Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Renan Moreira Pinto

**Geração e controle de trajetória ponto a ponto para veículos
agrícolas de grande porte**

São Carlos
2018

Renan Moreira Pinto

Geração e controle de trajetória ponto a ponto para veículos agrícolas de grande porte

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de Mestre em
Ciência - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Manufatura
Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto

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

São Carlos
2018

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

P659p Pinto, Renan Moreira
Planejamento e controle de trajetória ponto a ponto para veículos de grande porte agrícolas / Renan Moreira Pinto; orientador Arthur José Vieira Porto. São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Controle de trajetória. 2. Planejamento de trajetória. 3. Sistemas autônomos. 4. Automação de máquinas agrícolas. 5. Lógica difusa. 6. Robótica de máquinas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RENAN MOREIRA PINTO**.

Título da dissertação: "Geração e controle de trajetória ponto a ponto para veículos de grande porte agrícolas".

Data da defesa: 26/02/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Arthur José Vieira Porto**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Rafael Vieira de Sousa**
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/FEA-USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Eduardo Paciência Godoy**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Sorocaba)

APROVADO

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

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha mãe Renata, a minha avó Filomena, a Cibele e a minha família:
Porque foram, são e serão aqueles que sempre vão estar e me apoiar incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Arthur José Vieira Porto pela oportunidade oferecida para realização deste trabalho

Ao Técnico Dr. Tiberti pela coorientação, e apoio nas tarefas que envolveram essa pesquisa.

A todos os professores, funcionários e amigos do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, em especial aos do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Automação e Simulação, pela convivência e colaboração. Em especial ao Professor Marcelo Becker e companheiros de laboratório Andrés Baquero e Vitor Akihiro por permitir o uso da Plataforma Helvis III.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de estudo

A minha família pelo apoio incondicional em meus estudos.

Epigrafe

*“All you have to decide is what to do
with the time that is given to you.”*

Mithrandir

Resumo

MOREIRA, Renan Pinto **Geração e Controle de trajetória ponto a ponto para veículos de grande porte agrícolas**. 2018 ,105 p. Dissertação (Mestrado em Manufatura) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos,2018.

A Navegação é um dos maiores problemas na robótica móvel, sua função consiste em guiar o robô em um espaço de trabalho por um caminho plausível durante um determinado intervalo de tempo que o leve de um ponto inicial a um ponto final definido. É possível separar esse processo em vários níveis como, a localização do robô no espaço de trabalho, o planejamento de um caminho admissível, a geração de uma trajetória e por fim o controle desse trajeto. Este trabalho apresenta a proposta de desenvolvimento dos níveis de geração e controle de trajetória para um veículo terrestre de grande porte para uso em ambientes de trabalho semiestruturados, principalmente em ambientes agrícolas. Para tal propósito se utiliza o conceito de trajetórias baseadas em clotóides e predefinidas para um sistema bidimensional (X, Y). O gerador de trajetória proposto neste trabalho determina uma função contínua que considera as restrições cinemáticas e determina o tempo de trabalho, a posição e orientação do robô na posição final. As informações determinadas pela função são utilizadas por um controlador de lógica *fuzzy* para determinar as velocidades linear e angular do robô. Para validar trajetória planejada e o controlador, foram realizados testes nas plataformas robóticas Helvis-III, um protótipo simples com sistema de esterçamento nas rodas dianteiras estilo Ackermann e o RAM (Robô agrícola Móvel) – um veículo de grande porte com estrutura de esterçamento nas 2 rodas com estilo Ackermann de condução. O sistema demonstra bom desempenho, devido ao fato de que o desvio do caminho mantém uma media de 3 metros em base ao valor real e uma média de 0.5 metros em relação ao calculado, estando dentro dos padrões dos sensores GNSS usados para os testes experimentais.

Palavras-chave: Controle de trajetória, Geração de trajetória, Automação de máquinas agrícolas, Lógica difusa, clotóides.

Abstract

Navigation is one of the biggest problems in mobile robotics, its ban on guiding the robot in a workspace by a plausible path over a defined interval of time than the level of a starting point and a definite endpoint. It is possible to separate the process at some levels such as the location of the robot in the workspace, the planning of a permissible path, the generation of a path and a process of control of that path. This paper presents a proposal for the development of teaching levels and trajectory control for a large land vehicle for use in semi structured work environments, mainly in agricultural environments. To do this, use the concept of routines in clothoids and predefined for a two-dimensional system (X, Y). The generator of trajectory standard this risk is work in the risk control risk, and the risk and the status of work, the status of the risk and work of the position. As one of the reasons for the function are used by a fuzzy logic controller to determine the linear and angular velocities of the robot. To validate the planned trajectory and controller, they were actually tested on the Helvis-III robotic platforms, a simple prototype with the Ackermann advanced style wheel-arming system and the RAM (Mobile Shared Robot) - a large vehicle with structure of Ackermann style 2-wheel steering. The system should be good performance, by the same of the tracking of average pathways and of three meters in base to value and average of 0.5 meters in body the year, being based on the limits of GNSS used for test experimental tests.

Keywords: Trajectory control, Trajectory generate, Agricultural machine automation, Diffuse logic, Clotoids.

Lista de Figuras

Figura 1 - Ilustração do problema de um sistema de trajetória levando em consideração a precisão da trajetória e a suavidade de direcionamento.	4
Figura 2 - Plataforma robótica para controle de ervas daninhas.	7
Figura 3 - Veículo robótico todo-terreno.	8
Figura 4 - Veículo autônomo para o auxílio de colheita em pomares.	9
Figura 5 - Manobra final de cultivo.	9
Figura 6 - Robô para controle de ervas daninhas.	10
Figura 7 - Scania G480 modificado, utilizado como plataforma de testes.	11
Figura 8 - Métodos de geração de trajetória.	13
Figura 9 - Caminho contínuo de curvatura simples.	13
Figura 10 - Situações que curvas de transição são usadas.	14
Figura 11 - Trajetória preditiva com base nas clotoíde.	15
Figura 12 -Plataforma robótica Helvis III.	16
Figura 13- Robô Agrícola Móvel, RAM.	18
Figura 14- Esterçamento da roda virtual.	20
Figura 15- IMU LSM9DS1.	21
Figura 16- Receptor GNSS UBLOX NEO-M8n HMC5983	22
Figura 17 - Veículo esterçamento dianteiro com a condição Ackermann.	23
Figura 18 – Representação do modelo da bicicleta para um veículo de 4 rodas.	25
Figura 19 - Espaço requerido para esterçamento.	26
Figura 20 - Um veículo altamente manobrável.	27
Figura 21 - Curva Clotoíde.	29
Figura 22 - Trajetória simulada ao longo do tempo.	42
Figura 23 - Simulações de trajetória em S.	42
Figura 24 - Simulações de trajetória em S inversa.	43
Figura 25 - Simulações de trajetória em arco.	43
Figura 26 - Representação do sistema de correção de erros na trajetória.	45
Figura 27 - Esquema da análise preditiva do sistema	46
Figura 28 - Esquema das restrições preditivas.	46
Figura 29 - Sistema de controle.	47
Figura 30 - Conjuntos fuzzy de entrada	48
Figura 31 - Conjuntos fuzzy de saída.	49
Figura 32 - Análise de trajeto pelo GPS.	52
Figura 33 - Teste de trajetória GNSS.	57
Figura 34 - trajetória realizada segundo o GNSS	57
Figura 35 - Sistema <i>fuzzy</i> , teste linear.	59
Figura 36 - Helvis III – No campo de Futebol.	59
Figura 37 - Trajetória em linha reta definida pelo sistema.	61
Figura 38 - Trajetória curva definida pelo sistema em comparação a definida pelo leitor de GPS.	61
Figura 39 -Distância do objetivo em metros	62
Figura 40 -Demonstração dos testes primeiro quadrante.	62
Figura 41 - RAM em funcionamento.	65
Figura 42 - composição dos testes realizados	66
Figura 43 - Trajetória de teste – captação do GNSS.	66
Figura 44 - Trajetória de teste, sistema composto	67
Figura 45 - RAM realizando teste.	69

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Comparativo dos trabalhos de revisão.....	11
Tabela 3.1 - Controladores atuais Helvis III.....	16
Tabela 3.2 - Parâmetros Físicos Helvis III.....	16
Tabela 3.3 - Parâmetros Computacionais.	18
Tabela 3.4 - Controladores atuais.....	18
Tabela 3.5 - Erro Padrão de esterçamento.....	19
Tabela 3.6 - Limites definidos para controle	19
Tabela 3.7 - Velocidade esterçamento	19
Tabela 4.1 – Correção por quadrantes do sistema.....	33
Tabela 4.2 – Orientação do movimento circular em razão a trajetória	33
Tabela 4.3 – Perfil de curvatura padrão em base a orientação do veículo	34
Tabela 4.4 - Regras <i>Fuzzy</i>	46
Tabela 4.5 Limitações de controle IMU.....	49
Tabela 4.6 - Resumo de Alertas do Sistema de controle devido erros a nos sensores.....	52
Tabela 5.1 - Dados dos Testes com Helvis III- Campo de futebol 1 Quadrante.....	60
Tabela 5.2 - Dados dos Testes com Helvis III- Campo de futebol 2 Quadrante.....	60
Tabela 5.3 - Dados dos Testes com Helvis III- Campo de futebol 3 Quadrante	60
Tabela 5.4 - Dados dos Testes com Helvis III- Campo de futebol 4 Quadrante	60
Tabela 5.5 - Desvio da trajetória em comparação a simulação	61
Tabela 5.6 - Dados dos Testes com RAM - Campo de futebol.....	64
Tabela 5.7 - Desvio da trajetória em comparação a simulação.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Termo	Descrição
<i>4WD</i>	<i>Four Wheel Drive</i>
<i>4WSD</i>	<i>Four Wheel Steering and Drive</i>
<i>CAN</i>	<i>Control Area Network</i>
<i>DARPA</i>	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
<i>DRC</i>	<i>Darpa Robotics Challenge</i>
<i>DGPS</i>	<i>Differential Global Positioning System</i>
<i>FWS</i>	<i>Front Wheel Steering</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>IMU</i>	<i>Inertial Measurement Unit</i>
<i>LIDAR</i>	<i>Laser Imaging Detection and Ranging</i>
<i>PPC</i>	<i>Pure Pursuit Control</i>
<i>RAM</i>	<i>Robô Agrícola Móvel</i>
<i>RADAR</i>	<i>Radio Detection And Ranging</i>
<i>RTK</i>	<i>Real Time Kinematic</i>
<i>VANT</i>	<i>Veículo Autônomo Não Tripulado</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
X e Y	Coordenadas UTM ou coordenadas globais do veículo	m
Ψ	Ângulo de Guinada	°
$\emptyset$	Ângulo de Rolagem	°
Θ	Ângulo de Arfagem	°
V	Velocidade Longitudinal	m/s
δ	Esterçamento das rodas	°
δ_o	Esterçamento da roda externa a curva	°
δ_i	Esterçamento da roda interna a curva	°
W	Distância lateral entre rodas do veículo	m
L	Distância entre eixos do veículo	m
C	Centro de massa do veículo	
R	Raio de curvatura	m
R1	Distância do eixo fixo ao centro de curvatura	m
O	Centro de curvatura	-
$c_{(s)}$	Curvatura	-
k_s	Coefficiente de curvatura	-
P_i	Ponto de início	-
P_f	Ponto final	-
LAT	Latitude	°
LON	Longitude	°
d_x	Deslocamento na coordenada X	m
d_y	Deslocamento na coordenada Y	m
d_ψ	Variação da orientação de guinada	m

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Definição do problema.....	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Organização do trabalho	5
CAPÍTULO 2	6
2. Revisão Bibliográfica	6
2.1. Trabalhos Relacionados	6
2.2. Conceitos básicos	12
2.2.1. Geração de trajetória	12
CAPÍTULO 3	16
3. Materiais	16
3.1.1. Helvis.....	16
3.1.2. RAM - Robô Agrícola Móvel	18
3.2. Sensores	21
3.3. Estudo da cinemática do veículo.....	22
3.3.1. Modelo cinemático Ackermann	23
3.4. Modelo cinemático Ackermann esterçamento independente de cada roda	26
3.5. Localização	28
3.6. Planejamento de movimento.....	28
3.7. Curvas Clotóides	28
CAPÍTULO 4	31
4. Metodologia.....	31
4.1. Planejamento de Trajetórias Bidimensionais	31
4.2. Características principais da trajetória	32
4.3. Geração de caminhos	33
4.4. Sistemas Preditivo.....	43
4.5. Controlador <i>fuzzy</i>	47
4.6. Navegação usando a IMU.	50
4.7. Técnica de Navegação por GNSS	51
CAPÍTULO 5	56
5. Resultados.....	56
5.1. Estratégia de Controle	56
5.2. Navegação por GNSS	56
5.3. Tempo de Navegação.....	58
5.4. Testes experimentais do controlador difuso – linha reta.....	58
5.5. Aplicação da Estratégia de Navegação Proposta.	59
5.5.1. Aplicação da Estratégia de Navegação no Protótipo Helvis	59
CAPÍTULO 6	70
6. Conclusões.....	70
6.1. Trabalhos Futuros	71
Referências.....	72

CAPÍTULO 1

1. Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as motivações, as definições principais, as contribuições deste trabalho e um breve histórico sobre a área de Veículos Autônomos Não Tripulados (VANT) terrestres. O objetivo é evidenciar tanto a viabilidade quanto a necessidade de estudos futuros na área de robótica com enfoque no controle, planejamento de trajetórias e navegação. Segundo (Wolf, 2009, p1.) na sua obra “Robótica móvel inteligente: Da simulação às aplicações no mundo real”:

O estudo da robótica móvel é um tema bastante relevante e atual, onde esta área de estudos, pesquisas e desenvolvimento apresentou um grande salto em seu desenvolvimento nas últimas duas décadas. A aplicação prática de robôs móveis junto a diferentes atividades em nossa sociedade vem demonstrando o quão promissor é o futuro desta área. Por exemplo, seu uso em aplicações domésticas (aspiradores de pó e cortadores de grama robóticos), industriais (e transporte automatizado e veículos de carga autônomos), urbanas (transporte público, cadeiras de rodas robotizadas), militares (sistemas de monitoramento aéreo remoto – VANTs, transporte de suprimentos e de armamento em zonas de guerra, sistemas táticos e de combate) e de segurança e defesa civil e militar (controle e patrulhamento de ambientes, resgate e exploração em ambientes hostis), demonstra a grande gama de aplicações atuais dos robôs móveis e os interesses econômicos envolvidos em relação ao seu desenvolvimento e aplicação.

As primeiras abordagens na robótica para construção de carros autônomos foram na década de 60, através de pesquisas em robótica móvel, que tinham como objetivo desenvolver veículos para fins militares. Posteriormente as pesquisas foram ampliadas para atender diversos outros objetivos seja tarefas domésticas, desarmamento de explosivos, socorros emergenciais em ambientes de difícil acesso, agricultura entre outros (Choset, et al., 2005; Secchi, 2008).

A autonomia seria a capacidade de um robô em interagir com o ambiente e realizar ações utilizando de seus próprios recursos. Os robôs móveis podem ser utilizados para substituir o homem em tarefas que exigem o deslocamento físico em um espaço de trabalho. Estes tipos de robôs possuem variações como humanoides (antropomorfismo), robôs com pernas e com rodas. Os robôs moveis com rodas são os mais simples de serem construídos apesar de possuírem restrições de movimento eles são mais fáceis de controlar e dão maior suporte estático ao robô

. Essas restrições caracterizam-se por não permitir que os robôs se desloquem livremente no seu espaço de trabalho. Isso ocorre porque o controle de movimento possui três graus de liberdade que são a posição (x, y) e o ângulo de orientação (θ). Restrições dessa natureza são chamadas de não-holonômicas e um exemplo prático de um movimento que é influenciado por estas restrições é o estacionamento de um carro através do movimento de baliza (Wolf, 2009). Robôs autônomos reagem às mudanças no ambiente, integrando diferentes sensores para gerar um raciocínio lógico capaz de realizar múltiplas tarefas, se adaptar ao ambiente, operar sem falhas e ter robustez. O desenvolvimento de sensores é importante para que características como autonomia possam ser confiáveis, implicando na realização satisfatória das tarefas pelos robôs. Os sensores podem ser colocados no próprio robô (sensores embarcados) fazendo com que ele identifique objetos, ou marcos, para realizar uma localização relativa de sua própria posição, ou podem ser colocados de uma maneira que permitam uma varredura geral do ambiente habilitando uma localização global.

A navegação consiste nos passos de localização do robô no ambiente em que ele está, no planejamento de um caminho entre a sua configuração atual até uma configuração final e da execução do seu movimento pelo caminho encontrado.

A navegação pode ser dividida em quatro categorias: percepção do mundo, planejamento de trajetória, geração de caminho e controle de trajetória (Diogo, 2001).

A percepção analisa o ambiente e o transforma em parâmetros que podem ser utilizados pelo sistema de controle. Os sensores mais usados para a percepção de robôs agrícolas são Sistema de Perfilamento a Laser ou LiDAR (*Light detection and ranging*), sonares, câmeras e sensores infravermelhos. O uso de cada um deles vai depender das condições do ambiente no qual o robô terá que navegar.

O planejamento e geração da trajetória é uma das tarefas fundamentais na navegação do robô, no qual gera uma rede de pontos (definida no espaço de navegação) que serão atingidos pelo robô. Cada ponto é determinado considerando restrições mecânicas do robô, o tempo desejado de trajetória, a distância total e a quantidade total de tempo linear. Quando se considera o planejamento de movimento de um robô, podemos fazer isso por caminhos ou por trajetórias. No caminho gera-se pontos sem definir tempo porém trajetória gera-se os pontos em função do tempo, deste modo, cria-se uma relação de continuidade.

Portanto a trajetória seria uma série de pontos-alvo definidos para o veículo no espaço, o objetivo é gerar funções que permitam ao robô alcançar todos os pontos de maneira eficiente do ponto de vista do tempo e precisão respeitando os limites do veículo utilizado.

A última categoria da navegação é o controle de trajetória cuja função é garantir que o robô se mantenha caminho pré-definido. Para isso é utilizado um sistema de controle que utiliza a informação fornecida pelos sensores para atuar sobre o robô à medida que este avança na trajetória. Nesse caso particular, o sistema deve manter controle da suavidade nas transições e respeitar o tempo de resposta dos sensores. A resposta do controlador em relação à trajetória depende parcialmente da natureza da própria trajetória, portanto, caminhos simples serão mais fáceis de controlar.

1.1. Definição do problema

O problema abordado nesta dissertação é o desenvolvimento de um sistema de controle para um veículo autônomo, que garanta a precisão do movimento baseado em ações de controle suaves de um veículo terrestre autônomo, as ações de controle suaves estão associadas a projeção preditiva de movimento no qual o sistema projeta o erro de posição do sistema ao longo de toda a trajetória buscando fazer o mínimo de ajustes ao longo de cada período de correção, com a finalidade de que este mantenha a precisão do movimento e não realize movimentos bruscos. Pretende-se criar uma trajetória de referência onde o veículo tenha condições de se guiar e um controlador que guie o veículo sobre a referência. No controlador foram definidas restrições para garantir movimentos precisos e suaves através do uso das curvas clotóides como exemplificado na Figura 1.

Figura 1 - Ilustração do problema de um sistema de trajetória levando em consideração a precisão da trajetória e a suavidade de direcionamento.

Fonte: Lima F. P., et. al. (2015).

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver e caracterizar um algoritmo de planejamento de trajetória e controle para plataformas robóticas terrestres utilizadas na agricultura.

Assim, detalhadamente, os objetivos almejados são:

Definição de uma trajetória: trajetórias predefinidas para servir de base para o controlador (retas, curvas, entre outros).

Identificação dos parâmetros de controle: analisar trabalhos anteriores e validar conceitos predefinidos. Criar uma metodologia de ensaios e determinar os parâmetros necessários para implementação do controlador.

Modelos de controle simples: desenvolver um controlador de trajetória, que considere o tempo de atuação, a fluidez do movimento lateral e a integração de diversas plataformas.

1.3. Organização do trabalho

O **capítulo 2** são apresentados os trabalhos na área de planejamento de trajetórias em ambientes não-estruturados, semiestruturados e agrícolas usados como base para o estudo apresentado na dissertação.

O **capítulo 3** descreve as plataformas e sensores utilizados, os conceitos da cinemática do veículo baseado na teoria dos modelos cinemáticos de Ackermann, e a definição dos valores para caracterizar os pontos alvos da trajetória combinado com as teorias de controle em tempo real.

O **capítulo 4** descreve os modelos de planejamento de trajetórias e desenho de vias, o desenvolvimento do planejador de caminho e o desenvolvimento de um sistema de controle baseado na lógica difusa para sua orientação e os sistemas de realimentação do algoritmo em tempo real com uso dos sensores de GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

O **capítulo 5** apresenta os resultados dos sistemas desenvolvidos em cada uma das plataformas e a viabilidade do uso dos mesmos.

O **capítulo 6** apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros para serem desenvolvidos.

CAPÍTULO 2

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados alguns dos trabalhos já realizados na área de navegação autônoma para veículos terrestres, em especial na parte de planejamento de trajetórias e as metodologias existentes para robôs com movimentação no plano bidimensional para o sistema de geração de trajetória.

2.1. Trabalhos Relacionados

Veículos autônomos estão associados a diversas aplicações desde fins militares a aplicações agrícolas (klaser R.P ,2014). Com o intuito de fomentar o desenvolvimento de robôs e veículos terrestres capazes de executar tarefas complexas foram criados como o *DRC* (*Darpa Robotics Challenge*), lançada em 2012 pelo departamento de defesa dos Estados unidos (*DARPA*) e a *ELROB* (*European Robotic Trial*) que é uma competição anual europeia que ocorre desde 2006, sendo intercalada anualmente entre objetivo militar e civil.

Com uso de uma plataforma com sistema de 4 rodas esterçáveis Tijmen (Bakker et. al., 2010) criaram um sistema controle autônomo de ervas daninhas. O veículo foi equipado com duas antenas GNSS interligadas a um sistema *RTK-DGPS* (*Real Time Kinematic differental Global Position System*) que pode ser visto na Figura 2. Para esse caso o sistema percorre um trajeto definido anteriormente respeitando as limitações da plantação e o controle é feito a base desse caminho preestabelecido.

Figura 2 - Plataforma robótica para controle de ervas daninhas.

Fonte: Tijmen et. al., (2010).

Em (Mirisola et. al., 2011), observa-se um projeto com controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo). O caminho gerado com base na distância mínima entre os pontos, ou seja um linha reta entre um ponto e outro, o trabalho não especifica as medidas de esterçamento usadas, porém diz que o sistema apresentava grande movimentação oscilatória a velocidades maiores de 5m/s. No caso, o sistema GNSS foi usado apenas para especificação dos pontos de trajetória sendo o controle baseado em conjunto de análise dos enconders nas quatro rodas e o veículo é demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Veículo robótico todo-terreno.

Fonte: Mirisola *et. al.*, (2011).

No trabalho de (Bergerman *et. al.*, 2012) foi apresentada uma plataforma voltada para automação de colheita em pomares chamada *APM (Autonomous Prime Movers)* que é um exemplo de aplicação em ambiente externo e semiestruturado. O veículo foi equipado com três sensores laser em alturas diferentes que permitem uma percepção frontal em três planos diferentes com um ângulo de 270 graus. Para localização foi utilizado um sistema de GNSS com correção utilizando duas antenas. A navegação deste sistema consistia em manter o veículo o curso e a velocidade constantes, detectando obstáculos que bloqueavam o caminho. Na Figura 4 pode ser visto o veículo em operação. Para a aplicação específica em pomares o veículo opera em modos determinados de acordo com cada situação, sendo: trafegar mantendo-se no corredor cercado pelas árvores do pomar, trocar de corredor no fim de cada trajeto fazendo manobra final de percurso (Figura 5) e entrar em um novo corredor. Um fator importante desta aplicação foi a adequação do ambiente para que fosse utilizado, adotaram uma ode específica nas plantações para formar uma espécie de “parede” com as árvores, que gerava uma certa estruturação do sistema e também melhorava o aproveitamento do espaço e promovia o aumento da produtividade do pomar.

Figura 4 - Veículo autônomo para o auxílio de colheita em pomares.

Fonte: Bergerman et. al., (2012).

Figura 5 - Manobra final de cultivo.

Fonte: Bergerman et. al., (2012).

Em uma abordagem mais restrita (Utstumo et. al., 2012) apresenta uma plataforma para controle de ervas daninhas em um cultivo, neste trabalho o sistema possui duas rodas motores e duas rodas guias.

Como pode se observar na Figura 6, neste caso particular a precisão exigida era alta já que as rodas não poderiam sair do caminho uma vez que elas danificariam a plantação e o tamanho delas era próximo ao limite da plantação, para este problema foi implementado um controle preditivo não linear *NMPC* (*Non-linear Model predictive Control*) e comparado ao controlador PD que demonstrou ineficaz para a situação, foi usada uma câmera RGB para classificação de

parâmetros do cultivo e detectar as linhas de plantio onde análise da trajetória em tempo real limitando-se ao movimento linear dentro do cultivo.

Figura 6 - Robô para controle de ervas daninhas.

Fonte: Utsumo et. al., (2015).

Outro exemplo mais recente é o realizado em um caminhão Scania (Figura 7) modificado em (Lima P. F., 2016) para veículos de carga pesada para aplicações em minas. Ele usa o conceito de curvas clotóides ou espiral de cornu, para gerar um controlador de trajetória que possui uma suavização das ações de controle. Para trafegar o sistema assume que existe uma trajetória predeterminada onde o caminho é livre de obstáculos.

O sistema realiza a fusão de vários sensores entre eles *RADARs* (*Radio Detection And Ranging*), *LIDARs*, antenas *GNSS*, *IMUs* (unidades de Unidade de Medição Inercial) e câmeras monocular e estéreo, com o intuito de melhorar a precisão da percepção do ambiente, pois, os veículos autônomos são comumente utilizados em ambientes dinâmicos. O mais interessante neste trabalho é a análise dos controladores preditivo *MPCC* (*model predictive control clotoids*) em relação ao controlador reativo *PPC* (*Pure Pursuit Control*) e o perfil de aceleração.

O perfil de aceleração permite estabelecer os pontos de maior vantagem para incrementar a velocidade em ordem de compensar o tempo perdido em alguma manobra ou falha anterior, os sistemas demonstraram que o modelo preditivo em base as clotóides melhora a eficiência do sistema reduzindo as ações de controle sem afetar a precisão final.

Figura 7 - Scania G480 modificado, utilizado como plataforma de testes.

Fonte: Pedro L., (2016).

Baseado nos trabalhos da área, a abordagem estabelecida foi a de um sistema que utilize a estrutura Ackermann para esterçamento principal evitando deslizamentos entre as rodas, que possua uma análise preditiva é feita através de caminho gerados por curvas clotóides e o controle lateral realizado por um controlador *fuzzy*.

A análise preditiva permite suavizar as ações de controle e manter a eficiência em relação distância do objetivo final. Por último validar os sistemas realizando testes que serão feitos em duas plataformas distintas, utilizando de sensores GNSS e uma *IMU*. Na Tabela 2.1 podemos ver uma relação dos sistemas demonstrados com aquele a ser realizado nessa dissertação.

Tabela 2.1 - Comparativo dos trabalhos de revisão.

	Sensores	Trajectoria	Controlador	Sistema de referência	Sistema de locomoção
Lima	<i>RADAR, DGPS; IMU</i>	Gerada	MPCC PPC	Global	Ackermann rodas dianteiras
Mirisola	Encoders GNSS,	União reta entre pontos de controle	PD	Local	4 rodas esterçáveis

Bergerman	GNSS Lasers	Mediana entre pontos de cultura	PID	Local	Ackermann rodas dianteiras
Utsumo	Câmera RGB	Definida	PID NMPC	Local	Diferencial
Tijmen	RTK - DGPS	Gerada	PID NMPC	Local	4 rodas esterçáveis
Moreira	GNSS IMU	Gerada	Preditivo <i>Fuzzy</i>	Global	Ackermann

2.2. Conceitos básicos

2.2.1. Geração de trajetória

O problema de navegação robótica pode ser dividido em quatro sistemas: Percepção, Planejamento, Geração de trajetória e Controle de trajetória que podem ser resolvidos separadamente.

Existem diferentes representações de geradores de caminho como apresentado em (Hongo et. al., 1985) que propôs um caminho compostos de arcos conectados por linhas retas que eram fáceis de produzir mas continham descontinuidades apresentadas na Figura 8, outros usavam de elipses polinomiais ou clotóides, (Reeds J. A. and Sheep L. A., 1990) propuseram um método que consistia no uso de três curvas conectadas de raio fixo que representam a curvatura mínima permitida para dado veículo, apesar de considerada o método mais eficaz em relação ao tempo de trajetória e distância percorrida o sistema possui descontinuidades que obrigam o veículo a parar seu movimento longitudinal realizar o esterçamento e depois continuar, o que seria na pratica um sistema ineficiente.

Figura 8 - Métodos de geração de trajetória.

Fonte: Adaptado de Reeds J.A. and Sheep L.A., (1990).

(Dong H. and Sanvij S., 1990 e Scheuer e Fraichard, 1997) combinam as técnicas usando três curvas clotóides ao longo da trajetória agregando um segmento de curvatura K fixa, minimizando as descontinuidades dos sistemas anteriores e as mudanças do sistema angular, em especial Scheuer utiliza o sistema denominado “caminho contínuo de curvatura simples”, que seria a definição prática de uma trajetória onde as curvaturas são conectadas a partir da sua tangente representado na Figura 9.

Figura 9 - Caminho contínuo de curvatura simples.

Fonte: Scheuer e Fraichard, (1997).

As curvas com clotóides ainda são a base da maioria dos estudos de locomoção terrestre e usadas principalmente em desenhos de rodovias como se pode observar (Nikolaos. and

Georgios K., 2014) e apresentados em (Jurate, 2014) e que podem ser visualizados na Figura 10.

Figura 10 - Situações que curvas de transição são usadas.

Fonte: adaptado de Jurate et. al., (2014).

O aperfeiçoamento dos sistemas de navegação usando de sistemas de controles preditivos como exibidos em (Pedro F. L. et. al., 2015) agrega ao controle outros graus de restrição, neste caso além de orientação do movimento no plano, se adiciona o ângulo e a variação da curvatura, em (Agus A., 2017) é utilizado o conceito de curvas clotóides em tempo real para suavização do caminho

Figura 11 - Trajetória preditiva com base nas clotoídes

Fonte: Pedro F. L. et. al. (2015).

CAPÍTULO 3

Neste capítulo serão apresentados a descrição dos veículos utilizados para teste e formalização dos controladores, os sensores utilizados e as especificações dos mesmos e as metodologias de estudo do sistema.

3. Materiais

3.1.1. Helvis

O Helvis III (Figura 12) é um protótipo de veículo elétrico do tipo com esterçamento tipo Ackermann e propulsão dianteira. Tem um sistema de propulsão composto por um motor Maxon EC-4pole e uma placa EPOS2 fabricada pela empresa Maxon Motor a descrição detalhada pode revisada (Higuti, V.A.H. *et al.*, 2017), para este projeto foram adicionados uma IMU LSM9DS e um sensor de localização que é o Receptor GNSS UBLOX NEO-M8N HMC5983 e a comunicação é feita através de uma placa Arduino Mega.

Figura 12 -Plataforma robótica Helvis III.

Fonte: Próprio autor.

A plataforma Helvis III foi utilizada para o estudo inicial e validação do gerador de trajetória, o controlador atua apenas no controle de esterçamento, mantendo a velocidade fixa,

como demonstrado na Tabela 3.1. Os parâmetros físicos do Helvis III necessários para os testes estão resumidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Controladores atuais Helvis III.

Controladores atuais:	
Básico	Realiza a comunicação com o controlador Estabelece a sincronização de esterçamento das rodas Controle da velocidade de locomoção
Controle de esterçamento	Feito através de um mecanismo de Ackermann conectado a um motor da Empresa Maxxon
Controle de velocidade de locomoção	Utiliza uma placa EPOS2 utilizando um motor Maxxon, executando uma rotina em C++ transmitida através de um cabo USB
Controle Manual	Velocidade fixa Acesso remoto usando um roteador sem-fio

Tabela 3.2 - Parâmetros Físicos Helvis III.

Dimensões (m)		
Altura (H)	0,18	
Distância entre eixos (L)	0,41	
Distância entre Rodas no mesmo eixo (W)	0,23	
Limite de Esterçamento		
Rodas dianteiras	Posição Mínima	Posição Máxima
	-25°	25°
Continua		
Tabela 3.2 - Parâmetros Físicos Helvis III(Conclusão)		
Limites de Velocidade Angular		

Esterçamento	Velocidade Mínima	Velocidade Máxima
Dianteiras juntas	5°/s	40°/s
Limite de Velocidade longitudinal configurado		
Velocidade	Mínimo	Máximo
Dianteiras juntas	0,2 m/s	1,2 m/s

3.1.2. RAM - Robô Agrícola Móvel

O Robô Agrícola Móvel (RAM) é um protótipo robótico para testes em ambientes semiestruturados, possui um módulo mecânico no qual permite que cada roda possa se esterçar e movimentar independentemente, no caso cada roda possui 2 motores elétricos. Atualmente é considerado um robô FWSD (Front Wheel Steering and Drive) devido que as rodas traseiras estão com seu esterçamento impossibilitado. O RAM, que pode ser visto na Figura 13, os equipamentos eletrônicos embarcados nele se comunicam pelo protocolo CAN (*Control Area Network*).

Figura 13- Robô Agrícola Móvel, RAM.

Fonte: Próprio autor.

O RAM é uma plataforma de grande porte desenvolvida pela USP em parceria com a Embrapa (Empresa brasileira de pesquisa agropecuária), a plataforma está sendo automatizada

por diversos estudantes de pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos. Os sistemas predefinidos atualmente estão resumidos nas Tabelas 3.3 e 3.4. A plataforma possui 1,8 metros de altura e 1,5 metros de largura e 2,2 metros de comprimento

Tabela 3.3 - Parâmetros computacionais.

Programa feito em C
Comunicação via serial R232
Todas as tarefas são sincronizadas pelo laço do programa principal e executadas repetidamente em um intervalo de tempo pré-definido (loop time)

Tabela 3.4 - Controladores atuais.

Básico	Controle Individual e de sincronização de esterçamento das rodas Controle de direção e de Velocidade de locomoção
Controle de direção (Ackermann)	Solicitado através de direção e de velocidade ou tempo de esterçamento desejado
Controle de velocidade de locomoção	Solicitado através de uma mensagem de comando Permite definir a marcha e a velocidade de deslocamento

O sistema de esterçamento do Robô é controlado através da análise da roda virtual, ou seja, o sistema é reduzido a um comando simples angular como demonstrado na Figura 14

Figura 14- Esterçamento da roda virtual.

Fonte: Jazar (2010).

Para o controlador foram estabelecidos limites definidos a partir de testes feitos na plataforma anteriormente que definem o erro médio na posição devido a movimentação angular demonstrado na Tabela 3.5 os limites e as velocidades estabelecidas para o controlador são apresentados nas Tabelas 3.6 e 3.7

Tabela 3.5 - Erro padrão de posição.

O erro de posição com relação a velocidade Angular	
Velocidade Angular	Erro padrão
De $5^\circ/s$ até $15^\circ/s$	$0,5^\circ$
De $15^\circ/s$ até $30^\circ/s$	1°
Acima de $30^\circ/s$	5°

Tabela 3.6 - Limites definidos para controle.

Limite de Esterçamento			
Rodas	Posição Mínima	Posição Máxima	Variação angular de Esterçamento total
Virtual	-35 °	35°	70°

Tabela 3.7 - Velocidade esterçamento.

Limites de Velocidade Angular para o controle		
Grupo de Rodas	Velocidade Controle	Velocidade Mínima
Sozinhas	8°/s	1°/s
Roda Virtual	5°/s	2°/s

3.2. Sensores

3.2.1. Unidade de Medição Inercial LSM9DS1

Figura 15- IMU LSM9DS1.

Fonte: Sparkflun (2010).

O LSM9DS1 (Figura 15) é uma IMU versátil que pode medir três propriedades chave do movimento: a velocidade angular, aceleração e orientação. Cada sensor no LSM9DS1 suporta um amplo espectro de intervalos: a escala do acelerômetro pode ser ajustada para ± 2 , 4, 8 ou

16 g, o giroscópio suporta $\pm 245, 500$ e $2000^\circ / s$, e o magnetômetro tem escala completa intervalos de $\pm 4, 8, 12$ ou 16 gauss.

Com o uso de uma versão adaptada da biblioteca “mpu5060” foi programada uma biblioteca que permitiu trabalhar com a LSM9DS1 usando a linguagem C.

3.2.2. Receptor GNSS UBLOX NEO-M8N HMC5983.

Segundo a folha de dados, o HMC58983 (Figura 16) possui uma taxa de atualização de 10 Hz e um tempo de aquisição para começo frio $<1s$ e para começo quente $<30s$. A precisão horizontal da antena GPS é de 2,5 m.

Figura 16- Receptor GNSS UBLOX NEO-M8n HMC5983

Fonte: <https://www.u-blox.com/en>

Com a Finalidade de verificar os valores da precisão horizontal fez-se a leitura das coordenadas de um ponto fixo por vários dias na mesma hora e constatou-se que a média de satélites na área foi de dez e o erro horizontal tinha uma precisão de 5 metros. Portanto foi estabelecido que este valor seria o considerado nos testes. Para usar o sistema de navegação GNSS foi criado um programa em C# a partir da biblioteca “TinyGPS”.

3.3. Estudo da cinemática do veículo

O modelo cinemático para o movimento lateral de um veículo pode ser obtido através da descrição matemática do mesmo sem levar em consideração as forças que o afetam. O resultado da modelagem seria um conjunto de equações que descrevem o movimento do veículo em

relações geométricas (Rajamani, 2006). Este capítulo apresenta uma descrição do modelo cinemático de Ackermann de um veículo FWS.

3.3.1. Modelo cinemático Ackermann

Considerando um veículo de quatro rodas com um movimento e a velocidade relativamente baixa, pode-se definir uma relação cinemática entre as rodas internas e externas do veículo em curva que permitem o deslocamento sem deslizamento, isto é chamado de condição de Ackermann (Jazar, 2010). O sistema de Ackermann é mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Veículo esterçamento dianteiro com a condição Ackermann.

Fonte: Jazar (2010).

Que é definida pela expressão equação 1:

$$\cot \delta_o - \cot \delta_i = \frac{w}{l} \quad (1)$$

Em que:

δ_i = ângulo de esterçamento da roda interna a curvatura.

δ_o = ângulo de esterçamento da roda externa a curvatura.

w = distância lateral entre as duas rodas dianteiras ou traseiras.

$l = a_1 + a_2$ = distância entre as rodas dianteira e traseira.

C = Centro de massa do veículo.

No momento em que veículo vai esterçar, o movimento do centro de massa a com respeito ao centro de rotação se torna em um círculo de raio R , que pode ser visualizada na equação 2 (Jazar, 2010).

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

Onde δ é a média das somas dos ângulos da roda interna e externa descrita na equação 3.

$$\delta = \frac{\cot(\delta_I) + \cot(\delta_o)}{2} \quad (3)$$

Cada ângulo também pode ser calculado através das relações de trigonométricas, conforme equações 4 e 5:

$$\tan(\delta_I) = \frac{1}{R1 - \frac{w}{2}} \quad (4)$$

$$\tan(\delta_o) = \frac{1}{R1 + \frac{w}{2}} \quad (5)$$

Isolando $R1$ tem-se a equação 6:

$$R1 = \frac{1}{2}w + \frac{1}{\tan(\delta_I)} = \frac{-1}{2}w + \frac{1}{\tan(\delta_o)} \quad (6)$$

Da equação anterior pode-se obter a relação de Ackermann e a relação direta entre os ângulos das rodas internas e externas e para encontrar o raio R de giro do veículo, define-se o modelo tipo bicicleta equivalente mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Representação do modelo da bicicleta para um veículo de 4 rodas.

Fonte: Jazar (2010).

O Raio R é perpendicular à velocidade do veículo no centro de massa C . Usando a geometria deste sistema pode-se definir as equações 7 e 8 a seguir.

$$R^2 = a_2^2 + R_1^2 \quad (7)$$

$$\cot \delta = \frac{R_1}{l} = \frac{1}{2} (\cot(\delta_l) + \cot(\delta_o)) \quad (8)$$

R_1 = Raio de rotação em relação ao eixo traseiro do veículo.

O sistema precisa considerar o espaço mínimo para realizar a manobra de Ackermann, o raio mínimo estaria localizado sobre o eixo traseiro do veículo na parte interna da curva como mostra a Figura 19 e pode ser calculado utilizando a equação 9.

Figura 19 - Espaço requerido para esterçamento.

Fonte: Jazar, (2010).

$$R_{min} = R_1 - \frac{1}{2}w \quad (9)$$

3.4. Modelo cinemático Ackermann esterçamento independente de cada roda

Apesar do RAM usar sistema de esterçamento Ackermann para locomoção principal, ele também tem a habilidade de mover independentemente as rodas dianteiras. O sistema de esterçamento do RAM é desenhado para permitir giros maiores de 90° graus para direita e esquerda gerando uma alta capacidade de manobras como apresentado na figura 20, o ângulo do esterçamento para cada roda é calculado individualmente a partir da equação 10.

$$\delta = \frac{\omega_{me}}{r_{me}} \quad (10)$$

Figura 20 - Um veículo altamente manobrável.

Fonte: Jazar (2010)

Relação das velocidades angulares de cada roda usando os ângulos internos e externos pode ser feita através da equação 11.

$$\frac{\omega_o}{\omega_i} = \frac{\delta_o(w_f - w_r) - 2l}{\delta_o(w_f + w_r) - 2l} = \frac{\delta_i(w_f + w_r) + 2l}{\delta_i(w_f - w_r) + 2l} \quad (11)$$

ω_o = Variação angular da roda externa a curvatura.

ω_i = Variação angular da roda interna a curvatura.

w_f = distância entre rodas do eixo frontal.

w_r = distância entre rodas do eixo traseiro.

Assumindo que o raio da trajetória do veículo varia lentamente devido à baixa velocidade deste, então a taxa de câmbio da orientação do veículo (ψ) deve ser igual à velocidade angular do mesmo (Rajamani, 2006, p. 23, tradução própria). Pelo anterior a velocidade angular é definida como a equação 12.

$$\dot{\psi} = \frac{V}{R} \quad (12)$$

3.5. Localização

Considerando um veículo terrestre, a localização é definida como a habilidade de determinar sua posição (X, Y) e a orientação (θ) em relação ao ambiente. A abordagem usada para localização é feita através do posicionamento global por satélite (GNSS) em um sistema de referência global (latitude e longitude).

O estudo feito nesta dissertação está associado à locomoção em ambientes onde o robô conhece a sua própria localização e seu ponto de destino.

3.6. Planejamento de movimento

O planejamento do movimento é fundamental para ambientes que podem requerer da computação de novos caminhos, principalmente em sistema fora de estrada, que podem ser divididos em duas camadas um sistema global de longo prazo que analisa a trajetória completa e um local que assegura que o caminho respeite os limites cinemáticos do veículo e evite obstáculos, para veículos de grande porte o planejamento de trajetória e controle precisam respeitar o tempo de resposta de ação de controle evitando movimentos bruscos.

3.7. Curvas Clotóides

Uma das principais ideias desta tese é o uso e a exploração de propriedades de clotóides no design do controlador. Matematicamente falando, A equação subjacente a descrição de um clotóides é conhecida como uma integral de Fresnel. As curvas de clotóides são uma família de

curvas que são posturas-contínuas, e são distintas em que sua curvatura varia linearmente com o comprimento

Da curva:

$$c_{(s)} = k_s + c_i \quad (17)$$

Onde k é a taxa de mudança de curvatura (nitidez) da curva e sub-índice i indica o estado inicial. Um segmento de curva de clotóide é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Curva Clotóide.

Fonte: Vázquez-Méndez M. Casal G. (2016).

E podemos definir as funções como:

$$x_s = x_i + \int_0^s (\cos(\psi_i + k_i(s - s_i) + c_i(s - s_i)^2)) ds \quad (18)$$

$$y_s = y_i + \int_0^s (\sin(\psi_i + k_i(s - s_i) + c_i(s - s_i)^2)) ds \quad (19)$$

$$\psi_s = \psi_i + k_i L_i + c_i L_i^2 \quad (20)$$

CAPÍTULO 4

4. Metodologia

Este capítulo descreve a metodologia concebida para investigar o problema da geração de trajetória para veículos terrestres autônomos com duas rodas esterçáveis e suas restrições cinemáticas de locomoção estilo Ackermann, e o controlador *fuzzy*.

4.1. Planejamento de Trajetórias Bidimensionais

Antes de descrever o processo usado para desenvolver o gerador de trajetórias proposto neste trabalho, os conceitos de trajetória e caminho são definidos. O caminho é a especificação do movimento de um corpo no espaço, ou seja, é um conjunto de posições a serem seguidas pelo robô. Uma trajetória é a especificação do movimento do veículo ao longo do tempo. Portanto, quando é fornecido um caminho para que o robô siga, a trajetória define uma função temporal que descreve o movimento do robô através desse caminho. Como existem diferentes tipos de trajetórias que podem ser geradas para as plataformas robóticas, então se esclarece que o gerador de trajetórias proposto neste trabalho tem a capacidade de gerar trajetórias para robôs (cuja navegação seja baseada no modelo cinemático de Ackermann para veículos FWS) ou para plataformas robóticas tipo carro.

Para formalizar a análise pode-se definir o problema do planejamento de trajetórias como sendo a escolha de uma curva $\vec{r}(t)$ em $\mathbb{R}^2$ que leve o robô de um ponto inicial P_i a um ponto final P_f e que simultaneamente respeite as restrições mecânicas do veículo sendo eles definidas pelas equações 21 e 22.

$$P_i(X_i, Y_i, \psi_i) = \vec{r}(t_i) \quad (21)$$

$$P_f(X_f, Y_f, \psi_f) = \vec{r}(t_f) \quad (22)$$

Onde os X_f e Y' correspondem às coordenadas do vetor posição do veículo em relação a um determinado referencial sobre o plano, e os ψ' correspondem à orientação do mesmo em relação ao eixo X tomados positivamente no sentido anti-horário.

A principal restrição para que um robô não consiga seguir uma trajetória é o raio mínimo de curvatura que ele pode fazer. O RAM pode virar no próprio eixo ($R = 0$), mas este tipo de movimento não é recomendado devido ao tempo e a eficiência do mesmo ao longo da trajetória.

Para o caso genérico de qualquer veículo pode se apresentar que uma trajetória realizável seja aquela que não contenha nenhum trecho cujo o raio de curvatura seja inferior ao mínimo admissível. O raio mínimo de curvatura de um veículo é descrito como ρ_{min} . Portanto, se $K(t)$ é a função que representa a curvatura de $\vec{r}(t)$ então a restrição do veículo é descrita pela equação 23.

$$|K(t)| \leq k_{max} \text{ onde: } k_{max} = 1/\rho_{min} \quad (23)$$

Para determinar uma trajetória que possa fazer o RAM, foi necessário definir 3 diferentes restrições:

$k_{1max} = 1/\rho_{1min}$ = referente ao valor mínimo para realizar a trajetória com esterçamento nas rodas dianteiras;

$k_{2max} = 1/\rho_{2min}$ = referente ao valor mínimo para realizar a trajetória com esterçamento com as quatro rodas;

$k_{max} = 0$ = referente ao giro no próprio eixo no caso se a trajetória for menor que 3 m onde não é possível gerar outra trajetória aceitável para o ponto final.

Como espera-se que a função de curvatura seja constante em toda a trajetória, para evitar perturbações que podem desestabilizar o sistema de controle do veículo usamos o princípio da clotoídes usados na fabricação de vias para diminuir as forças laterais.

Matematicamente se pode determinar que se $\vec{r}(t)$ em $\mathbb{R}^2$ possui derivadas de primeira e segunda ordem contínuas, então a função da curvatura também será contínua ao longo de toda a trajetória e pode ser expressada pela equação 24.

$$K(t) = \dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \dot{y}(t)\ddot{x}(t) / (\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2)^{3/2} \quad (24)$$

4.2. Características principais da trajetória

Tendo em base a limitação inicial se, pode-se analisar o método do caminho dubins (Dubins,1957) onde a principal conclusão é que o caminho mais curto entre os pontos finais e iniciais pode ser obtido pela junção de três curvas simples.

Este método possui 2 modelos de curva que podemos chamar de CCC (curve, curve, curve) e CSC (curve, segment, curve). O caminho CCC é composto de três curvas intercaladas, porém exige variações de aceleração bruscas, pois alternam subitamente as guinadas de esquerda à direita, ou vice-versa. Este modelo é inviável para o sistema por causar acelerações laterais indesejáveis, esses casos são desconsiderados.

O caminho CSC – consiste em curvas conectadas de uma reta. As curvas geradas com o valor, produzem arcos Cs cuja a curvatura máxima é sempre equivalente ao máximo aceitável, K_{max} , este método gera descontinuidades na função de curvatura principalmente nas faixas onde ocorrem as junções das sub-curvas do caminho final.

Para eliminar as descontinuidades do sistema CSC utiliza-se das curvas clotóides, neste caso a curvatura mínima é baseada na combinação de curvaturas tangenciais entre si capazes de gerar a trajetória, o sistema vai gerar todas as combinações possíveis que estão dentro do padrão do veículo e optar pela que tenha o menor tempo de execução.

Em casos particulares o método de arcos pode ser mais efetivo, estes casos particulares são quando duas curvaturas possuem um elo em comum formando apenas uma mudança de direção, chamada de curva de transição, está curva pode ser suavizada usando como princípio que o raio seja máximo e a variação do ângulo das rodas seja uma constante. Esse caso só ocorre quando:

$$\psi_F > \psi_{entrepontos}$$

4.3. Geração de caminhos

Primeiramente se avalia a distância entre os pontos da trajetória no caso como usamos um sistema de coordenadas GNSS as variáveis são transformadas em unidades métricas, equação

25, o sistema considera que o ponto inicial no movimento como 0, já que só é possível obter a variação entre um ponto e outro do GNSS.

$$d = R_{TERRA}^2 * \arctan(2\sqrt{A}\sqrt{-A}) \quad (25)$$

$$A = \sin((LAT_f - LAT_i)^2) + \cos(LAT_f) * \cos(LAT_i) * \sin((LON_f - LON_i)^2) \sin((LON_f - LON_i)^2) \quad (25.1)$$

onde:

d = distância em metros do ponto inicial e final das trajetórias.

R_{TERRA} = Raio da terra = 6.371 m.

LAT_i = Latitude do ponto inicial.

LAT_f = Latitude do ponto final.

LON_i = Longitude do ponto inicial.

LON_f = Longitude do ponto inicial.

Obtendo a variação angular global ψ_{Global} com respeito ao sistema triangulando os valores entre pontos considerando um ângulo de guinada 0 entre eles para definir a origem local como definido pela equação 26.

$$\psi_{Global} = \text{atan}(LON_f - LON_i)(LAT_f - LAT_i) \quad (26).$$

Como matematicamente o sistema ficaria em 90° a -90°, se usa uma verificação por quadrantes para definir o ângulo em sistema global de 0° a 360° demonstrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Correção por quadrantes do sistema

1° quadrante: ψ_{Global}
2° quadrante: $\psi_{Global} + 90^\circ$
3° quadrante: $\psi_{Global} + 270^\circ$
4° quadrante: $\psi_{Global} + 360^\circ$

e em sequência é comparada a variação local ψ_{ref} usando da equação 27:

$$\psi' = \psi_{ref} - \psi_{Global} \quad (27)$$

Com isso se obtém as Equações 28 e 29:

$$x_f = d * \cos(\psi') \quad (28)$$

$$y_f = d * \sin(\psi') \quad (29)$$

É obtido através de uma volta de calibração ou de um ponto de referência em que o sistema esteja paralelo com a orientação do veículo inicial isso permite que o sistema global esteja de acordo ao sistema local, para que este possa funcionar em todos os quadrantes.

Como o sistema possui a capacidade de giro no próprio eixo, então todos os caminhos curtos, nas quais são necessários mais de duas curvas ou uma curvatura menor que o limite do esterçamento Ackermann, são considerados inviáveis devido que o sistema considera o giro no próprio eixo como a resposta mais efetiva. Quando existem caminhos baseados em uma curva ou uma clotóide simples e duas retas, então o sistema tem que definir duas possíveis trajetórias, horário e anti-horário. Neste caso a trajetória é define pelo ângulo da trajetória reta entre os dois pontos (ψ_{alfa}) e a orientação do veículo no instante inicial do movimento sendo definido como mostra a tabela 4.2

Tabela 4.2 – Orientação do movimento circular em razão a trajetória

Se $\psi_{alfa} + 180 < \psi_{veiculo\ inicial} < \psi_{alfa}$ Curva anti-horária.
Se $\psi_{alfa} + 180 > \psi_{veiculo\ inicial} > \psi_{alfa}$ Curva horária.

No caso onde a curva central é uma reta, trajetórias longas, o sistema possui quatro possíveis combinações as quais são classificadas em dois tipos, clotóides reversas e clotóides em formato oval.

Para definir cada curva a analisamos por sua curvatura, definimos D para curvas horarias e L para anti-horárias e R para retas e suas combinações são definidas de acordo com cada

quadrante. Essas regras são para impedir que o sistema sobrecarregue fazendo cálculos desnecessários a partir de dados preliminares das trajetórias tendo em base as orientações: inicial, final e percurso reto (alfa)

Clotóide reversa: Consiste em duas clotóides com curvas opostas conectadas por uma reta exibidos na tabela 4.3

Exemplo Quadrante I:

$$\text{Se } \psi_{\text{veiculoinicial}} < \psi_{\text{alfa}} > \psi_{\text{veiculofinal}} \text{LRD}$$

$$\text{Se } \psi_{\text{veiculoinicial}} > \psi_{\text{alfa}} < \psi_{\text{veiculofinal}} \text{DRL}$$

Clotóide em formado oval: consiste em duas curvas na mesma direção, conectadas por uma reta exibidos na tabela 4.3

Exemplo Quadrante I:

$$\text{Se } \psi_{\text{veiculoinicial}} > \psi_{\text{alfa}} > \psi_{\text{veiculofinal}} \text{DRD}$$

$$\text{Se } \psi_{\text{veiculoinicial}} < \psi_{\text{alfa}} < \psi_{\text{veiculofinal}} \text{LRL}$$

Tabela 4.3 – Perfil de curvatura padrão em base a orientação do veículo

Quadrante	I	II	III	IV
$\psi_{\text{veiculoinicial}} < \psi_{\text{alfa}} > \psi_{\text{veiculofinal}}$	LRD	LRL	LRD	DRD
$\psi_{\text{veiculoinicial}} > \psi_{\text{alfa}} < \psi_{\text{veiculofinal}}$	DRL	DRD	DRL	LRL
$\psi_{\text{veiculoinicial}} > \psi_{\text{alfa}} > \psi_{\text{veiculofinal}}$	DRD	DRL	DRD	LRD
$\psi_{\text{veiculoinicial}} < \psi_{\text{alfa}} < \psi_{\text{veiculofinal}}$	LRL	LRD	LRL	DRL

Para caso Dubins, o sistema sempre utiliza o menor raio possível, o que permite que a trajetória reta do trajeto seja máxima, contudo podemos analisar o mesmo método com curvas

suavizadas utilizando o conceito de raio de curvatura máximo. Em que a curvatura seria mínima e as ações de controle suavizadas.

I. Curva de transição:

As limitações para o uso das curvas de transição são determinadas pela trajetória a orientação da trajetória reta entre os pontos e raio mínimo. Sabendo que a função da reta é definida por a equação 30 e que se tem dois pontos para a trajetória os quais são a tangente da entrada com o ponto $A(x_i, y_i)$ e a tangente de saída $B(x_f, y_f)$ podemos definir a constante da curva com a equação 31.

$$Y = mX + C \quad (30)$$

$$C_i = m_i(x - y); \quad (31)$$

m = coeficiente angular da reta.

Em que $m_i = \tan(\psi_i)$. Aplicando os pontos A e B na equação 31, pode ser redefinida como a equação 32. Onde C_i é a constante da curva no ponto A e C_f é a constante da curva no ponto B.

$$C_i = \tan(\psi_i) * x_i - y_i; \quad (32.1)$$

$$C_f = \tan(\psi_f) * x_f - y_f; \quad (32.2)$$

Para o cálculo da curvatura tangencial é necessário encontrar o ponto de encontro das tangentes de orientação. Isto pode ser feito mediante a comparação das 2 equações da reta que são apresentadas nas equações 33 e 34.

$$\tan(\psi_i) * x_i + C_i = \tan(\psi_f) * x_f + C_f \quad (33)$$

Neste caso $x_i = x_f$ portanto:

$$x = Cf - Citan[\psi_i] - tan[\psi_f] \quad (34)$$

Com o ponto de intercessão $T(x_t, y_t)$ pode-se calcular a função da reta que passa pelo centro da circunferência usando a relação das tangentes que é representada na equação 35.

$$\psi_t = 180 - \psi_f - \frac{\psi_i}{2} \quad (35)$$

A reta de centro da circunferência pode ser calculada pela equação 36 e o raio de curvatura máximo a partir de dois extremos pode ser calculado pelas equações 37 e 38 onde prevalece o menor dos valores que seja superior a 0.

$$C_t = tan(\psi_t) * (x_t - y_t); \quad (36)$$

$$R_{\text{máx}}: \quad r_i = tan(\psi_t) * x_i + C_t \quad (37)$$

$$r_f = tan(\psi_t) * x_f + C_t \quad (38)$$

Considerando que o RAM é um sistema de grande porte em uma área agrícola, ele precisa começar o movimento longitudinal para depois realizar o esterçamento para reduzir os danos ao solo, por isso, se estabelece que o robô ao iniciar um movimento uma correção do valor máximo mediante uma curva menor iniciada por uma reta. Isto pode ser feito mediante as equações 39 e 40.

$$y = \sqrt{d^2 - x_i^2} = mx_i + C \rightarrow d^2 + x_i^2 = m^2 x_i^2 + 2Cmx_i + C_i^2 \quad (39)$$

$$(m_i^2 - 1)x_i^2 + (2C_i m_i)x + (C_i^2 - d^2) = 0 \quad (40)$$

Onde se obtêm os valores de X que satisfazem a equação 41:

$$X_{p1} = \frac{-2Cm \mp \sqrt{2Cm^2 - 4(m^2 - 1)(c^2 - d^2)}}{2(m^2 - 1)} \quad (41)$$

Desta forma se pode calcular qualquer distância mínima de correção definindo o raio de curvatura perfeito para a locomoção de um veículo. Isso é feito calculando o ponto de intercessão da curva pelo ponto obtido na Equação 41, que é o ponto de transição entre a reta e a curvatura.

Com X_{p1} se calcula Y_{p1} e se adiciona a função da reta para definir a nova trajetória. Sabendo que a função da tangente gera um ângulo de 90 graus temos definido o novo ponto com a equação 42.

$$C_{p1} = \tan(\psi_i + 90)(x_i - y_i) \quad (42)$$

Depois se define o centro de curvatura através da intercessão das retas na equação 43.

$$X_c = C_t - C_{p1} \tan[\psi_t] - \tan[\psi_{p1}] \quad (43)$$

Com o valor de X_c se pode definir Y_c . Com os valores de X_c e Y_c pode-se definir Raio R mediante a função de distância apresentada na equação 44. O ponto de intercessão X_{p2} pode ser determinado a partir da equação da curvatura equação 30.

$$\sqrt{(X_{p1} - X_c)^2 + (Y_{p1} - Y_c)^2} = R \quad (44)$$

A equação da curvatura pode ser rescrita como a equação 45.

$$R^2 = Xp^2 + Yp^2 \rightarrow Yp = \sqrt{R^2 - Xp^2} \quad (45)$$

$$R^2 - Xp^2 = m^2 Xp^2 + 2mxC + C^2 \rightarrow (m^2 + 1)Xp^2 + (2mC)Xp + (C^2 - R^2) \quad (45.1)$$

$$\frac{-2mC \mp \sqrt{2Cm^2 - 4(m^2 + 1)(C^2 - R^2)}}{2(m^2 + 1)} \quad (45.2)$$

Com o valor de R obtido se pode calcular a segunda intercessão da trajetória definidas pelas Equações 46 e 47.

$$X_{p2} = X_c + R * \sin(\psi_f) \quad (46)$$

$$Y_{p2} = Y_c + R * \cos(\psi_f) \quad (47)$$

II. Sistema composto (CSC)

O caso de duas curvaturas pode ser analisado de três formas:

1. Separar o sistema em duas curvas diferentes e criar duas curvas de transição partindo do ponto mediano entre elas (Esse sistema busca sempre o maior valor de raio diminuindo a trajetória reta);
2. Assumir a trajetória com a curvatura mínima buscando maximizar o tempo da trajetória reta. (método Dubins);
3. Uma combinação dos dois sistemas gerando a curva mínima inicial e suavização na curva final, corrigindo os distúrbios ao longo da primeira curva.

No momento em que as direções de movimento das curvas inicial e final são conhecidas, o próximo passo é determinar o ponto central de cada uma das curvas mediante as equações 48 e 49.

$$C_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + r_{curve} \begin{bmatrix} \cos\lambda & -\sin\lambda \\ \sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi_i \\ \sin\psi_i \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$C_f = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} + r_{curve} \begin{bmatrix} \cos\lambda & -\sin\lambda \\ \sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi_i \\ \sin\psi_i \end{bmatrix} \quad (49)$$

Em que λ assume valores diferentes que dependem do sentido de movimento da curva analisada, por consequência λ assume valores entre 360° ou -360° . Depois de definido o centro de curvatura, se procede a definir o ângulo da trajetória reta respeito ao sistema global. Para isto, se inicia calculando o ângulo entre os centros de curvatura e o ângulo da trajetória reta (Equações 50 e 51 respectivamente).

$$\psi_c = \text{atan}(Cy_f - Cy_i)(Cx_f - Cy_i) \quad (50)$$

$$\psi_{Treta} = \psi_c + 90\sin\lambda + \text{atan}\left(\sqrt{\left(\sqrt{[Cy_f - Cy_i]^2 + [Cx_f - Cx0_i]^2} - (r_i + r_f)^2\right)(r_i - r_f)}\right)\cos\lambda \quad (51)$$

Com os valores do ângulo entre os centros de curvatura e do ângulo da trajetória reta, pode-se definir o arco de curvatura e os pontos de interseção. Isto pode ser feito mediante um método similar ao apresentado nas equações anteriores.

Com esses dados é possível traçar um conjunto de pontos em base a análise cinemática e definir a posição do veículo a cada instante $t = 1\text{segundo}$ como demonstra a Figura 22, esse tempo foi escolhido devido ao tempo de resposta do sistema do RAM

Figura 22 - Trajetória simulada ao longo do tempo.

Fonte: Autor.

A seguir nas Figuras 23,24 e 25, estão alguns exemplos de trajetórias simuladas no Matlab para análise das possíveis trajetórias do veículo começando em diferentes posicionamentos em respeito ao ponto final.

Figura 23 - Simulações de trajetória em S.

Fonte: Autor.

Figura 24 - Simulações de trajetória em S inversa

Fonte: Autor.

Figura 25 - Simulações de trajetória em arco.

4.4. Sistemas Preditivo

Nesta seção se apresenta sistema preditivo com base no modelo cinemático do veículo a baixas velocidades usando uma trajetória baseada nas clotóides. Como o movimento de um veículo a baixas velocidades têm pouca influência dinâmica então seu movimento pode ser descrito a partir das equações cinemáticas descritas nas equações 51, 52 e 53.

$$d_x(t)dt = v(t)\cos(\psi(t)) \quad (51)$$

$$d_y(t)dt = v(t)\sin(\psi(t)) \quad (52)$$

$$d_\psi(s)ds = v(t)D\tan(\delta(s)) \quad (53)$$

Em que:

d_x = deslocamento na coordenada X.

d_y = deslocamento na coordenada Y.

d_ψ = variação da orientação de guinada.

Considerando que $v(t)dt = ds$ onde $v(t) \neq 0$ e constante, então as equações 51, 52 e 53 podem ser redefinidas no domínio de espaço como as equações 54, 55 e 56.

$$d_x(s)ds = \cos(\psi(s)) \quad (54)$$

$$d_y(s)ds = \sin(\psi(s)) \quad (55)$$

$$d_\psi(s)ds = D\tan(\delta(s)) \quad (56)$$

Sabendo que $d_\psi(s)ds$ é o mesmo que $K(s)$ que representa a curvatura ao longo do caminho e que ela é constante devido ao uso de clotoídes, então podemos dizer que as equações 54,55,56 descrevem a clotoíde. O sistema pode ser definido por N pontos com uma função, então podem ser rescritas como as equações 57,58,59.

$$x_{i+1} = x_i + \int_{s_i}^{s_{i+1}} (\cos(\psi_i + k_i(s - s_i) + c_{i+1}(s - s_i)^2)) ds \quad (57)$$

$$y_s = y_i + \int_{s_i}^{s_{i+1}} (\sin(\psi_i + k_i(s - s_i) + c_{i+1}(s - s_i)^2)) ds \quad (58)$$

$$\psi_s = \psi_i + k_i L_{i+1} + c_i L_{i+1}^2 \quad (59)$$

O sistema assume que o veículo está sempre próximo à referência original e a distância através da trajetória pode ser computada com o uso de lógicas trigonométricas simples. No caso quando caso o sistema ultrapasse essas barreiras ele corrige o sistema a partir do ponto seguinte criando uma nova sequência de pontos distribuídos na trajetória restante como representado na Figura 26.

Figura 26 - Representação do sistema de correção de erros na trajetória.

Fonte: Autor.

Caso o sistema não seja imposto nenhuma restrição de limites de trajetória o sistema vai atuar unicamente quando o limite de esterçamento mínimo do veículo é alcançado, este limite é conseguido por uma análise prática do veículo isso permite que o veículo siga o percurso suavemente apenas monitorando a distância até que de fato seja necessário alguma ação permitindo que o erro acumule ao longo da trajetória antes que toma a ação de controle como demonstrado na Figura 27.

Figura 27 - Esquema da análise preditiva do sistema

Fonte: Autor.

Quando ao sistema é adicionado uma restrição fixa como exemplo para movimentação em uma rodovia ou com limites de deslocamento o sistema faz a mesma análise e se pode observar na Figura 28 onde as linhas vermelhas seriam os limites de erro permitido.

Figura 28 - Esquema das restrições preditivas.

Fonte: Autor.

4.5. Controlador *fuzzy*

O Helvis III tem um sistema de controle *fuzzy* para controlar a orientação do veículo (ângulo yaw). Este sistema permite que o veículo mantenha uma orientação desejada (Velasquez, 2015). Para usar o sistema de controle difuso do Helvis III no RAM, teve que ser adaptado para as características mecânicas do RAM. Além disso, deseja-se que o sistema seja capaz de realizar giros (no próprio eixo) e curvas, portanto se gera um sistema de controle *fuzzy* estendido que interage com o gerador de trajetória para criar um sistema preditivo que forneça uma trajetória de referência e que possa analisar o erro antes que ele ocorra.

Figura 29 - Sistema de controle.

Fonte: Autor.

De acordo ao diagrama de blocos apresentado na Figura 29, é a Ψ_d orientação desejada, Ψ_r é a orientação real, e_ψ é o erro de orientação e e_{Path} é o erro do caminho respeito ao calculado, u é o sinal de controle. O sistema de controle difuso possui duas orientações na qual $\Psi_d = \Psi_{d+1}$ e $\Psi_d \neq \Psi_{d+1}$ que estabelece se a trajetória é reta ou uma curva. O sistema de curva se constrói a partir do sistema de previsão em que $(X_{curve}, Y_{curve}, K_{curve}, \theta_{curve}, L_{curve})$ seriam o ponto da curvatura, (X, Y, θ) a curvatura em cada instante de tempo (t) e a distância entre o próximo ponto L. Usando os métodos das clotoides, k seria a constante linear da curvatura.

Um sistema *fuzzy* é constituído por três etapas: *fuzzificação*, inferência e *defuzzificação*. Etapa de *fuzzificação*: usa conjuntos *fuzzy* de entrada para traduzir uma variável de entrada em uma ou mais variáveis *fuzzy* mediante o uso de funções de pertinência.

Etapa de inferência: o sistema faz um raciocínio difuso onde relaciona as variáveis *fuzzy* de entrada com as variáveis *fuzzy* de saída mediante um sistema de regras. Por último a etapa de *defuzzificação* permite traduzir a variável *fuzzy* de saída em um valor numérico. Para realizar a tradução se faz uso de métodos de *defuzzificação* como o método pelo centroide.

Para a etapa de fuzzificação do controlador difuso desenvolvido, se definiu o conjunto *fuzzy* de entrada (Figura 31) usando 5 funções de pertinência do tipo triangular, equações do 60 ao 64. Essas funções são alteradas constantemente pelo sistema de geração de trajetória para suavizar ou incrementar a ação de controle necessária e *Angc* seria a variante de controle agregada pelo sistema, exemplo disso é que a variante *Angc* inicialmente no Helvis seria de 4 unidades, permitindo uma variação máxima de 5 graus antes de qualquer interversão, em um ambiente estreito onde o sistema fosse obrigado a manter uma linha reta quase perfeita como uma plantação de ervas a variante seria 0, fazendo com que o sistema ficasse estritamente em linha reta.

Figura 30 - Conjuntos fuzzy de entrada

Fonte: Autor.

Tabela 4.4 - Regras Fuzzy

MN $\neq 0$	Valor máximo de L	MN
N $\neq 0$	Valor máximo de L	N
Z $\neq 0$	Valor máximo de C	Z
P $\neq 0$	Valor máximo de R	P
MP $\neq 0$	Valor máximo de R	MP

$$Mn = \begin{bmatrix} 0 & se\ e > Ang_c \\ (-Ang_c + 1 - e)(-Ang_c - 1(-Ang_c - 20)) & se\ -Ang_c < eC < -Ang_c - 20 \\ 1 & se\ e < Ang_c - 20 \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & se\ e > 0 \\ (0 - e)(0 - Ang_c + 1) & se\ -Ang_c < e < 0 \\ (e - (-Ang_c - 20))(-Ang_c - (-Ang_c - 20)) & se\ e < Ang_c - 20 \\ 0 & se\ e < -Ang_c - 20 \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & se\ e > Ang_c \\ (Ang_c - e)(Anc_c - 0) & se\ 0 < e < Ang_c \\ (e - (-Ang_c))(0 - (-Ang_c)) & se\ -Ang_c < e < 0 \\ 0 & se\ e < -Ang_c \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & se\ e > 0 \\ (Ang_c + 20 - e)(Ang_c + 20 - Ang_c + 1) & se\ Ang_c < e < Ang_c + 20 \\ (e - 0)(Ang_c - 0) & se\ 0 < e < Ang_c \\ 0 & se\ e < 0 \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$MP = \begin{bmatrix} 1 & se\ e > Ang_c + 20 \\ (e - Ang_c + 1)(Ang_c + 20 - Ang_c) & se\ Ang_c < eC < Ang_c + 20 \\ 0 & se\ e < Ang_c - 1 \end{bmatrix} \quad (64)$$

De acordo com a Figura 30, a entrada do controlador *fuzzy* é o erro da orientação (e). Um valor de entrada produz um valor diferente em cada conjunto de entrada *fuzzy* (valores entre 0 e 1). Os valores de cada intersecção são baseados na necessidade de guindagem em cada momento $T=1$ para cada um dos veículos usados. Quando o sistema analisa que a variação entre T e $T+1$ é inexistente, então o sistema segue os valores para linhas retas. Estes valores são armazenados e relacionados com os conjuntos de saída do controlador.

O conjunto *fuzzy* de saída (Figura 31) está composto por três funções de pertinência triangulares, equações do 65 ao 67. Esse conjunto define qual será o ângulo de esterçamento das rodas.

Figura 31 - Conjuntos fuzzy de saída.

Fonte: Autor.

$$L = \begin{bmatrix} 0 & \text{se } e > 0 \\ (0 - y)(0 - (-45)) & \text{se } -45 < y < 0 \\ 1 & \text{se } e < -45 \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & \text{se } y > 45 \\ (100 - y)(0 - (-45)) & \text{se } 0 < y < 45 \\ (y - (-45))(0 - (-45)) & \text{se } -45 < e < 0 \\ 0 & \text{se } e < 0 \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & \text{se } e > 45 \\ (y - 0)(45 - 0) & \text{se } 0 < y < 45 \\ 0 & \text{se } e < 0 \end{bmatrix} \quad (67)$$

Para determinar o valor da saída *desfuzzificada* se usa o método do centroide (BOTELHO, 2013, p. 125) definido pela equação 68.

$$Z = \left((\sum_{t=0}^n u_a(x_i)x_i) (\sum_{t=0}^n u_a(x_i)) \right) \quad (68)$$

Onde Z é a saída *desfuzzificada*, u_a são os valores de entrada e x são os valores *fuzzy* de saída gerados.

O sistema trabalha com velocidade linear constante para melhorar controle da orientação nas curvas. Portanto, quando o robô está em processo de curvas sua velocidade se mantém constante e um comando separado reduz ou incrementa a velocidade quando este está em uma reta caso seja necessário compensar atrasos durante a curva.

4.6. Navegação usando a IMU.

O sistema verifica apenas a variação do caminho (pré-definido) em relação a variação do sistema em tempo real manejando o veículo na margem de erro preestabelecido e acumulando o erro. Para cada ciclo (1 segundo), o sistema analisa quantas vezes ultrapassou a margem de erro e caso esse número seja superior a 10, reavalia a trajetória. É necessário no mínimo 1 segundo para que este considere um erro muito grande e reavalie a navegação.

Tabela 4.5 - Limitações de controle pela IMU

Característica de erro	Margem	Contador
Perfeito	Menor que 5°	+0
Aceitável	Entre 10° a 5°	+1
Grave	Entre 20° a 10°	+2
Gravíssimo	Superior a 20°	+5

Os valores se acumulam caso o erro seja recorrente. Se em 1 segundo essa margem não foi superada, então o sistema faz a correção no próximo segundo. Se este não corrigir o erro em um intervalo de tempo menor a 10 segundos, então ele cancela a trajetória e faz uma reavaliação completa partindo ponto atual.

4.7. Técnica de Navegação por GNSS

O algoritmo de navegação por GNSS não considera obstáculos no caminho, de forma que o robô pode ir de qualquer ponto até outro. O algoritmo tem um sistema controle de malha fechada que permite corrigir qualquer desvio de rota (proposital ou não) gerando que o veículo sempre volta a se dirigir para o ponto de destino.

O sistema analisa constantemente quatro pontos. Todos os pontos são especificados por suas coordenadas geográficas e o ângulo de orientação da parte frontal do veículo (LAT, LONG, HEADING) isso permite combinar as informações da IMU ao sistema. O primeiro se refere ao ponto final da trajetória que se deseja realizar e o segundo ao ponto inicial de onde

começa o movimento, estes pontos são fixos durante todo o percurso. O terceiro ponto varia de acordo com a quantidade de transições do estilo de movimento para evitar que o sistema confunda os percursos curvos com erros de navegação, são tipos pontos de controle quando um é alcançado o outro é chamado imediatamente e continua o ciclo, os pontos quatro e cinco são valores que analisam o ponto atual [T] e o ponto anterior [T-1] e fazem a análise direta do sistema isso pode ser visto na figura 32.

Figura 32 - Análise de trajeto pelo GPS.

Fonte: Autor.

O sistema analisa em diversas formas o processo:

- I. A Orientação no veículo atual e a variação em relação ao instante [T-1];
- II. Distância percorrida durante o período T;
- III. Velocidade por cada instante T;
- IV. Distância percorrida até o instante T;
- V. Distância do Ponto final;
- VI. Relação de distância do Ponto de referência a trajetória;
- VII. Variação da orientação calculado em relação a posição do veículo atual.

4. 3Tabela: Resumo de Alertas do Sistema de controle devido erros nos sensores

Verificação	Erro	Possível causa	Correção
1.Velocidade	Abaixo do normal	Derrapagem ou imperfeições no terreno, elevações	Nenhuma
2.Distância	Baixa ou zero	Sistema de locomoção falhando ou sistema bloqueado	Reinicia os cálculos caso seja recorrente, desliga e pede apoio
3. Orientação-linha reta	Variação maior de 5 graus	Derrapagem.	Avisa ao sistema de correção
4.Orientação - curva	Variação maior que a calculada	Sistema acelerado	Diminui a velocidade
5. Orientação respeito ao destino	Variação maior que 20 graus	Falha na trajetória	Atualiza a orientação – retoma os cálculos
6. Orientação respeito ao ponto de referência - retas	Variação maior que 10 graus	Erro na saída da curva	Atualiza a orientação

O sistema de alertas é um mecanismo de proteção para caso o sistema não consiga estabelecer um bom funcionamento e para que mantenha a suavidade da locomoção sem fazer movimentos bruscos e cabe destacar:

1. Em relação a erros de Velocidade não foi estabelecido nenhuma ação de controle direto, portanto ele apenas mantém a informação atualizada;
2. Quando o sistema mantém a mesma distância entre os pontos de controle, isso pode significar que o veículo está parado ou que o sensor principal não está enviando dados novos, portanto o programa reinicia e adiciona um contador de erro, caso ele continue a não receber novos sinais o programa para de atuar e solicita ajuda do operador;
3. Quando o veículo está em uma trajetória reta a única preocupação dele é manter o percurso, portanto o controlador atua no momento que este erro ultrapasse o limite de 5 graus;
4. Na curvatura qualquer erro pode modificar a trajetória, portanto o sistema analisa sempre os próximos 2 passos. Com pontos de controle bem próximos entre si para definir que o robô não acelere ou atrase, caso ele ultrapasse o sistema diminui a ação nos próximos 2 pontos, caso atrase, acelera a atuação nos próximos 2 pontos, caso o sistema chegue a ultrapassar o limite de atraso este diminui a velocidade para permitir que seja concluído o esterçamento das rodas mantendo;
5. Em todos os casos o sistema analisa o último ponto e a variação angular para ver se ele ainda está nos padrões da trajetória, assim quanto mais próximo o veículo estiver do objetivo maior será precisão demandada pelo controlador, a linha limite é representado pela figura 29.
6. A cada ponto de controle o sistema busca triangular o cálculo entre eles e buscar a referência da trajetória reta, isso serve para verificar o erro obtido em cada ciclo de controle para estimar o erro nos pontos futuros, usando o erro médio dos pontos anteriores ele cria uma possível trajetória corrigida dos próximos dois pontos.

O sistema GNSS e a IMU operam em conjunto com base comparativa da variação entre os pontos de controle para estabelecer a orientação do veículo, caso os dois valores sejam incompatíveis (variação maior que 5° ou distância superior a 3 metros), o sistema busca a trajetória previamente calculada e mantém o deslocamento enquanto acumula contadores de erro, então o sistema começa fazer processos diferentes para suprimir o erro e caso não seja possível pede ajuda ao operador.

CAPÍTULO 5

5. Resultados.

Este capítulo refere-se aos resultados dos testes realizados para validação do sistema de navegação proposto. Os ensaios de locomoção com os dois modelos de veículos, mostrando a aplicação da estratégia de navegação e suas variações e problemas.

5.1. Estratégia de Controle

O movimento do robô é composto de seguimentos lineares e rotacionais interligados. Inicialmente a proposta é que o sistema mantenha sua estratégia mesmo que os sensores externos falhem. Primeiro este se localiza dentro do parâmetro estabelecido, gera um caminho entre o ponto inicial e final da primeira trajetória (separando seguimentos curvos e lineares) e criando pontos de checagem do controle preditivo explicado no capítulo 4. Depois gera a trajetória desejada do veículo estabelecendo um tempo determinado para cada *ponto* e uma base de pontos determinado por segundos. Finalmente, o controlador *fuzzy* atua como controlador principal analisando o erro do veículo, enquanto monitora a distância percorrida comparando com a trajetória estabelecida nos pontos de controle.

5.2. Navegação por GNSS

Inicialmente para analisar o receptor GNSS foram realizados testes com a plataforma Helvis devido à facilidade de transportá-lo, o teste realizado é representado pela Figura 33 onde a plataforma sai da posição inicial(I) e deve alcançar a posição final (F).

Figura 33 - Teste de trajetória GNSS.

Fonte: Autor.

A plataforma consegue realizar o percurso, porém demora quase o dobro do tempo calculado pelo sistema de trajetória que foi de 46 segundos, além disso, o sistema apresentou um comportamento com grandes oscilações devido aos saltos nas leituras das coordenadas obrigando que o sistema desse voltas no local. A Figura 34 apresenta o percurso do veículo durante o melhor teste obtido usando apenas o GNSS. Com um percurso de 10 metros, inicialmente o sistema começa indo em direção oposta, mas rapidamente corrige e retorna à orientação correta. Durante o teste se teve uma média de 15 correções, a distância final foi de 1.5 m com respeito ao objetivo e o tempo do percurso foi 87 segundos.

Figura 34 - trajetória realizada segundo o GNSS

Fonte: Autor.

5.3. Tempo de Navegação

Devido ao sistema teórico não considerar os possíveis erros aleatórios (derrapagem da roda, objetos no caminho), este irá automaticamente pedir uma nova rota quando o tempo de percurso foi maior que o estabelecido.

5.4. Testes experimentais do controlador difuso – linha reta

Para avaliar o comportamento do sistema de controle difuso para a orientação do veículo, foram realizados quatro testes que consistiram em que o veículo seguirá uma orientação desejada e no meio do percurso se gerou uma perturbação manual (mudança da orientação atual do veículo) com o objetivo de observar se o sistema de controle gerava o retorno, ou não, do veículo para a orientação desejada.

A perturbação manual foi uma mudança entre 15 a 35 graus na orientação do veículo e se obteve que o robô retornou para a orientação desejada num intervalo menor de 3 segundos. O desvio médio dos testes foi menor que 0,3 metros e a maior variação obtida foi de 5 graus. Neste caso o tempo de resposta do sistema é estabelecido apenas pela velocidade do processo de captura dos dados que é de 0,3 segundos. A Figura 35, demonstra a comparação dos testes e a oscilação do sistema quando foi realizada a perturbação manual, com a reação rápido o sistema gera oscilações que em um sistema de grande porte devem ser evitadas.

Figura 35 - Sistema *fuzzy*, teste linear

Fonte: Autor.

5.5. Aplicação da Estratégia de Navegação Proposta.

5.5.1. Aplicação da Estratégia de Navegação no Protótipo Helvis

A aplicação da estratégia de navegação proposta se deu no campo de Futebol da USP, onde 10 testes foram realizados para correção dos parâmetros do programa com o objetivo de obter de uma performance satisfatória no robô Helvis (Figura 36).

Figura 36 - Helvis III – No campo de Futebol

Fonte: Autor.

Os testes não tinham uma posição inicial definida devido que o objetivo do teste era que a partir de qualquer ponto dentro da quadra de futebol, o robô determina sua localização e desloca para um ponto pré-definido (ponto alvo) usando as leituras do GNSS. Esses pontos foram adicionados ao banco de dados inicial do robô para gerar a trajetória a partir deles. O sistema depois compara a trajetória real com a calculada e confere continuamente se existem erros, os quais são acumulados em um contador. Se o contador chega ao limite estabelecido então o sistema chama novamente o gerador de trajetória para definir uma nova projeção do resto do caminho.

Nas Figuras 37 e 38 se mostram trajetórias básicas do veículo, uma em linha reta e a outra com 3 curvas formando um caminho complexo, sendo assim é representado em vermelho a linha definida pelo sistema e verde e azul as linhas definidas a partir das leituras do GNSS.

Figura 37 - Trajetória em linha reta definida pelo sistema em comparação a definida pelo leitor de GNSS.

Fonte: Autor.

Figura 38 - Trajetória curva definida pelo sistema em comparação a definida pelo leitor de GPS

Fonte: Autor.

Na Figura 39 pode ver os pontos A e B que mostram uma perda do sensor GNSS, o sistema de planejamento se guia pelo caminho gerado inicialmente enquanto espera dados atualizados dos sensores, pode-se perceber que após a perda dos sensores o sistema mantém o erro constante, porém como mostra a Figura 38, ele mantém a rota para o objetivo e finaliza próximo a pré-definida.

Figura 39 -Distância do objetivo em metros

Fonte: Autor.

A Figura 39 mostra a variação da posição em respeito a predefinida, nos pontos entre A e B o sistema desconsiderou a variação dos sensores no que pode se verificar pela linha quase perpendicular à da referência, reavaliando o sistema no ponto B onde conseguiu alcançar os valores aproximados da referência finalizando o percurso a 1,7 metros do ponto calculado. O erro do GNSS tem uma variação maior a três metros, no ponto A o sistema em reposta ignora o GNSS e se guia pela trajetória pré-definida. Os primeiros testes indicaram que para velocidades muito altas o tempo de resposta de 1 segundo gerou oscilações no controle, apesar de conseguir chegar ao objetivo, o erro médio foi 3 metros. Pelo anterior, se estabeleceu que a melhor velocidade do veículo fosse 0.5m/s. depois o teste foi realizado várias vezes em distancias diferentes especificadas na tabela 5.1 para obtenção de 1 ponto, em seguida um teste com uma sequência de 3 pontos iniciando em 4 lugares diferentes da quadra de futebol em base a cada quadrante, a Figura 40 representa um dos testes feitos.

Figura 40 -Demonstração dos testes primeiro quadrante

Fonte: Autor.

Tabela 5.1 - Dados dos Testes com Helvis III- Campo de futebol 1 Quadrante

Testes Primeiro Quadrante -1 ponto						
Distancia Inicial (m)	Ação de controle GPS	Tempo de ação(s)		Tempo entre atuação do controle	V(m/s)	Dist. do objetivo(m)
		Calc.	Real.			
13	0	61	56	1 segundo	0,5m/s	1,21
22	1	97	83	1 segundo	0,5 m/s	3,88
56	4	134	130	1 segundo	0,5 m/s	2,34

Testes Primeiro Quadrante – sequência de pontos						
Distancia Inicial (m)	Ação de controle GPS	Tempo de ação(s)		Tempo entre atuação do controle	V(m/s)	Dist. do objetivo(m)
		Calc.	Real.			
13	1	61	97	1 segundo	0,5m/s	1,70m
35	2	166	153	1 segundo	0,5m/s	3,54 m

Tabela 5.2 - Dados dos Testes com Helvis III- Campo de futebol 2 Quadrante

Testes Segundo Quadrante - Sequência de pontos						
Distancia Inicial (m)	Ação de controle GPS	Tempo de ação(s)		Tempo entre atuação do controle	V(m/s)	Dist. objetivo (m)
		Calc.	Real.			
12	0	62	54	1 segundo	0,5m/s	0,69 m
24	0	64	64	1 segundo	0,5 m/s	1.18 m

Tabela 5.3 - Dados dos Testes com Helvis III- Campo de futebol 3 Quadrante

Testes Terceiro Quadrante -Sequência de pontos						
Distancia Inicial (m)	Ação de controle GPS	Tempo de ação(s)		Tempo entre atuação do controle	V(m/s)	Distancia do objetivo(m)
		Calc.	Real.			
9.8	0	47	42	1 segundo	0,8 m/s	2,35m
12	1	103	94	1 segundo	0,8m/s	3,67m

Tabela 5.4 - Dados dos Testes com Helvis III- Campo de futebol 4 Quadrante

Testes Quarto Quadrante – Sequência de pontos						
Distancia Inicial (m)	Ação de controle GPS	Tempo de ação(s)		Tempo entre atuação do controle	V(m/s)	Distancia do objetivo(m)
		Calc.	Real.			
20	3	101	113	1 segundo	0.5 m/s	1,73
10.2	0	47	40	1 segundo	0.5 m/s	2,37

Tabela 5.5 - Desvio da trajetória em comparação a simulação

V=0.5 m/s	Max.(m)	Media	Desvio padrão
Linha Reta	0.2	0.5	0.02/m
Curva única	1.2	0.7	0.05/m
Curva em S	1.3	0.7	0.05/m

5.6. Aplicação da Estratégia de Navegação no Protótipo RAM

Após o uso do protótipo Helvis III para análise básico e verificação dos parâmetros, os testes foram reavaliados na estrutura RAM, devido que o sistema RAM é um protótipo este está em constante uso e modificações ele não possui resistência a intempéries, por isso os testes sempre foram com o tempo ensolarado.

Figura 41 - RAM em funcionamento

Fonte: Autor.

Nós testes utilizando o RAM (Figura 41) foram usadas três tipos de trajetória: uma reta simples, uma curva única e uma trajetória composta, representadas na Figura 42, para isso se definiu três pontos chaves para trajetória obtidos pelo GNSS previamente que foram agregados ao sistema como um planejador, a velocidade padrão foi estabelecida para 0.3 m/s para que o sistema calcula-se o percurso em relação ao tempo, mas por questões de segurança

foi desativada a habilidade do sistema de acelerar em meio caminho forçando a buscar uma solução diferente. Inicialmente foi declarado uma margem de segurança onde o sistema tinha uma parada quando o sistema estivesse próximo a 3 metros do objetivo o que resultava em uma distância entre 6-8 metros da localização final, mas, ao eliminar essa limitação se obteve melhores resultados como se pode avaliar nas Figuras 44 e 45. Os resultados dos testes podem ser observados nas tabelas 5.6 e 5.7

Figura 42 - composição dos testes realizados

Fonte: Autor.

Figura 43 - Trajetória de teste – captação do GNSS

Fonte: Autor.

Figura 44 - Trajetória de teste, sistema composto

Fonte: Autor.

Os testes foram favoráveis para o sistema proposto, mesmo com os saltos do GNSS o sistema foi capaz de manter a trajetória similar a calculada previamente, sendo capaz de se corrigir caso saísse da curva. A comparação ativa entre os pontos simulados e o GNSS podem ser vistos na tabela 5.8

Tabela 5.6 - Dados dos Testes com RAM - Campo de futebol

Dist. Inicial (m)	Dist. GNSS (m)	Tempo de ação(s)		Tempo entre atuação do controle	V(m/s)	Dist. do objetivo(m)	Dist. (GNSS)(m)	Erro (°)
		Calc.	Real.					
Trajetória linear								
26	28	96	71	1 segundo	0.3	4,67 m	3.004 m	0
27	28.88	95	74	-	-	3.60 m	0.02 m	0.1
Curvatura única								
46	26	139	134	1 segundo	0.3	7,69 m	2,94 m	3

Trajetória linear								Erro (°)
Dist. Inicial (m)	Dist. GNSS (m)	Tempo de ação(s)		Tempo entre atuação do controle	V(m/s)	Dist. do objetivo(m)	Dist. (GNSS)(m)	
		Calc.	Real.					
26	28	96	71	1 segundo	0.3	4,67 m	3.004 m	0
27	28.88	95	74	-	-	3.60 m	0.02 m	0.1
40	27	155	154	-		3,5 m	0.5 m	0
Curva composta								7
42	35	127	127	1 segundo	0.3	4.67 m	2.0 m	

Na tabela 5.6 pode-se notar um valor acima das condições estabelecidas de 5 m de distância máxima. Isso foi devido as limitações de trajetória uma vez que o sistema acreditava estar a uma distância de 3 metros, ou seja, muito próxima do limite máximo de velocidade de esterçamento a uma distância muito pequena do objetivo (limite de esterçamento mínimo de 2,5 m para o RAM). No caso o sistema considerou que a distância já estava no limite proposto e decidiu priorizar a orientação do sistema. Como podemos ver na Figura 45.

Tabela5.7 - Desvio da trajetória em comparação a simulação

V=0.3 m/s	Max.(m)	Media	Desvio padrão
Linha Reta	0.15	0.1	0.01/m
Curva única	0.5	0.4	0.03/m
Curva em S	1.2	0.9	0.03/m

Figura 45 - RAM realizando teste

Fonte: Autor.

Nesse capítulo foram realizados testes para analisar o sistema de controle proposto, as curvas clotóides promovem uma curva suave e permite o robô completar o deslocamento mantendo a precisão desejada. Existem limitações para a curvas clotóides e o sistema de suavização da curva que no caso seriam a velocidade máxima de esterçamento do veículo e a curva máxima que este pode realizar.

O controlador é capaz de suportar tempos de reação de 1 segundo, permitindo manter o sistema na rota desejada mesmo sem informações dos sensores.

O número máximo de clotoides usados para descrever o caminho é dependente do valor máximo de desvio permitido entre o sistema original e o caminho baseado na clotóide, este pode ser programado para ser inversamente proporcional à distância do objetivo fazendo, reduzindo as ações de controle por todo o seguimento da trajetória, compensando com a análise preditiva para que o tempo estipulado seja igual ao da trajetória inicialmente estabelecida.

CAPÍTULO 6

6. Conclusões

Este trabalho apresentou o projeto, construção, testes e verificação de um sistema de geração e controle de trajetória para um robô móvel autônomo capaz de navegar entre pontos GNSS especificados por um usuário. O projeto tenta minimizar os erros dos sistemas IMU e GNSS fazendo uma fusão relativa dos sensores

Optou-se pelo sistema de clotóides para definição das curvas, já que é o mais comumente usados para a construção de rodovias e possui vantagens específicas que facilitam o controle e equacionamento. A trajetória foi criada com o intuito de aproveitar as vantagens do sistema com duas rodas esterçáveis do robô móvel RAM, mas não se limitando a ele, com vários sistemas diferenciados para suprir as necessidades específicas do mesmo.

Tanto a malha de controle de esterçamento quanto de navegação foram implementadas em mais de um protótipo do veículo. O sistema pode funcionar em diversas plataformas respeitando as características de cada veículo.

Finalmente, um algoritmo de navegação que foi proposto, utiliza dos sensores (IMU e GNSS), tendo a vantagem de dispensar o uso de bússola já que a cada interação do algoritmo recalcula o ângulo entre a posição atual do veículo e a posição de destino e diminui os erros de pico usando a trajetória offline calculada com base as equações cinemáticas e o uso de IMU para integração do sistema.

Para navegação em ambientes não controlados, é necessário que se utilizem sensores adequados, tais como sensores ultrassônicos e lasers (para medição da distância), câmeras, etc. A utilização de um DGPS com precisão de centímetros contribuirá de maneira significativa para melhora da navegação.

O sistema será utilizado em projetos de monitoramento automático na área de agricultura de precisão, porém existem diversas possibilidades de trabalhos futuros, que podem se beneficiar do mesmo, tais como pesquisas em navegação robótica, em prospecção de recursos naturais de maneira autônoma.

6.1 Trabalhos Futuros

Nessa seção se discute possíveis trabalhos futuros nas direções de design de controladores para carros autônomos

Estender a análise experimental com o uso de outros sensores e fusão entre eles: A Validação experimental é uma das tarefas mais desafiadoras e importantes para a geração de sistemas de controle autônomo, o processo de implementação do controlador pode ser demorado, mas os resultados são significativamente mais gratificantes.

Geração de um perfil de velocidade e análise do caminho em 3 Dimensões: Apesar do controle da translação ser o mais importante, a capacidade de controlar a velocidade de navegação e combinar este sistema mantendo a maior eficiência nas curvas seria ideal, mesmo que possa analisar a velocidade em tempo real, questões como derrapagem, alterações de altura, inclinações afetem as medidas, poderia ser implementado um sistema que ative ações de balanceamento em relação as alterações de ângulo de rotação do veículo, que podem ocorrer por derrapagens e outros problemas similares

Estudo de planejamento de trajetória: O sistema descrito nesta dissertação assume que existe um nível superior responsável por planejar a trajetória assim obstáculos não são computados. A ideia principal é que o sistema seja capaz de gerar uma trajetória que seja aceitável para suas limitações cinemáticas e que seja suave e altamente controlável, sendo capaz de realizar uma nova trajetória sempre que seja solicitado pelo sistema superior. Um dos caminhos mais interessantes para continuar a pesquisa seria a combinação de planejamento, geração e controle da trajetória.

Referências

ATMOSUDIRO, A.; VERL, A.; **LECHLE R, A.**; SCHWARZ, G. **“A Clothoid Based Real-Time Interpolation Concept for Path Smoothing** “3rd International Conference on Control, Automation and Robotics ,2017.

A. SCHEUER, TH. FRAICHARD, **“Continuous- Curvature Path Planning for Car-like Vehicles”** IEEE- RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems September 7-11,1997, Grenoble(FR).

ALEXS S.; THIERRY F. **“Continuos-Curvature Path Planning for Car-Like Vehicles** Inria*” Rhone-Alpes δ Gravir Zirst, France 1997.

BERGERMAN M., SINGH S., HAMMER B., **"Results with autonomous vehicles operating in specialty crops,"** *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, 2012, pp. 1829-1835. doi: 10.1109/ICRA.2012.6225150.

BAQUERO A.E, GUERRERO, H.B., BARRERO J.F., TIBERTI, A.J., PEREZ A.J, BECKER, M., MAGALHANES D.V. and RISARD J.C., 2014, **“Mobile robot prototype used to the study of trajetactory control strategies and auto-localization”**, CONEM, Uberlândia – MG, Brazil

BORRERO, H. G.; BECKER, M.; ARCHILA, J. F.; BONITO, R. **“Fuzzy control strategy for the adjustment of the front steering angle of a 4WSD agricultural mobile robot.”** Pages 1-6of: Computing Congress, 2. 012. CCC 2012. 7th Colombian. Doi: 10.1109/ColombianCC.2012.6398024.

CLAYTON, J. T.; JOHN F. A.; MÁRIO, L. T.; BECKER, M.; TIBERTI, A. J. **“kinematic study of an agricultural robotic platform”** *“Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada – Volumen 2 – número 22 -2013.*

DMITRI D.; SEBASTIAN T. **“Path Planning for Autonomous Vehicles in Unknown Semi-Structured Environments”** *“The International of Robotics Research, january 2010.*

DONG H. S.; SNAJIV S. **“Path Generation for Robot Vehicles Using Composite Clothoid Segments.”** The Robotics Instintute Carnegie-Mellon University Pittysburg, Pennsylvania 15213, December 1990.

GOODWIN G.C. and SIN K.S. **“Adaptive Filtering Prediction and Control”**, University of Newcastle, New South Wales, Australia Ed. Prentice-Hall, INC. 1984.

GUOYU Z.; PENG Z.; JUNFEI Q; **“Path Planning Algorithm Based on Sub-Region for Agricultural Robot”** 2nd Internacioal Asia Conference on Informatics and Control, Automation and Robotics, Beijing 2010

J.A. REEDS; L.A. SHEEP. **“Optimal paths for a car that goes both fowards and backwards”** Pacific journal of Matematics, 1990

JAZAR, R. N. **“Vehicle Dynamics Theory and Application.”** New York: Springer. 2008. ISBN 9780387742434.

JURATE V.; VIRGAUDAS P. **“Design of Road Basead on the Applicable Design Methods used in Western European Countries”** Vilnus Gediminas Techincal University Lithuania maio 2014.

KLASER, R. L. **“Navegação de veículos autônomos em ambientes externos não estruturados baseada em visão computacional”**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

KOH K.C. AND CHO H.S. **“Path Tracking Control System for Autonomous MobileRobots: An Experimental Investigation, Mechatronics”** Vol.4. pp 799-820, korea, Elsevier Science Ltd, 1994

KUO, B. C. **“Sistemas de control automático”**. Pearson Education, 1996. ISBN 9688807230.

MARCO, F.; BERTOLAZZI, E.; BIRAL, F.; FONTANELLI, D.; POLOPOLI, L. **“Semi-Analytical Minimum Time Solutions for a Vehicle Following Clothoid – Based Trajectory Subject to Velocity Constraints”** European Control Conference (ECC) Aalborg, Denmark July 1 ,2016

MUHAMMAD Z. A., HAIRI Z., SAIFUL A.M. SHEIK M. HAFIZ F. Z. **“Vehicle Path Tracking Using Future Prediction Steering Control,”** International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, 2012

N. OUADAH, L. OURAK, and F. BOUDJEMA, **“Car-like mobile robot-oriented positioning by fuzzy controllers,”** International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 5, no. 3, pp. 249–256, 2008.

NIKOLAOS E., GEORGIOS K., **“A new, simple and accurate transition curve typo, for use in road and railway alignment design”** European Transport. Res. Europe, September 2013

LIMA F. P; MARCO, T.; JONAS, M.; BO, W.; **“Clotoid-Based Model Predictive Control for Autonomous Driving”** European Control Conference, linz, Austria, july 2015.

LIMA P. F. **“Predictive control for autonomous driving”** KTH Royal Institute of Technology School of Eletrical Engineering Departament of Automatic Control Swedew, May 2016.

RAFAEL V. S. **Robô Agrícola Móvel(RAM): Uma arquitetura baseada em comportamentos hierárquicos e difusos para sistemas autonômos de guiadem e navegação.**p.211 Dissertação (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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

RENA N. JAZAR **Vehicle Dynamics Theory and Application** Springer, 2 ed, New York 2014.

LEE S., **“Virtual trajectory in tracking control of mobile robots,”** Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), no. Aim, pp. 35–39, 2003.

SCHUER, A. e FRAICHARD, T. (1997). **Continuous-Curvature Path Planning for Car-Like Vehicles.** In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IOS), volume 2, pp. 997–1003, Grenoble, France.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSH, I. **Introduction to Autonomous Mobile Robots.** MIT Press, 2004.

TABILE, R. G, PEREIRA E., Tangerino R., G. Porto, A. Inamasu, R. (2011) “**Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot**”, Eng. Agríc., Jaboticabal, v.31, n.1, p.130-142, jan. /fev.

TIJMEN B.; KEES V. A.; JAN B.; JOACHIM M. GRTTIY V. S. “**A path algorithm for mobile robots**” Auton Robots, April 2010.

UTSTUMO, T., BERGE, T. W., & GRAVDAHL, J. T. (2015, March).” **Non-linear model predictive control for constrained robot navigation in row crops**”. In *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 357-362). IEEE.

VÁZQUEZ-MÉNDEZ M. E.; CASAL G. U. “**The clothoid Computation: A Simple and Eficiente Numerical Algorithm**” Journal of Surveying Engineering, agosto 2016.

VELASQUEZ, A. E. B.; HIGUTI, V.A.H.; GUERRERO, H.B.; MILORI, D. M.; MAGALHÃES D. V.; BECKER, M.; “**Helvis – A Small-Scale agricultural mobile robot prototype for Precision Agriculture**” - 13th International Conference on precision agriculture, july 31, 2016

WOLF, D. F.; OSÓRIO, F. S., SIMÕES, E.; TRINDADE JR., O.; “**Intelligent Robotics: From Simulation to Real World Applications**” Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2009.

Y. KANAYAMA and Y. KIMURA, “**A stable tracking control method for an autonomous mobile robot,**” Robotics and Automation, 1990, vol. 1, pp. 384–389, 1990.