Elvis-3.1, levando em conta que se dispõe de uma plataforma que facilita a instalação de mais sensores.

Para o caso da navegação autônoma na cultura com um espaçamento entre fileiras de 1,0m usando o #Elvis-3.1 e o sistema de controle em malha fechada H_{∞} implementado, foi observado que a manobra para a entrada no caminho de cultura vizinho demonstrou eficiência durante a realização dos experimentos correspondentes. Porém, considera-se que se deve realizar um trabalho dedicado ao desenvolvimento de estratégias de manobra que seja robusta frente a ocorrência de distúrbios.

O trabalho apresentado focou na implementação de um sistema de controle em malha fechada para deslocar controladamente o #Elvis-3.1 nos caminhos de cultura entre as respectivas fileiras retas. Propõe-se abordar um trabalho dedicado orientado ao desenvolvimento e aplicação de técnicas de navegação nos caminhos de cultura que apresentem fileiras conformadas com curvaturas, além de outro tipo de variações usuais no seu formato.

REFERÊNCIAS

AGHKHANI, M.; ABBASPOUR-FARD, M. Automatic off-road vehicle steering system with a surface laid cable: Concept and preliminary tests. *Biosystems engineering*, v. 103, n. 3, p. 265-270, 2009.

ANDERSON, I. P.; CARLSON, A.C.; EDWARDS, D.B.; ANDERSON, M.J.FEELEY, J. J. An autonomous forest robot that uses a hierarchical, fuzzy logic controller. *Transactions of the ASAE*, v. 48, n. 4, p. 1603-1617, 2005.

ANDREW, FW. Automatic tractor control. U.S. Patent n. 2,259,193, 14 out. 1941.

ASTRÖM, K. J.; MURRAY, R. M. Feedback systems: an introduction for scientists and engineers. Princeton university press, 2010.

BAKKER, T.; WOUTERS, H.; VAN ASSELT, K.; BONTSEMA, J.; TANG, L., MÜLLER, J.; & VAN STRATEN, G. (2008). A vision based row detection system for sugar beet. *Computers and electronics in agriculture*, 60(1), 87-95.

BAKKER, T.; ASSELT VAN, K.; BONTSEMA, J.; MÜLLER, J.; STRATEN VAN, G. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding, *Journal of Terramechanics*, v. 47, Issue 2, April 2010, p. 63-73.

BALAS, G.; CHIANG, R.; PACKARD, A.; SAFONOV, M. Robust control toolbox. for use with matlab. User's Guide, Version, March 2015 2015.

BALBINOT, J. A. A., FLECK, N. G. Redução do espaçamento entre fileiras: benefícios e limitações. *Plantio Direto*, v. 5, n. 87, p. 37-41, 2005.

BORENSTEIN, Johann et al. Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning. *University of Michigan*, v. 119, n. 120, p. 27, 1996.

VELÁSQUEZ, A. E. V. *hELVIS III* – desenvolvimento e caracterização da plataforma robótica. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharias de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

BAYAR G. Long distance autonomous trajectory tracking for an orchard vehicle. *Industrial Robot: An International Journal*. v. 40, n. 1, p. 27-40, 2013.

BAYAR, G.; BERGERMAN, M.; KOKU, A. B.; ILHAN, E. (2015). Localization and control of an autonomous orchard vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 118-128.

BERGERMAN, M.; MAETA, S.M.; ZHANG, J.; FREITAS, G.M.; HAMNER, B.; SINGH, S.; KANTOR, G. Robot Farmers Autonomous Orchard Vehicles Help Tree Fruit Production. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, v. 22, n. 1, p. 54-63, Março 2015.

BILLINGSLEY, J.; SCHOENFISCH, M. The successful development of a vision guidance system for agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 16, Issue 2, January 1997.

BORRERO G, H.; VELÁSQUEZ, V. A. E.; BARRERO, J. F.; ZANDONADI, D. C.; RISARDI, J. C.; VARELA, D. M.; BECKER, M. Orientation (yaw) fuzzy controller applied to a car-like mobile robot prototype.

BOSGRA, O, H.; KWAKERNAAK, H.; MEINSMA, G. Design methods for control systems. Notes for a Course of the Dutch Institute of Systems and Control, Winter term, 2007.

CAZAROTTO, M, J, C., Qualidade de Plantio na Safrinha. Blog Agronegocio em Foco, Dez 2104. URL: <http://www.pioneersementes.com.br/blog/12/qualidade-de-plantio-na-safrinha>. Acesso em: Jan 2016

CHEEIN, F.A.A.; CARELLI, R. Agricultural Robotics: Unmanned Robotic Service Units in Agricultural Tasks. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 7, n. 3, p.48-58, Setembro. 2013.

CRUZ, J. C.; PEREIRA, F. I. A.; ALVARENGA, R. C.; GONTIJO, N. M. M.; VIANA, M. J. H.; DE OLIVEIRA, F. M.; RODRIGUES, M. W. J.; DE ALBUQUERQUE, F. M. R. Cultivo do milho. Embrapa Milho e Sorgo, Sistema de Produção, 1, Versão Eletrônica - 8^a edição. Out./2012.

DAMEN, A.; WEILAND, S. ROBUST CONTROL. MEASUREMENT AND CONTROL. Group Department of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, 2002.

DOERR, Zacharie JL; LAGUË, Claude. Evaluating the ability to detect foreign objects in crops using laser range scanners mounted on agricultural vehicles. In: 2009 Reno, Nevada, June 21-June 24, 2009. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

DOYLE, J.C.; GLOVER, K.; KHARGONEKAR, P. P.; FRANCIS, B. A. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems. Automatic Control, IEEE Transactions on , v. 34, n. 8, p. 831-847, Aug 1989.

EPOS-2 50/5. Epos-2 50/5 Positioning controller, getting started. 2013. URL: http://www.maxonmotor.es/medias/sys_master/8811457151006/347717-Getting-Started-En.pdf

FRANKLIN, G.; POWELL, J.; EMANI-NAEINI, A. A. Feedback control of dynamic systems. Addison-Wesley Publ. Co., Reading, MA, Second Edition. 1991.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; WORKMAN, Michael L. digital control of dynamic systems. Menlo Park: Addison-wesley, 1998.

GALDINO, L. Cálculo da rotação, do torque e da potência de motores elétricos para transmissão por parafusos de potência. Augusto Guzzo Revista Acadêmica, v. 1, n. 14, p. 215-227, 2014.

GARCÍA, J.; VÁSQUEZ V.: Los robots en el sector agrícola. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial, 2011.

GIMENEZ, J., HERRERA, D., TOSETTI, S., & CARELLI, R. (2015). Optimization methodology to fruit grove mapping in precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 116, 88-100.

GLOVER, K; DOYLE, J. state-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H_∞ norm bound and relations to relations to risk sensitivity. *Systems & Control Letters*, v. 11, n. 3, p. 167-172, 1988.

GORLISKI, G. Food and society. New York: Britanica Educational Publishing, 2003

GROVES, P. D. Principles of gnss, inertial, and multisensor integrated navigation systems. London: Artech House, 2008.

GUO, L. S.; FENG, L. A low-cost integrated positioning system of GPS and inertial sensors for autonomous agricultural vehicles. In: 2003 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2003.

HAGUE, T.; TILLET, N. D. (1996). Navigation and control of an autonomous horticultural robot. *Mechatronics*, 6, 2, March, 1996.

HAN, S.; ZHANG, Q. Map-based control functions for autonomous tractors. In: 2001 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1998.

HARRELL, R. C.; ADSIT, P. D.; POOL, T. A.; Hoffman, R. THE FLORIDA ROBOTIC GROVE-LAB. *Transactions of the ASAE*, v. 33, n. 2, p. 391-399, 1990.

HARRIES, G.O.; AMBLER, B. AUTOMATIC PLOUGHING. A tractor guidance system using opto-electronic remote sensing techniques and a microprocessor based controller, *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 26, Issue 1, January 1981.

HERAUD, J, A.; LANGE, A, F. Agricultural automatic vehicle guidance from horses to GPS: How we got here, and where we are going. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

HIEMATH, S. A.; VAN DER HEIJDEN, G. W.; VAN EVERT, F. K., STEIN, A.; TERBRAAK, C. J. Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter. *Computers and Electronics in Agriculture*, v;100, p. 41-50, January 2014

HOKUYO AUTOMATICO. Scanning Laser Range Finder UTM-30LX/LN Specification. 2012. URL: http://www.hokuyoaut.jp/02sensor/07scanner/download/pdf/UTM-30LX_spec_en.pdf.

JAZAR, R. N. Vehicle dynamics: theory and application. Springer Science & Business Media, 2013.

JORGENSEN, R.N.; SORENSEN, C.G.; MAAGAARD, J.; HAVN, I.; JENSEN, K.; SOGAARD, H.T.; SORENSEN, L.B. HORTIBOT: A system design of a robotic tool carrier for high-tech plant nursing. The CIGR e-journal Agricultural Engineering International. V. 9, Jul 2007.

KHRISTAMTO, M.; PRAPTIJANTO, A.; KALEG, S. Measuring geometric and kinematic properties to design steering axis to angle turn of the electric golf car. Energy Procedia, v. 68, p. 463-470, April 2015.

KISE, M.; NOGUCHI, N.; ISHII, K.; TERAOKA, H. Enhancement of turning accuracy by path planning for robot tractor. In: Automation Technology for Off-Road Equipment Proceedings of the 2002 Conference. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2002.

LEE, K. H.; EHSANI, R.; SCHUELLER, J. K. Forward movement synchronization of two vehicles in parallel using a laser scanner. Applied Engineering in Agriculture, v. 23, n. 6, p. 827-834, 2007.

LUO, X; ZHANG, Z. DGPS navigation control system for rice transplanter. In: 2007 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. p. 1.

MALHOTRA, S. Simulation of steering system in robotics vehicles. Thesis (Master of science) – The Florida State University, College of Engineering. 2006.

MARCHANT, J.A.; HAGUE, T.; TILLET, N.D. Row-following accuracy of an autonomous vision-guided agricultural vehicle. Computers and Electronics in Agriculture, v.16, Issue 2, January 1997.

MAZOYER, M; ROUDART, L. A history of world agriculture: from the neolithic age to the current crisis. NYU Press, 2006.

MING, L.; KENJI, I.; KATSUHIRO, W.; SHINYA, Y. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance. International Journal on Agricultural & Biological Engineering, v. 2, n. 3, 2009.

MIZUSHIMA, A.; NOGUCHI, N.; ISHII, K. Monitoring system of peat areas using agricultural robot. In: Automation Technology for Off-Road Equipment Proceedings of the 2004 Conference. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2004. p. 467.

MOUSAZADEH, H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles, Journal of Terramechanics, v. 50, n. 3, p. 211-232. Junho 2013.

OGATA, Katsuhiko. MODERN CONTROL SYSTEMS. Prentice Hall, 1997.

PALLEJÀ, T.; MERCÈ, T.; MARCEL T.; JORDI P. Measuring gait using a ground laser range sensor. Sensors, v. 9, n. 11, p. 9133-9146, 2009.

PORTAL ADVANTECH. URL: http://www.advantech.com/products/1-2jkbyz/ark-1120f/mod_4be6fe03-9aa1-4097-a9b1-8977a7a49289

PORTAL AGRICULTURE FOR ENGINEERS 4, 2013. URL: <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=1578>.

PORTAL EMBRAPA MULTIMÍDIA: BANCO DE IMAGENS, 2015. URL: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/2110002/abacaxi-brs-imperial>.

PORTAL H2ECOMARATHON. URL: <https://h2ecomarathon.wordpress.com/steering-braking/>.

PORTAL HOBBYKING. URL: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__11936__Turnigy_nano_tech_5000mah_4S_25_50C_Lipo_Pack.html

PORTAL HOKUYO. URL: https://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/utm_30lx.html.

PORTAL KALATEC. Acoplamento DKN-15/26. URL: <http://www.ecommercekalatec.com.br/dkn-15-26-acoplamento-de-fole-metalico.html>.

PORTAL MAXON MOTORS PART NUMBER 275512. URL: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/control/Positionierung/275512>.

PORTAL MAXON MOTORS Part number 309756. URL: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/motor/ecmotor/ec4pole/309756>.

PORTAL MAXON PART NUMBER 225778. URL:
<http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/sensor/encoder/Encoder-MR-TypML-128-1000imp-3Kanal/225778>.

PORTAL MAXON PART NUMBER 326661. URL:
<http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/gear/planetary/gp32/326661>.

PORTAL MAXON PART NUMBER 347717. URL:
<http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/control/Positionierung/347717>.

PORTAL PORTALDOAGRONEGOCIO, 2015. URL:
<http://www.portaldoagronegocio.com.br/noticia/pes-aponta-plantio-de-935-mil-hectares-de-laranja-em-2014-128801>.

PORTAL TECA URL: <http://teca.fao.org/read/7301>.

PORTAL UF. URL:
<http://www2.mae.ufl.edu/designlab/Class%20Projects/Background%20Information/Steering.htm>

PORTAL YOUTUBE_2. URL:
<https://www.youtube.com/watch?v=rIXOZ9x4mdc&feature=youtu.be>

PORTAL YOUTUBE_3. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=tlREyPm2RpY>.

PORTAL YOUTUBE_4. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=KIdtxMnEy08>.

RAJAMANI, R. Vehicle dynamics and control. New York: Springer, 2006.

REID, J. F.; ZHANG, Q.; NOGUCHI, N.; DICKSON, M. Agricultural automatic guidance research in north america, Computers and Electronics in Agriculture, v. 25, Issues 1–2, p. 155-167, January 2000.

REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. The automotive chassis: engineering principles. Butterworth-Heinemann, 2001.

ROVIRA-MÁS, F.. Recent innovations in off-road intelligent vehicles: Field automatic navigation. Recent Patents on Mechanical Engineering, v. 2, n. 3, p. 169-178, 2009.

SAMPAIO, R. C.B.; FERNADES, V. V. M.; BECKER, M. HELVIS: A mini platform in the research of hevs. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE. IEEE, 2011. p. 1-5.

SHALAL, N.; LOW, T.; MCCARTHY, C.; HANCOCK, N. Orchard mapping and mobile robot localization using on-board camera and laser scanner data fusion – Part B: Mapping and localization. Computers and Electronics in Agriculture, 2015.

SILVEIRA, H, T., Qualidade de Plantio do Milho Safrinha: Incremento de Produtividade com Tecnologias de Custo ZERO. URL: <http://www.pioneersementes.com.br/blog/79/qualidade-de-plantio-do-milho-safrinha-incremento-de-produtividade-com-tecnologias-de-custo-zero>.

SISTLER, F. ROBOTICS AND INTELLIGENT MACHINES IN AGRICULTURE. IEEE Journal of Robotics and Automation, v.3, n. 1, p. 3-6, February 1987.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. Multivariable feedback control: analysis and design. New York: Wiley, 2007

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I.; SCARAMUZZA, D. Introduction to autonomous mobile robots. MIT press, 2011.

STENTZ, A.; DIMA, C.; WELLINGTON, C.; HERMAN, H.; STAGER, D. A system for semi-autonomous tractor operations. Autonomous Robots, v. 13, n. 1, p. 87-104, 2002.

TABILE, R. A. desenvolvimento de uma plataforma robótica modular multifuncional para aquisição de dados em agricultura de precisão tese (doutorado EM Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2012.

TABILE, R. A.; GODOY, E. P.; PEREIRA, R. R.; TANGERINO, G. T.; PORTO, A. J.; INAMASU, R. Y. Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot. Engenharia Agrícola, v. 31, n. 1, p. 130-142, 2011.

THRUN, S.; BURGARD, W.; FOX, D. Probabilistic robotics. MIT press, 2005.

TILLET, N. D. Automatic guidance sensors for agricultural field machines: a review, Journal of Agricultural Engineering Research, v. 50, p. 167-187, 1991.

TOBE, F. The ultimate guide to agricultural robotics. Robotics Business Review, URL: http://www.roboticsbusinessreview.com/article/the_ultimate_guide_to_agricultural_robotics/#Clearnpath

TORII, T. Research in autonomous agriculture vehicles in japan, Computers and Electronics in Agriculture, v. 25, Issues 1–2, January 2000.

WEISS, U.; BIBER, P. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor. Robotics and Autonomous Systems, v.59, n.5, p.265–273, Março 2011.

WEISE, G.; NAGASAKA, Y.; TANIWAKI, K. An Investigation of the Turning Behaviour of an Autonomous Rice Transplanter. Journal of agricultural engineering research, v. 77, n. 2, p. 233-237, 2000.

WILLRODT FL. Steering attachment for tractors. U.S. Patent No. 1506706, 1924.

WILSON, J. N. Guidance of agricultural vehicles — a historical perspective, Computers and Electronics in Agriculture, v. 25, Issues 1–2, p. 3-9, January 2000.

XUE, D.; CHEN, Y.; ATHERTON, D, P. Linear feedback control: analysis and design with matlab. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2007.

XUE, J.; ZHANG, L.; GRIFT, T. E. Variable field-of-view machine vision based row guidance of an agricultural robot. Computers and Electronics in Agriculture, v.84, p.85–91, Fev. 2012.

YOKOTA, Masahiko et al. 3-D GIS map generation using a robot tractor with a laser scanner. In: 2005 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2005.

ZHANG, J.; CHAMBERS, A.; MAETA, S.; BERGERMAN, M.; SINGH, S. 3D perception for accurate row following: Methodology and results. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013

ZHOU, K. (1998). Essentials of Robust Control. Prentice Hall.

Apêndice A

Elementos de Controle

Este apêndice tem o objetivo de revisar e discutir conceitos gerais relacionados à área de controle autônomo, os quais são utilizados no desenvolvimento das aplicações implementadas no protótipo #Elvis-3.1, que foi descrito no capítulo 3.

Os requisitos do projeto #Elvis-3.1, que foram estabelecidos a partir da definição das tarefas que devem ser realizadas pelo robô móvel, exigem a abordagem de projeto de sistema de controle de navegação aplicado no veículo. Nesse sentido, decidiu-se projetar um sistema de controle em malha fechada, cujo controlador se responsabilize pelo esterçamento das rodas frontais do #Elvis-3.1.

O sistema de controle proposto requer um modelo matemático que represente a planta que precisa ser controlada. Este modelo pode ser extraído a partir do conhecimento das propriedades físicas do sistema (FRANKLIN *et al.*, 1991 e BOSGRA *et al.*, 2006). Uma vantagem de contar com um modelo matemático da planta consiste em que isto torna possível avaliar os resultados a partir de simulações computacionais usando ferramentas como *MatlabTM*, entre outras (BOSGRA *et al.*, 2006 e XUE *et al.*, 2007). A avaliação do desempenho do sistema de controle a partir da simulação facilita a implementação de melhoras, as quais conduzirão à obtenção de um controlador que será subsequentemente avaliado no ambiente real que exige a aplicação.

A.1 Aspectos Gerais de Controle Robusto

Figura A.1 Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada incluindo entradas exógenas além da referência

Fonte: **Damen e Weiland (2002)**.

Um sistema de controle em malha fechada com realimentação unitária, como o representado no diagrama de blocos da Figura A.1, leva em conta as entradas exógenas além da referência (r), que para o caso de análise, correspondem com o distúrbio (d) na saída e o ruído medido (n) (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006; SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007). Pode-se observar que o sistema de controle conta com o sinal de saída (y), o qual é realimentado para assim gerar o sinal de erro ($e = r - y_m$). O bloco K representa o controlador implementado, o qual é responsável por calcular e aplicar o sinal de controle (u) no atuador da planta representada pelo bloco G . A planta (G) representa o sistema cuja saída precisa ser controlada e que esta definida pela sua função de transferência (BOSGRA *et al.*, 2006).

Para o sistema de controle em malha fechada representado na Figura A.1 é possível projetar um controlador de forma que se cumpram uma série de requisitos associados com o seu desempenho, como listado a seguir:

- O sistema de malha fechada deve ser estável;
- A saída real do sistema de malha fechada deve seguir o sinal de referência;
- A saída (y) do sistema de malha fechada deve ser insensível a distúrbios;
- O ruído (n) introduzido pelos sensores do sistema não deve afetar a saída do sistema;
- O controlador K não deve aplicar um sinal de controle que sature o atuador;
- As incertezas da planta não devem deteriorar o desempenho do sistema.

Figura A.2 Diagrama de blocos generalizado de um sistema de controle em malha considerando entradas exógenas

Fonte: **Damen e Weiland (2002)**.

O sistema de controle representado na Figura A.1 pode ser reorganizado tal como é apresentado na Figura A.2, na qual todas as entradas exógenas do sistema (sinal de referência (r), o distúrbio (d) e o ruído medido (n)) são reposicionadas à direita do diagrama de blocos. Da mesma forma, foram reposicionadas à esquerda do diagrama todas as saídas do sistema (sinal de controle (u) e o sinal de erro (z)). O erro, agora identificado com a variável (z) está definido na Equação A.1.

$$z = r - y \quad \text{Eq. (A.1)}$$

A.1.1 Objetivos de Controle

O desenvolvimento de um sistema de controle é baseado nos seguintes objetivos: estabilidade de malha fechada, atenuação de distúrbio, resposta satisfatória à aplicação de comando de entrada, estabilidade robusta e robustez da resposta de malha fechada. Tudo dentro das limitações impostas pela capacidade da planta e pela deterioração da informação medida devido à presença de ruído. Esses objetivos podem ser atingidos através da implementação de um controlador adequado que deve ser projetado, de tal maneira que o sistema de malha fechada minimize o sinal do erro (e) no diagrama de blocos da Figura A.2, apesar do efeito do ruído na saída (y_m). Dessa forma, o sinal de controle (u) será dado pela equação A.2.

$$u = K(s)(r - y - n) \quad \text{Eq. (A.2)}$$

A saída do sistema corresponde ao definido na Equação A.3.

$$y = G(s)u + d \quad \text{Eq. (A.3)}$$

Para o caso de sistemas como o analisado, a substituição do sinal de controle da Equação A.2 na Equação A.3 resulta na Equação A.4 que pode ser reorganizada para obter a Equação A.5 que define a resposta do sistema de malha fechada (Equação A.6). Pode-se observar que foi incluída a matriz identidade I , dado que se estar-se realizando a análise de um sistema de múltiplas entradas e saídas. Deve-se então considerar operações com matrizes, dessa forma, para o caso de sistemas SISO, esta matriz identidades pode ser substituída pelo escalar de magnitude unitária.

$$y = GK(r - y - n) + d \quad \text{Eq. (A.4)}$$

$$(I + GK)y = GKr + d - GK n \quad \text{Eq. (A.5)}$$

$$y = (I + GK)^{-1}GKr + (I + GK)^{-1}d - (I + GK)^{-1}GKn \quad \text{Eq. (A.6)}$$

Tabela A.1. Funções de desempenho no domínio da frequência usadas na análise de estabilidade robusta de um sistema de controle em malha fechada como o representado na Figura A.2

Função de transferência de malha aberta	L	GK
Função de sensibilidade complementar	T	$(I + L)^{-1}L$
Função de sensibilidade	S	$(I + L)^{-1}$

A partir da Equação A.6, é possível definir algumas características de desempenho no domínio da frequência, as quais são amplamente utilizadas no projeto de um sistema controle robusto. Estas características de desempenho são apresentadas na Tabela A.1 (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006; SKOGESTAD e POSTLETHWAITE., 2007).

$$y = (I + GK)^{-1}GKr + (I + GK)^{-1}d - (I + GK)^{-1}GKn \quad \text{Eq. (A.7a)}$$

$$y = (I + L)^{-1}Lr + (I + L)^{-1}d - (I + L)^{-1}Ln \quad \text{Eq. (A.7b)}$$

$$y = Tr + Sd - Tn \quad \text{Eq. (A.8)}$$

A substituição das expressões da Tabela A.1 na Equação A.6 gera a Equação A.7(a), na qual a função de transferência de malha aberta L (definida como $L = GK$) permite gerar a Equação A.7(b) e subsequentemente a Equação A.8. Na Equação A.8, é possível observar que a saída (y) pode ser influenciada pela função de sensibilidade complementar (T) que poderia amplificar o sinal de referência, assim como o sinal de ruído. Assim mesmo, pode-se observar que a saída (y) pode resultar influenciada, dado que a função de sensibilidade (S) poderia amplificar o distúrbio.

Estabilidade em Malha Fechada

Figura A.3 Sistema regulador

Fonte: **Damen e Weiland (2002)**.

Excetuando-se o caso em que é feito o projeto de um oscilador, o sistema de controle em malha fechada deve ser estável (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006 e SKOGESTAD e POSTLETHWAITE., 2007). Dessa forma, o ideal é que o sistema de controle em malha fechada apresente um comportamento estável mesmo mediante a ocorrência de distúrbios.

Considerando o sistema regulador apresentado na Figura A.3 Ogata (1997), de acordo com o estabelecido pelo critério de estabilidade de Nyquist, para o caso do sistema de malha fechada, o ganho desse sistema pode ser conformado de maneira tal que o respectivo diagrama de Nyquist que corresponde com a sua função de transferência de malha aberta L não deve circundar o ponto em -1 (DAMEN e WEILAND., 2002; BOSGRA *et al.*, 2006 e SKOGESTAD e POSTLETHWAITE., 2007).

Atenuação de Distúrbio

A Equação A.8 previamente apresentada permite observar que a função de sensibilidade determina o efeito do distúrbio na saída do sistema de controle em malha fechada.

Para o caso do regulador apresentado na Figura A.3 onde d representa o distúrbio na saída da planta, pode-se encontrar a expressão definida na Equação A.9, que determina o sinal de erro e .

$$e = -y \quad \text{Eq. (A.9)}$$

A definição do sinal de erro facilita o desenvolvimento de expressões que são apresentadas subsequentemente até se encontrar a expressão correspondente à saída (y) definida na Equação A.10.

$$y = d + Gu$$

$$y = d + GKe$$

$$y = d + GK(-y)$$

$$y(1 + GK) = d$$

$$y(1 + L) = d$$

$$y = \frac{1}{1+L} d \quad \text{Eq. (A.10)}$$

$$y = Sd \quad \text{Eq. (A.11)}$$

De acordo com o definido na Tabela A.1, é possível reescrever a Equação A.10 no formato apresentado na Equação A.11, em que se observa que a saída do sistema regulador é influenciada pelo distúrbio de forma tal que este deve ser atenuado pela função de sensibilidade (S). A função de sensibilidade está definida no domínio da frequência ($S(j\omega)$). Se for preciso obter um valor pequeno de $|S(j\omega)|$ (lembrando que $\omega \in \mathbb{R}$), é preciso que $L(j\omega)$ assuma um valor alto. Caso contrário, requerendo um alto valor para $|S(j\omega)|$ é preciso que $L(j\omega)$ assuma um valor pequeno.

De acordo com o definido na Equação A.11, a atenuação do distúrbio na saída do sistema, é possível consegui-la com uma magnitude consideravelmente baixa para a função L . Dessa forma, para conseguir atenuação de distúrbio, é necessário projetar um controlador (K) de tal forma que o ganho de malha aberta ($L = KG$) assuma um alto valor para assim obter um baixo valor da função de sensibilidade (S) na faixa de frequência em que se necessita a atenuação de distúrbios.

Figura A.4 Função de sensibilidade ideal e ganho de malha aberta no domínio da frequência

Fonte: **Bosgra et al. (2006)**

Por causa das características dinâmicas próprias dos sistemas de controle no domínio da frequência, somente é possível fazer com que (L) apresente uma alta magnitude em um intervalo no domínio da frequência, de forma que, tem-se que a atenuação do distúrbio é somente possível para esta faixa. Usualmente, tem-se que L se comporta como um filtro passa baixa, o que traz consequentemente que a função S se comporte como um filtro passa alto. Na Figura A.4, representa-se o que foi mencionado anteriormente com um gráfico com as magnitudes ideais de S e L . Pode-se observar que existe um valor de frequência (B) que determina a frequência a partir da qual a sensibilidade deixa de atenuar distúrbios. O valor de frequência (B) é conhecido como a largura de banda do sistema de malha fechada (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006 e SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007).

A Figura A.5(a) apresenta a forma ideal da magnitude da função de sensibilidade. Ela é de baixa magnitude nas baixas frequências e se aproxima ao valor **1** nas altas frequências. A forma que apresenta a função T corresponde a uma função complementar conhecida como *Função de sensibilidade complementar* ($T = 1 - S$). Na Figura A.5(b) é representada uma possível forma para a função T correspondente com a função S na Figura A.5(a). Pode-se notar que T se comporta como um filtro passa alto. Também se pode notar que: $S + T = 1$. Valores maiores do que **1** devem ser evitados. Valores de pico apresentam-se perto do ponto onde a curva cruza o valor de ganho igual a **1** (0dB).

Figura A.5 (a) Função S ideal. (b) Função T correspondente à função S

Fonte: Bosgra *et al.* (2006)

Resposta ao comando de entrada

A Equação A.8, previamente apresentada, permite observar que a função de sensibilidade complementar (T) determina o seguimento fiel da saída (y) à entrada de referência (r) no sistema de controle em malha fechada.

A adequada projeção da função T , implica que a sua forma ideal demonstre uma magnitude perto de 1 para baixas frequências e para a frequência que define a largura de banda. A função magnitude da T deve diminuir suavemente até zero. Se a forma e largura de banda da função T são adequadas, então não é necessário o uso de um bloco adicional de pré-filtro ($\bar{N}$) constituindo um sistema de dois graus de liberdade como apresentado na Figura A.6 (DAMEN e WEILAND., 2002; BOSGRA *et al.*, 2006; SKOGESTAD e POSTLETHWAITE., 2007, FRANKLIN *et al.*, 1991).

Figura A.6 Diagrama de blocos de um sistema de controle de dois graus de liberdade que considera distúrbio na saída

Atenuação do ruído medido

A realimentação, que se configura em um sistema de controle em malha fechada, implica em considerar o efeito do ruído medido no sistema. A Equação A.8, que foi previamente definida, permite observar que a função de sensibilidade complementar (T) determina a influência do ruído na saída (y). Geralmente, a função T é projetada para ter um ganho unitário nas baixas frequências, de forma que nestas frequências, o sistema será altamente afetado pelo ruído, gerando-se a necessidade de contar com sensores de baixo ruído (DAMEN e WEILAND., 2002; BOSGRA *et al.*, 2006 e SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007).

Evasão à saturação do Atuador

Em um sistema de controle em malha fechada, observa-se que a ação de controle (u) é aplicada diretamente à planta. Considerando que qualquer planta real pode absorver somente

entradas de comando de magnitude limitada, deve-se evitar a saturação do controlador através da aplicação delimitada da ação de controle.

Para um sistema de controle em malha fechada que considera a entrada de distúrbio (d) e o ruído medido (n), em termos da transformada de Laplace, pode-se obter a expressão da Equação A.11, que define o sinal de controle. O processo de substituição sobre esta equação leva à obtenção da Equação A.12 ou da expressão definida na Equação A.13, que substitui o ganho de malha aberta (GK por L) (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006; SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007).

$$u = Ke \quad \text{Eq. (A.11)}$$

$$= K(r - y_m)$$

$$= K(r - (y + n))$$

$$= K(r - y - n)$$

$$= K(r - (Gu + d) - n)$$

$$= Kr - KGu - Kd - Kn$$

$$u + KGu = Kr - Kd - Kn$$

$$u(1 + KG) = K(r - d - n)$$

$$u(1 + KG) = K(r - d - n)$$

$$u = \frac{K}{(1+KG)}(r - d - n) \quad \text{Eq. (A.12)}$$

As expressões apresentadas nas Equações A.13 ou A.14 permitem sugerir a presença de uma propriedade relacionada à capacidade da planta da (M), que se representa na Equação A.14, e por sua vez permite definir a Equação A.15.

$$u = \frac{K}{(1+L)}(r - d - n) \quad \text{Eq. (A.13)}$$

$$M = \frac{K}{(1+L)} \quad \text{Eq. (A.14)}$$

$$u = M(r - d - n) \quad \text{Eq. (A.15)}$$

O sinal de controle deve estar restrito à faixa de sinal que o atuador suporta com o intuito de evitar a sua saturação. Em concordância com o representado pela Equação (A.15), a ação de controle está diretamente relacionada à função M e aos sinais de entrada no sistema. A função M determina a sensibilidade do sistema a distúrbios e ao sinal de referência. M é conhecida como a função de sensibilidade à entrada (BOSGRA *et al.*, 2006).

Estabilidade Robusta

Dado que é bastante possível cair na geração de um modelo impreciso da planta, existe a necessidade de considerar a robustez da estabilidade. Este conceito está baseado no *Teorema de Ganho Pequeno* que se aplica ao esboço representado na Figura A.7 (DAMEN e WEILAND, 2002), na qual (H) representa a função de transferência total do sistema de controle em malha fechada. Levando em conta que se necessita que a magnitude da amplitude do ganho no bloco H seja menor do que um (1) para todas as frequências, o seu correspondente diagrama polar que se representa na Figura A.8 não deve circundar o ponto -1 . Cumprindo-se tal condição, satisfaz-se o critério de estabilidade de Nyquist de maneira que um sistema como o mostrado na Figura A.7 é um sistema estável (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006; SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007).

Figura A.7 Sistema de malha fechada com função de transferência H .

Fonte: **Damen e Weiland (2002)**.

Figura A.8 Estabilidade de ganho pequeno no espaço de Nyquist

Fonte: **Damen e Weiland (2002)**.

A estabilidade está garantida cumprindo-se a condição apresentada na Equação A.16, que expressa que a norma infinito da função de transferência H deve ser menor do que 1. Pode-se ver que a norma infinito corresponde ao máximo valor singular, o que é válido para sistemas MIMO (do inglês, Múltiplas entradas e múltiplas saídas). No caso dos sistemas SISO (do inglês, *Single Input – Single Output*), a norma infinito está determinada pelo máximo valor de ganho como mostrado pela Equação A.17.

$$\|H\|_{\infty} \stackrel{\text{def}}{=} \max_{\omega} \bar{\sigma}H(j\omega) < 1 \quad \text{Eq. A.16}$$

$$\|H\|_{\infty} \stackrel{\text{def}}{=} \max_{\omega} |H(j\omega)| < 1 \quad \text{Eq. A.17}$$

A.2 Projeto de Controle Robusto através da conformação de funções de transferência de malha fechada

O projeto de um controlador, através da conformação de funções de transferência, implica que o projetista especifique a magnitude de algumas funções de transferência de malha fechada no domínio da frequência, e assim, encontrar um controlador que gere as respectivas formas desejadas. No projeto de controladores através da conformação de funções de transferência se destacam as técnicas de: a) *Conformação da função de transferência de malha aberta* (“*Loop-shaping*”) e b) *Conformação das funções de transferência de malha fechada tais como S , T e KS* (SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007).

A.2.1 Conformação de funções de transferência de malha fechada

A metodologia de projeto de controladores através da conformação de funções de transferência de malha fechada considera a função de sensibilidade (S) e a função de sensibilidade complementar (T), as quais estão diretamente relacionadas com a função de transferência de malha aberta (L) (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006 e SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007).

Conformação de funções de transferência de malha fechada Usando H_∞

Na metodologia de conformação de funções de transferência de malha fechada, é possível decidir diretamente sobre as formas desejadas para as funções de sensibilidade e sensibilidade complementar, e assim, projetar um controlador utilizando o método de otimização H_∞ , no qual um procedimento iterativo procura minimizar a norma infinito da função transferência total do sistema de controle em malha fechada (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006; SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007).

Sensibilidade ponderada

De acordo com Damen e Weiland (2002); Bosgra *et al.* (2006) e Skogestad e Postlethwaite (2007) a função de sensibilidade S é um bom indicador de desempenho do sistema malha fechada para sistemas SISO e MIMO. As especificações típicas em termos da função S são:

- Mínima frequência de largura de banda ω_b^* definida como a frequência onde $|S(j\omega)|$ cruza 0,707;
- Máximo erro de *tracking* em frequências selecionadas;
- Tipo do sistema, ou alternativamente, o máximo erro de *tracking* em estado estável;

- A forma da função S em um intervalo de frequências selecionadas;
- Máxima magnitude do pico da função S , $\|S(j\omega)\|_\infty < M$

Figura A.9 Casos em que $|S|$ excede o limite imposto por $1/|w_P|$, resultando que $\|H_\infty\| > 1$. (a)

Função S e função W_p . (b) Função de sensibilidade ponderada ($W_p S$)

Fonte: Skogestad e Postlethwaite, (2007).

A especificação da máxima magnitude do pico da função S ajuda a prevenir a amplificação de ruído nas altas frequências e também introduz certa margem de robustez (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006; SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007). Tipicamente, seleciona-se $M = 2$. Matematicamente, as especificações mencionadas podem

ser ingressadas utilizando uma função de limite superior $\left(\frac{1}{|W_p(s)|}\right)$ para a magnitude da função S . O W_p corresponde a uma função de peso que é definida pelo projetista.

$$|S| < \frac{1}{|W_p(j\omega)|}, \forall \omega \quad \text{Eq. (A.18)}$$

$$\Leftrightarrow |W_p S| < 1, \forall \omega \Leftrightarrow \|W_p S\|_{\infty} < 1 \quad \text{Eq. (A.19)}$$

De acordo com o que se expressa nas Equações A.18 e A.19, a função W_p cumpre o papel de estabelecer um limite para o ganho da função de sensibilidade no domínio da frequência. A expressão definida na Equação A.21 permite observar que é possível então considerar a função de sensibilidade ponderada ($W_p S$), e de acordo com o processo de projeto relacionado à limitação superior já mencionada, a norma H_{∞} da função de sensibilidade ponderada deve ser menor que o valor um (1). A Figura A.9 apresenta um exemplo de uma situação em que para algumas frequências, $|S|$ excede a fronteira superior imposta por $1/|W_p|$, o que é representado na Figura A.9. Como resultado, tem-se que a função de sensibilidade ponderada $|W_p S|$ excede o ganho de valor 1 na mesma faixa de frequências em que $|S|$ excede $1/|W_p|$, como pode ser observado na Figura A.9.

Seleção de pesos

Na Figura A.10, utilizando uma linha tracejada, se apresenta uma aproximação assintótica para uma função típica de limite $1/|W_p|$, a qual é definida matematicamente pela Equação A.20. Fundamentalmente, esta aproximação assintótica estabelece o limite superior para a função de sensibilidade, que é igual a $A \leq 1$ nas baixas frequências, e é igual a $M \geq 1$ nas altas frequências. Também se pode observar que a mencionada aproximação assintótica cruza o valor de ganho 1 na altura da frequência ω_B^* a qual é aproximadamente a frequência da largura de banda requerida.

A expressão representada na Equação A.21 corresponde a uma aproximação assintótica, que fornece maior inclinação da reta entre os pontos A e M na Figura A.10, portanto, usando esta expressão se obtém uma função de maior ordem para ponderar a sensibilidade. Esta expressão usualmente é utilizada para fazer com que a resposta do sistema seja mais rápida (SKOGESTAG e POSTLETHWAITE, 2007).

Figura A.10 Gráfico exato de $1/|W_p(j\omega)|$ e a sua correspondente assintótica

Fonte: Skogestad e Postlethwaite (2007).

$$W_p(s) = \frac{\frac{s}{M} + \omega_B^*}{s + \omega_B^* A} \quad \text{Eq. (A.20)}$$

$$W_p(s) = \frac{(s/M^{1/2} + \omega_B^*)^2}{(s + \omega_B^* A^{1/2})^{1/2}} \quad \text{Eq. (A.21)}$$

Figura A.11 Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada introduzindo funções de peso às entradas e saídas do sistema generalizado.

Na Figura A.11, apresenta-se um diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada, similar ao apresentado previamente na Figura A.2, mas agora incluindo funções de peso para as entradas exógenas, assim como para as saídas do sistema. Segundo o apresentado, é possível definir uma função (V_d) para ponderar o distúrbio, uma função (V_r) para ponderar a entrada de referência, uma função (V_n) para ponderar o ruído, W_u e W_p são funções que ponderam a ação de controle e o sinal de erro na saída ($z = r - y$).

Um sistema de controle, como o apresentado na Figura A.11, pode ser representado segundo o diagrama de blocos apresentado na Figura A.12, que usualmente é denominado planta aumentada (SKOGESTAG e POSTLETHWAITE, 2007). Na planta aumentada, todas as entradas exógenas são consideradas na entrada (w), (z) representa as saídas controladas do sistema que devem ser minimizadas, (v) corresponde aos sinais medidos e está relacionada à ação de controle. O bloco (K) representa o controlador, enquanto que o bloco (P) representa a planta generalizada que precisa ser controlada. Observando o sistema da Figura A.12 pode-se observar que todas as funções de ponderação e a planta (G) da Figura A.11 fazem parte da planta generalizada (P) na Figura A.12. A Equação A.22 define as saídas da planta aumentada da Figura A.12 e pode ser redefinida como se apresenta na Equação A.23. A Equação A.24 define a ação de controle (u).

Figura A.12 Diagrama generalizado para um sistema de controle em malha fechada

$$\begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.22)}$$

$$\begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.23)}$$

$$u = Kv \quad \text{Eq. (A.24)}$$

A planta generalizada (P) pode ser apresentada de forma compacta no espaço de estados segundo se define na Equação (A.25) (SKOGESTAG e POSTLETHWAITE, 2007).

$$P \triangleq \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.25)}$$

De acordo com o definido na Equação A.25, obtém-se as expressões determinadas nas Equações A.26 e A.27.

Figura A.13 Bloco função de transferência entra as saídas controladas e as entradas exógenas.

$$z = P_{11}w + P_{12}u \quad \text{Eq. (A.26)}$$

$$v = P_{21}w + P_{22}u \quad \text{Eq. (A.27)}$$

No sistema de controle em malha fechada representado na planta aumentada na Figura A.12, a saída (z) deve ser minimizada para atingir os objetivos de controle definidos pelo projetista. Dessa forma, resulta necessário conhecer a função de transferência existente entre a saída (z) e as entradas exógenas (como representado na Figura A.13.). Consequentemente, definiu-se essa função de transferência (N_{zw})

De acordo com o apresentado na Figura A.13, a saída (z) pode ser definida pela Equação A.28.

$$z = Nw \quad \text{Eq. (A.28)}$$

Figura A.14 Diagrama de blocos generalizado para um sistema de controle em malha fechada que representa as funções de pesos que poderiam se considerar na etapa de projeto

Levando em conta a Equação A.28 e realizando o processo de substituições correspondente para eliminar (u) e (v) das Equações A.26 e A.27, a Equação A.29 é obtida, na qual se define a saída (z) , de maneira que a partir dela é possível extrair a expressão relacionada à função de transferência N que se apresenta na Equação (A.30), e que também está definida como $F_l(P, K)$ a transformação linear baixa para a planta aumentada, assumindo como parâmetros a planta generalizada P e o controlador K (SKOGESTAG e POSTLETHWAITE, 2011).

$$z = P_{11}w + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}w \quad \text{Eq. (A.29)}$$

$$N_{zw} = P_{11}w + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \triangleq F_l(P, K) \quad \text{Eq. (A.30)}$$

O projeto de um controlador para um sistema de malha fechada utilizando a técnica de otimização H_∞ envolve a minimização da norma H_∞ de $F_l(P, K)$. O anterior implica o uso de

algoritmos para resolver problemas de controle H_2 e H_∞ , os quais se baseiam no espaço de estados (GLOVER *et al.*, 1988 e DOYLE *et al.*, 1989). Na Figura A.14, apresenta-se um diagrama de blocos detalhado a partir do diagrama generalizado da Figura A.12. No detalhamento, pode-se observar os blocos que podem ser incluídos no subsistema (P).

Sensibilidade mista

A especificação $\|W_p S\|_\infty < 1$ fornece uma fronteira inferior na largura de banda mas não fornece uma fronteira superior e também não permite especificar o “roll-off” da função de transferência de malha aberta (L) para a região de frequências acima da largura de banda (altas frequências). Com o intuito de solucionar o anteriormente mencionado, faz-se uso da função de sensibilidade complementar (T). Uma alternativa, que permite estabelecer um “roll-off” suficientemente rápido nas altas frequências para a função L , consiste em especificar uma função de limite superior ($1/|W_T|$) para a magnitude da função T (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006 e SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007). O intuito de restringir a magnitude da ação de controle ($u = KS(r - Gd)$) é atingido ao estabelecer uma fronteira superior definida por $1/|W_u|$ para a magnitude de KS .

Para combinar as expressões limitantes para as funções S , T e KS como um parâmetro integrado no projeto do controlador, usualmente se utiliza uma aproximação como a definida na Equação A.31.

$$\|N\|_\infty = \max_\omega \bar{\sigma}(N(j\omega)) < 1; \quad N = \begin{bmatrix} W_p S \\ W_T T \\ W_u KS \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.31)}$$

Em que $\bar{\sigma}(N(j\omega))$ representa o máximo valor singular da matriz N , que está conformada pelas funções ponderadas de malha fechada S , T e KS . Para o caso de sistemas tipo SISO, N é um vetor e o $\bar{\sigma}(N)$ corresponde à norma euclidiana deste vetor tal como se representa na Equação A.32.

$$\bar{\sigma}(N) = \sqrt{|W_p S|^2 + |W_T T|^2 + |W_u KS|^2} \quad \text{Eq. (A.32)}$$

Uma vez que se seleciona o formato da matriz N , o problema torna-se a procura de um controlador que faça o respectivo sistema de malha fechada internamente estável, e que

minimize a função de transferência apresentada na Equação A.33, na qual $\mathbf{K}$ representa a função de transferência de um controlador. Uma abordagem prática do problema da procura do controlador consiste em encontrar um controlador sub-ótimo de tal maneira que este controlador faça o correspondente sistema de malha fechada internamente estável, cumprindo com a condição definida na Equação A.34 (DAMEN e WEILAND, 2002; BOSGRA *et al.*, 2006 e SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007)

$$\min_K \|N(K)\|_\infty \quad \text{Eq. A.33}$$

$$\|N(K)\|_\infty < \gamma \quad \text{Eq. A.34}$$

A.3 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os conceitos fundamentais e introdutórios dos sistemas de controle robusto, focando no projeto de controladores através da conformação de funções de transferência de malha fechada.

A definição da forma das funções de transferência de malha fechada no domínio da frequência, assim como a configuração do respectivo sistema de controle, facilitam a determinação de um controlador que se aproxime ao comportamento predefinido para as baixas e altas frequências, através da execução do processo de otimização H_∞ .

A determinação de um controlador H_∞ usando a função de sensibilidade combinada corresponde ao método que possibilita a configuração de um sistema de controle de seguimento de fileiras de cultura, como se definiu na introdução desta tese.