



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS

DAS

Desenvolvimento e Implementação de Algoritmo de Controle de Seguimento de Trajetórias Georreferenciadas para Máquinas Agrícolas

TIAGO ALENCAR GONÇALVES

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação na disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Florianópolis, março de 2015

Desenvolvimento e Implementação de Algoritmo de Controle de Seguimento de Trajetórias Georreferenciadas para Máquinas Agrícolas

Tiago Alencar Gonçalves

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina

DAS5511: Projeto de Fim de Curso

e aprovado na sua forma final pelo

Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. *Rodolfo César Costa Flesch*

Assinatura do orientador

Banca Examinadora:

Geovany Voi Filho
Orientador na Empresa

Prof. Rodolfo César Costa Flesch
Orientador no Curso

Douglas Bertol
Avaliador

Thalles Felipin Rigobello
Fernando Gomes Papi
Debatedores

Agradecimentos

“O autor dedica este espaço para agradecer as pessoas que possibilitaram a experiência deste projeto, que tem sido de grande proveito graças ao aprendizado de novos conceitos e a chance de aplicar, na prática parte do conhecimento visto ao longo da graduação.

O estagiário agradece a Hexagon Agriculture, que possibilitou esta oportunidade única de crescimento profissional. Agradece ao engenheiro Luiz Raupp, pela orientação, paciência e ensinamentos essenciais para manter o estagiário no caminho correto, ao longo das atividades desenvolvidas.

O estagiário muito agradece e dedica este trabalho ao professor Flesch, sempre muito atencioso, didático, comunicativo e principalmente competente.

Transpassou ensinamentos de temas com escopo além da engenharia de controle e automação, que somar-se-ão ao capital humano do estudante.

Em particular o estagiário agradece seu orientador na empresa, Geovany pelos ensinamentos, orientações, inserção do estudante no mercado de trabalho e principalmente pela confiança depositada ao conceber a oportunidade de mais um projeto, em uma empresa que hoje atinge o mercado internacional, por fruto de muito trabalho.”

Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo

Centro Tecnológico

Departamento de Automação e Sistemas

Desenvolvimento e Implementação de Algoritmo de Controle de Seguimento de Trajetórias Georreferenciadas para Máquinas Agrícolas

por TIAGO ALENCAR GONÇALVES

O projeto foi desenvolvido na Hexagon Agriculture, empresa de tecnologia fornecedora de soluções para planejamento, otimização, gerenciamento e automação de processos agrícolas em todo o mundo, através de tecnologias da informação inovadoras e sustentáveis. Com o foco em fornecer soluções eficazes para o aumento da produtividade agrícola, o mercado da agricultura de precisão motivou a Hexagon Agriculture a desenvolver um assistente de orientação do direcionamento para todos os tipos de máquinas agrícolas que atuasse diretamente no volante ou barra de direção, posicionando-as no lugar correto independentemente da prática do operador. Este trabalho apresenta as etapas e os resultados do desenvolvimento de um algoritmo de controle de seguimento de trajetórias georreferenciadas para qualquer tipo de máquina agrícola, garantindo alta precisão na orientação do direcionamento entre passadas, não deixando falhas ou gerando sobreposições, independentemente do tipo de terreno. O algoritmo de controle proposto apresenta duas vantagens principais em relação ao piloto automático comercializado pela Hexagon Agriculture: abrangência de aplicações, eliminando a necessidade de uma técnica para cada tipo de veículo agrícola, e a eliminação da necessidade de sensores de leitura do posicionamento da roda. No escopo deste trabalho, o algoritmo foi desenvolvido, implementado e validado nas condições mais adversas presentes nas aplicações agrícolas, resultando em um produto que além de apresentar melhores resultados em campo, oferece menor custo de instalação e manutenção.

Federal University of Santa Catarina

Abstract

Technological Center

Department of Automation and Systems

Development and Implementation of Trajectories Georeferenced Tracking Algorithm for Agricultural Machinery

by TIAGO ALENCAR GONÇALVES

The project was developed in Hexagon Agriculture, technology supplier of solutions for planning, optimization, management and automation of agricultural processes worldwide through innovative and sustainable information technology. With the focus on providing effective solutions for increasing agricultural productivity, the market for precision agriculture led to Hexagon Agriculture to develop a direction orientation assistant for all kinds of agricultural machinery that would act directly on the steering wheel or steering bar, positioning in place regardless of the practice of the operator. This paper presents the steps and results of the development of a trajectory tracking control algorithm georeferenced for any type of farm machinery, ensuring high accuracy in guiding the direction between past, leaving no gaps or overlaps generating regardless of the type of terrain. The proposed control algorithm has two advantages compared with autopilot marketed by Hexagon Agriculture: scope of applications, eliminating the need for a technique for each type of agricultural vehicle, and eliminating the need for wheel positioning of the reading sensors. In this work, the algorithm was developed, implemented and validated in the most adverse conditions present in agricultural applications, resulting in a product that besides offering better results in the field, offers lower cost of installation and maintenance.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Abreviaturas	ix
Lista de Símbolos	x
1 Introdução	1
1.1 Contextualização do Projeto	1
1.2 Motivação	4
1.3 A Hexagon Agriculture	7
1.4 Objetivos	9
1.5 Contextualização com a Engenharia de Controle e Automação	9
1.6 Estrutura do Relatório	12
2 Fundamentação Teórica	14
2.1 Introdução	14
2.2 Veículos Agrícolas	15
2.2.1 Colhedoras de Cana-de-Açúcar	16
2.2.2 Tratores Com Chassi Articulado	18
2.2.3 ISOBUS	19
2.3 Georreferenciação de Trajetórias	20
2.3.1 Erro de Posicionamento	22
2.3.2 Sinal do Erro de Posicionamento	23
2.3.3 Erro de Orientação da Máquina Agrícola	25
2.4 Sistemas de Navegação Por Satélite	25
2.4.1 Sistema de Posicionamento Global	26
2.4.2 GLONASS	28
2.4.3 Galileo	29
2.4.4 Sistemas de Navegação Regional	30
2.4.5 GPS Diferencial	31
2.4.6 RTK	32
2.5 Sistema de Coordenadas	33
2.5.1 Sistema Fixo de Coordenadas	34
2.5.2 Sistema Móvel de Coordenadas	34
2.5.3 Georreferenciamento de Pontos de Controle	35
2.6 Modelo de Estado de Veículos do Tipo Triciclo	35
2.7 Cinemática das Máquinas Agrícolas	36
2.8 Conclusões	37

3	Instrumentação do Sistema	38
3.1	Sistemas Sensoriais	38
3.1.1	Receptor GPS	39
3.1.2	Sistema de Medição Inercial	39
3.1.3	Fusão Sensorial	40
3.2	Sistemas de Atuação da Direção	41
3.2.1	Motor Elétrico	41
3.3	Plataforma de Simulação	41
3.4	Conclusões	42
4	Controle de Posição e Orientação	43
4.1	Ações de Controle	43
4.1.1	Ação Proporcional	44
4.1.2	Ação Integral	45
4.1.3	Ação do Derivador	46
4.1.4	Controlador PID	46
4.2	Controles Propostos	47
4.3	Sistema de Controle de Posição e Orientação	48
4.3.1	Controle do Erro de Posicionamento	50
4.3.2	Controle do Erro de Orientação	51
4.4	Ganhos	51
4.5	Adaptações Para o Correto Funcionamento Físico	53
4.6	Conclusões	53
5	Resultados	54
5.1	Trajетórias Retas em Plataforma de Simulação	54
5.1.1	Análise pelo SAIG	55
5.1.2	Análise em Matlab	56
5.2	Saídas no Titanium	60
5.3	Análise do Sistema	61
5.4	Trajетórias Além do Escopo do Projeto	62
5.4.1	Circuito Adaptado do Autódromo de Interlagos	62
5.4.2	Circunferências e Retas	64
5.5	Conclusões	66
6	Considerações Finais	67
6.1	Saturações	67
6.2	Algoritmo de Escalonamento de Ganhos	67
6.3	Implementação no Trator de Testes da Empresa	68
6.4	Controle para Trajetórias Curvas	68
6.5	Implementação de Modelo Dinâmico	69
6.6	Considerações Finais	69

Lista de Figuras

1.1	Motor de atuação do Piloto Elétrico, acoplado ao volante	4
1.2	Estrutura de comunicação do Piloto Elétrico	5
1.3	Nova Arvus Tecnologia, Hexagon Agriculture	8
2.1	Ângulos de rotação, giro e inclinação do trator	15
2.2	Colhedora de Cana	16
2.3	Bioimpacto da colhedora de cana	17
2.4	Exemplos de Tratores de Chassi Articulado	19
2.5	Distância entre ponto e reta no plano cartesiano	22
2.6	Área entre três pontos	23
2.7	Erro de orientação de máquinas agrícolas	25
2.8	Informação Orbital sobre GNSS e outros sistemas	26
2.9	Planos orbitais do GPS	28
2.10	Órbitas GLONASS	29
2.11	Órbitas dos Satélites Galileo	30
2.12	Sistema DGPS aplicado a agricultura de precisão	31
2.13	Sistemas de correção do sinal de GPS	33
2.14	Veículo e seu sistema de coordenadas	34
3.1	Plataforma de Simulação do Sistema	42
4.1	Diagrama de blocos da estrutura de controle	48
4.2	Sistema do Projeto	49
5.1	Dados do erro e do yaw, ponto a ponto	55
5.2	Trajetórias realizadas pela máquina agrícola com o algoritmo de controle implementado	56
5.3	Sinal do erro de posição e sinal de controle do PID	57
5.4	Aproximação visual dos sinais de erro de posição e de controle	58
5.5	Demonstração do sinal em regime permanente	58
5.6	Sinal do erro de orientação e sinal de controle do controlador da orientação	59
5.7	Saída do sistema pela saída do controle	59
5.8	Estados de operação do algoritmo de controle, vistos pelo Titanium.	61
5.9	Interlagos	63
5.10	Algoritmo de controle em regime permanente para trajetórias curvas	64
5.11	Trajetórias curvas realizadas pelo sistema de auto-esterçamento.	65
6.1	Algoritmo de controle em operação para velocidades altas	68

Lista de Abreviaturas

DGPS	GPS Diferencial (do inglês <i>Differential Global Positioning System</i>)
GPS	Sistema de Posicionamento Global (do inglês <i>Global Positioning Systems</i>)
GLONASS	Sistema de Posicionamento Global Russo
INS	Sistema de Navegação Inercial (do inglês <i>Inertial Navigation System</i>)
PWM	Modulação por Largura de Pulso (do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>)
CM	Centro de Massa

Lista de Símbolos

V	Velocidade total do veículo	m.s^{-1}
X	Eixo x global	
Y	Eixo y global	
l	Comprimento do eixo longitudinal do trator	m
P	Ação P roportional do Controlador	
I	Ação I ntegral do Controlador	
D	Ação D erivativa do Controlador	
ψ	Ângulo <i>yaw</i> do veículo agrícola na coordenada global	rad
$\dot{\psi}$	Taxa do ângulo <i>yaw</i> do veículo(máquina agrícola) na coordenada global	rad.s^{-1}
δ	Ângulo da roda dianteira do trator	rad
ω	Taxa de variação do ângulo <i>yaw</i>	

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização do Projeto

Quando veículos podem operar sem intervenção humana, de forma totalmente automatizada, são considerados veículos autônomo [1]. Uma vez iniciada a operação de um veículo desse tipo, ele executa tarefas de modo autônomo, sendo capaz de dirigir e reagir ao meio sem controle externo [2]. Esses veículos, possuem, portanto, como características fundamentais, as capacidades de locomoção e de operação de modo semi ou completamente autônoma, robustez (capacidade de lidar com as mais diversas situações) e inteligência (de modo a resolver e executar tarefas por mais complexas que sejam).

Os veículos devem ser dotados de atuadores, que serão os responsáveis pela execução de suas ações, como um motor de corrente contínua capaz de girar o volante ou uma válvula hidráulica atuando na barra de direção. No entanto, para que possa realizar tais ações, um veículo autônomo deve ter a percepção do ambiente ao seu redor e isso é feito através de sensores. Um dos principais dispositivos de sensoramento que vem sendo utilizado junto aos veículos é o GPS (Sistema de Posicionamento Global), que será o principal sensor utilizado neste projeto, sendo dele a variável medida para o algoritmo de controle proposto.

Estudos sobre o GPS surgiram no início de 1960 com o *U.S. Navy's Transit System*, projeto americano pioneiro para o sistema de navegação via satélite. Os americanos lançaram o primeiro satélite experimental em 1961 e o sistema tornou-se operacional em 1964. Esse sistema de posicionamento foi aberto para uso civil em 1967, na época

com precisão de 25 metros e uma atualização da posição corrente a cada 100 minutos [3]. Posteriormente, a Rússia desenvolveu e operou um sistema idêntico, conhecido como Tsikada. Entretanto o desenvolvimento do GPS se consolidou em 1973 [3], quando uma série de programas de navegação por satélite, de uso militar dos Estados Unidos, foram fundidos ao sistema russo. O primeiro satélite protótipo operacional foi lançado em 1978 e em 1993 foi anunciado que o GPS atingiu sua capacidade operacional completa. Embora tenha sido desenvolvido como um sistema militar, o GPS agora é usado para uma ampla gama de aplicações civis, como na agricultura de precisão [3]. Outros sistemas de posicionamento foram surgindo com a corrida tecnológica entre Rússia e Estados Unidos, como o GLONASS, operado pela Rússia e desenvolvido em paralelo com GPS, também como um sistema militar. Um terceiro passo dessa evolução veio com o sistema de navegação por satélite desenvolvido pela União Europeia, o Galileo. Esse sistema de navegação, que é destinado ao uso civil teve lançamento do seu primeiro satélite no final de 2005 e se tornou operacional em meados de 2012. Além disso, sistemas regionais estão sendo desenvolvidos pela China, Índia e Japão. O GPS e o GLONASS estão atualmente passando por grandes programas de modernização [4], tornando tais tecnologias cada vez mais baratas e acessíveis para o uso civil. Um exemplo deste avanço está no uso de satélites GLONASS para complementarem a constelação GPS em situações de baixa visibilidade (próximo de árvores, montanhas, etc.), como pode ser visto nos receptores comercializados no mercado mundial.

Com o surgimento do GPS, estudos [5] nos campos da agricultura, se alavancaram, principalmente na agricultura de precisão¹. Os primeiros usos dessa tecnologia na área agrícola não foram especificamente para agricultura de precisão, mas sim na aviação agrícola, a partir de 1995 [7]. Nessa época, a única maneira de poder utilizar GPS era com alguma forma efetiva e prática de correção diferencial em tempo real. Esse sinal era suprido pelos próprios usuários a partir de estações temporariamente estacionárias, equipadas com rádio transmissor e, em 1997, surgiram os serviços de correção via satélite, com sinal pago [8].

Muitos dispositivos da agricultura de precisão exigem um receptor de GPS com boa

¹O conceito de agricultura de precisão, está associado à utilização de equipamento de alta tecnologia, seja hardware ou software, para avaliar, ou monitorar, as condições numa determinada parcela de terreno, aplicando depois os diversos factores de produção como sementes, fertilizantes, fitofármacos, reguladores de crescimento, água [6].

especificação. Como é o caso da barra de luz², largamente utilizada para direcionamento entre linhas paralelas³, exigindo precisão, e conseqüentemente erros baixos entre essas passadas [8]. Devido à exigências dos produtores, em relação ao erro de orientação nessas linhas, originaram-se os sistemas de auto-esterçamento ou piloto automático, já que tal precisão dificilmente poderia ser alcançada por um operador humano [8].

A precisão do trabalho fornecido pelo piloto automático, o torna mais eficiente e econômico do que com um ser humano, nas atividades que vão desde o preparo do solo a colheita. Com a aproximação automática para a trajetória georreferenciada, o piloto evita o espaçamento irregular no preparo do solo e na adubação, otimizando a área a ser cultivada, gerando também uma melhor organização e um controle criterioso das passadas de máquinas sobre o solo das lavouras, de forma sistemática para minimizar a compactação, concentrando-a em locais que podem depois ser manejados localizadamente.

O sistema de auto-esterçamento do volante (piloto automático) propicia aumento da capacidade de cultivo com o mesmo maquinário em razão do melhor uso das horas trabalhadas do operador. Também tem-se aumento da velocidade alcançada, com manutenção da qualidade, já que o trabalho de orientação não depende mais da habilidade do operador do veículo. Dessa forma, o sistema comanda o alinhamento da trajetória planejada, seja ela uma linha reta, linhas curvas ou pivôs (circulares), sempre compensando a inclinação do terreno, tudo com grau de aproximação maior que o alcançado por um operador humano.

O estagiário de pesquisa e desenvolvimento inciou seu trabalho na empresa diante do desafio de aplicar os conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia de Controle e Automação, para complementar o desenvolvimento e aperfeiçoar o sistema de auto guiamento de máquinas agrícolas, o piloto automático. O meu trabalho na empresa consistiu em desenvolver um produto com no mínimo as mesmas funcionalidades do sistema da Hexagon Agriculture.

²A barra de luz é um equipamento utilizado para a orientação de um veículo em faixas adjacentes, com o propósito de diminuir a sobreposição entre passadas consecutivas e otimizar a eficiência da operação agrícola; ela possui um conjunto de LEDs verdes que se mantêm ligados quando o veículo está mantendo o alinhamento programado ou liga um conjunto de LEDs vermelhos quando o veículo está se afastando do alinhamento programado.

³No site da Arvus Tecnologia, podem-se encontrar algumas especificações, e ilustrações sobre a aplicação barra de luz [9].

1.2 Motivação

Atualmente a Hexagon Agriculture possui duas versões do piloto automático para máquinas agrícolas, que diferem basicamente no modo de atuação da direção.

Uma versão é a do Piloto Elétrico, que têm o modo de atuação um motor elétrico de corrente contínua diretamente acoplada ao volante do veículo, como mostrado na figura 1.1, sendo a posição das rodas obtidas através da leitura de um encoder. Já no Piloto Hidráulico, uma válvula hidráulica é diretamente conectada ao cilindro de direção do veículo, sendo a responsável pela atuação no sistema.



FIGURA 1.1: Motor de atuação do Piloto Elétrico

Um sensor (rotativo e absoluto) é instalado em uma das rodas do veículo para obtenção de sua angulação. O controlador (placa com sistema embarcado) deve então realizar a leitura do sensor de posição das rodas, e calcular a lei de controle em tempo hábil, enviando o sinal de comando para os atuadores.

A seguir, podemos ver no esquema (Figura 1.2), o funcionamento do sistema da Hexagon Agriculture, com o Titanium⁴ e Piloto Elétrico:

1. o Titanium (computador de bordo) é colocado na cabine do trator e conectado ao driver (placa com sistema embarcado) e o motor elétrico;
2. driver é instalado no veículo e motor acoplado ao volante;

⁴O Titanium, é um computador de bordo desenvolvido pela empresa, com diversas funcionalidades, como encontradas em [10]

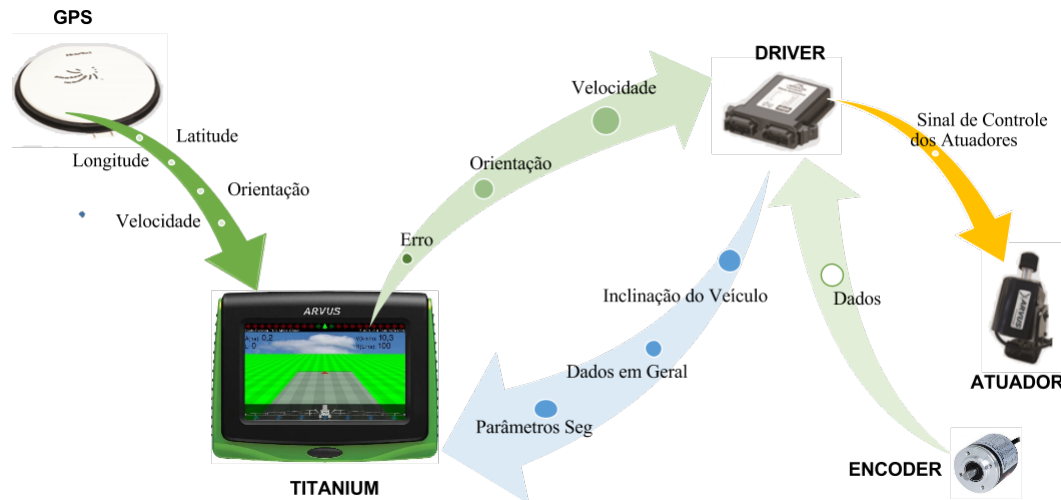


FIGURA 1.2: Estrutura de comunicação do Piloto Elétrico

3. durante a operação, o computador de bordo recebe sinais de GPS constantemente e realiza o georreferenciamento⁵ da posição e calcula a velocidade;
4. a cada sinal recebido, o sistema realiza diversos cálculos e envia ao driver comandos para controlar o motor, pilotando o trator;
5. refazendo esses passos constantemente, controla-se o veículo sobre o trajeto pré-definido;
6. após a aplicação, o mapa pode ser enviado ao computador para visualização das áreas e análise dos mapas gerados.

Para ambos os modelos a posição absoluta do veículo é obtida via receptores GPS instalados sobre a cabine (ou na área mais elevada e livre de obstáculos), enviando continuamente as informações de localização geográfica (latitude e longitude), orientação em relação ao norte geográfico da Terra e a velocidade do veículo, para o computador de bordo Titanium instalado no interior da cabine do veículo. Será a partir dessas informações que o algoritmo de controle enviará informações aos atuadores da máquina agrícola.

⁵Georreferenciamento ou georreferenciação de uma informação geográfica é tornar suas coordenadas conhecidas num dado sistema de referência. Este processo inicia-se com a obtenção das coordenadas (pertencentes ao sistema de trajetórias no qual se pretende georreferenciar) a serem georreferenciadas, conhecidos como pontos de controle. Os pontos de controle são locais que oferecem uma feição física perfeitamente identificável, tais como intersecções de estradas e de rios, pistas de aeroportos, guias para plantio ou colheita, topos de montanha, perímetro de uma área rural, entre outras. A obtenção das coordenadas dos pontos de controle deve ser realizada em campo pelo GPS, ou mapas digitais georreferenciados.

O piloto automático da empresa pode ser combinando com Monitor de Plantio, Corte de Seção e Taxa Variável no mesmo Computador de Bordo, gerando maior precisão, economia, desempenho e controle total em um mesmo equipamento. Os pilotos oferecem grande eficiência nas atividades de trabalho em linha reta, curva repetitiva, curva adaptativa e pivô central, funções essas já implementadas no sistema de monitoramento da Hexagon Agriculture.

O piloto automático da Hexagon Agriculture, atualmente encontra-se em uma posição confortável no mercado brasileiro, consolidado com seus clientes, frutos de uma equipe dedicada, e sempre apta em atender as necessidades requisitadas pelos clientes, nas soluções fornecidas pela empresa. Contudo, o piloto automático desenvolvido e implementado se trata de um controle baseado no modelo de um veículo do tipo triciclo [11], deixando restrições quanto aos tipos de máquinas agrícolas em que o produto pode operar corretamente, como os veículos movidos por esteiras e os tratores de chassi articulados. Desenvolver uma lei de controle específica para cada modelo de veículo disponível no mercado nacional e internacional torna-se inviável economicamente, além de ser inviável do ponto de vista temporal. Sendo assim, surgiu o escopo de projeto de desenvolver um algoritmo de controle universal baseado no controle do ângulo de giro (do inglês *yaw*) que atua como variável de curvatura no atuador do piloto automático (controles e atuação serão detalhados nos capítulos 3, 4 e 5).

Um segundo motivo para o desenvolvimento deste algoritmo de controle se estende no plantio da cana-de-açúcar, para as máquinas colhedoras de cana dotadas de esteiras, que impossibilitam a instalação de encoders e outros tipos de sensores para leitura do giro da roda, necessários para percepção da trajetória georreferenciada. Outro problema relacionado aos encoders, é que nesse tipo de plantação, ele é facilmente destruído pela cana no momento em que a colhedora está em operação. Portanto, a empresa diante destes dois problemas com o encoder, propôs a retirada do mesmo nesses veículos, e compensar a falta de informações do encoder, com um controle mais robusto e genérico, ou seja, um algoritmo de controle que seria capaz de manter precisamente o veículo na trajetória georreferenciada, sem o uso do encoder, e usando somente as medidas de posição do GPS.

Por fim, as demandas e realidade de mercado, principalmente europeu, estão acompanhando a tendência de controle de máquinas agrícolas pelo padrão ISOBUS (padronização de comunicação entre tratores e implementos agrícolas). As máquinas agrícolas estão saindo de fábrica com essa tecnologia, o que as dota de estrutura para receber o piloto automático, bastando enviar, via CAN, uma referência de curvatura para a válvula que controla o fluxo de óleo para o sistema de esterçamento da máquina.

O objetivo deste projeto para a Hexagon Agriculture consiste em aumentar seu campo de clientes, atingindo os produtores que possuem máquinas agrícolas de qualquer tipo. Isso será alcançado com uma solução que complemente o produto Piloto Automático (hidráulico e elétrico) atual, o tornando mais robusto, menos custoso, e com maior praticidade para montagem devido ao menor número de cabos, sensores e conexões, reduzindo os custos e tempos de manutenção.

1.3 A Hexagon Agriculture

A Hexagon Agriculture (antiga Arvus Tecnologia SA) é a única empresa nacional fabricante de equipamentos para agricultura e silvicultura de precisão. Está sediada no Polo Tecnológico de Florianópolis, onde possui mão de obra qualificada, acesso aos mais modernos recursos tecnológicos e interage com as demais empresas e instituições do Polo.

A antiga Arvus Tecnologia foi fundada em 2004, visando atender, com tecnologia nacional e adaptada a produtores brasileiros, a atender o mercado brasileiro de agricultura de precisão. No início fez parceria com grandes produtores agrícolas de Goiás e teve o apoio da Universidade Federal de Santa Catarina [12].

Em dezembro de 2004, apoiada pelo SEBRAE-SC e ACATE (Associação Catarinense de Empresas de Tecnologia) instalou-se na incubadora de empresas de base tecnológica, o MIDI Tecnológico, em Florianópolis.

Em outubro de 2005, iniciou um projeto de desenvolvimento de Sistema de Adubação de Precisão para aplicação em silvicultura junto com a Votorantim Celulose e Papel no Rio Grande do Sul. O sistema compreendia a automação de máquinas e desenvolvimento de software de suporte, até mesmo para o planejamento e controle de estoques de adubos.

A partir de 2006, a empresa iniciou processos de parcerias comerciais no mercado agrícola do país. Os clientes são dedicados à produção de arroz, soja, milho, feijão, algodão, dentre outros [13].

A Hexagon Agriculture possui parceiros nas principais fronteiras agrícolas do Brasil. Destaca-se pela assistência técnica personalizada e no efetivo resultado para os clientes. Tem portfólio de produtos desenvolvidos especificamente para o mercado nacional – equipamentos e softwares para agricultura de precisão. A empresa atua tanto na venda direta desses equipamentos, quanto na prestação de serviços, sendo pioneira nesta modalidade [12].

Atualmente a Hexagon AB, empresa líder mundial no fornecimento de sistemas de metrologia, design e soluções de visualização, anunciou a aquisição da Arvus Tecnologia. A aquisição é um passo estratégico fundamental no desenvolvimento das soluções de *Smart Agriculture* da empresa europeia. A Arvus promoverá a expansão das ações atuais da Hexagon AB em agricultura, complementando as suas soluções mundiais de geoprocessamento e controle de máquinas. As tecnologias e *know-how* de cada empresa poderão ser integradas para a criação de soluções de competitividade únicas no mercado mundial [14].

Em fevereiro de 2015, a Arvus Tecnologia, a Leica Agriculture⁶ e a iLab⁷, foram fundidas pela multinacional Hexagon, gerando a Hexagon Agriculture.



FIGURA 1.3: Nova Arvus Tecnologia, Hexagon Agriculture

⁶ Leica Geosystem é uma empresa fornecedora de equipamentos e softwares relativos a todas as áreas da Geomensura, variando de sensores aéreos para fotogrametria até sensores hidráulicos para controle de máquinas para construção civil e agricultura, além dos equipamentos convencionais de agrimensura e geodésia.

⁷A iLab Sistemas Especialistas é uma empresa dedicada ao desenvolvimento e implantação de sistemas de apoio à tomada de decisão, utilizando técnicas e ferramentas de otimização para resolução de problemas complexos de planejamento e alocação de recursos.

1.4 Objetivos

Com base em pesquisas realizadas junto a clientes, fornecedores e concorrentes, a equipe da Hexagon Agriculture chegou ao seguinte conjunto de especificações que devem ser atendidas, dentro do possível, em sua totalidade, para o sucesso do produto:

1. ser capaz de seguir qualquer tipo de trajetória georreferenciada existentes no ambiente agrícola (retas, curvas, curvas adaptativas, pivô) com erro inferior a cinco centímetros;
2. operar nas faixas de velocidades compreendidas entre 3 km/h e 28 km/h;
3. tempo de aproximação à guia georreferenciada inferior a 10 segundos, com sobrepassagem nula;
4. zelar pela segurança do condutor;
5. ser robusto, sendo capaz de operar nos mais variados modelos de máquinas agrícolas e em qualquer tipo de solo (planos e acidentados);
6. fácil instalação e manutenção.

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um algoritmo de controle que possa funcionar em qualquer máquina agrícola, levando-as de maneira rápida e segura para a correta trajetória georreferenciada, com erro inferior a cinco centímetros.

1.5 Contextualização com a Engenharia de Controle e Automação

Para a realização do projeto proposto, a contextualização do tema com o curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina foi feita através da integração dos conceitos adquiridos durante toda a graduação. Devido aos ensinamentos dos professores do curso, as diretrizes para a pesquisa, o correto desenvolvimento e a implementação de todo o sistema, pôde ser concretizado de forma satisfatória em uma empresa que se encontra em crescimento e oferecendo a oportunidade da prática

dos conhecimentos adquiridos durante a graduação. As disciplinas do curso podem ser categorizadas em cinco módulos:

1. para a modelagem do sistema de geração de trajetórias serão necessários os conhecimentos adquiridos na disciplina de **FSC 5101 - Física I** para os conceitos fundamentais da cinemática e dinâmica de um corpo. Já para o entendimento das matrizes, determinantes, sistemas lineares, retas e planos no espaço vieram da disciplina **MTM 5512 - Geometria Analítica**;
2. para a criação do algoritmo de controle do sistema, todas as disciplinas da área foram necessárias, cada uma com sua parcela significativa como em **DAS 5112 - Sinais e Sistemas Lineares I** que se fará necessário para o estudo dos sinais no domínio do tempo, introdução de modelos matemáticos de sistema dinâmicos, e por fim os conceitos de resposta transitória e permanente. As disciplinas **DAS 5131 - Controle Multivariável** e **DAS 5141 - Sistemas Não-Lineares** serão necessárias para a correta modelagem do problema. **DAS 5101 - Processos em Engenharia** será necessária para modelagem por blocos, juntamente com as noções de malha aberta e malha fechada de um sistema. **DAS 5113 - Sinais e Sistemas Lineares II** terá participação no entendimento da resposta no tempo e a importância do Matlab como ferramenta de análise de sistemas. Para o estudo de possíveis algoritmos de controle utilizados na solução, bem como análise de sua robustez e conformidade com as especificações a disciplina **DAS 5121 - Sistemas Realimentados** será necessária, e nela também será visto os tipos de sistemas e seus comportamentos em malha fechada, através de diagramas de blocos. A maior importância da disciplina se dá no projeto de controladores de estrutura fixa, como o PID para estabilização do sistema de maneira precisa, e respeitando critérios de desempenho;
3. para o entendimento de lógicas de programação e de protocolos de comunicação as disciplinas de **DAS 5102 - Fundamentos da Estrutura da Informação Introdução**, **DAS 5305 - Informática Industrial I** e **DAS 5314 - Redes de Computadores para Automação Industrial** serão aplicadas na linguagem de programação C, e os princípios gerais de concepção de um programa de computador. Dentre as disciplinas de TI, a **DAS 5306 - Informática Industrial II** será

de alta importância devido a programação concorrente de sistemas operacionais com requisitos de tempo real;

4. em linhas de conhecimentos gerais a disciplina de **MTM 5161 - Cálculo A** fornecerá os conhecimentos sobre limite, derivada, aplicações da derivada e integral definida para o projeto dos controladores. Em **EEL 5191 - Acionamentos Elétricos para Automação** serão usadas as noções de especificação do motor de corrente contínua. Uma disciplina que não afeta de forma direta no trabalho mas sim na convivência de forma segura no ambiente empresarial é a **DAS 5401 - Aspectos de Segurança em Sistemas de Controle e Automação** com as normas de segurança e principalmente na prevenção de acidentes;
5. entretanto as disciplinas precisam da integração entre elas, pois seria impossível a realização do projeto sem essa fusão de conhecimentos, e para isso três disciplinas serão essenciais, sendo a **EMC5251 - Introdução à Robótica Industrial** para o entendimento de sistemas autônomos, cinemática, geração de trajetórias para robôs, controle de robôs, sensores e por fim as aplicações de robôs móveis. A disciplina **DAS5151 - Instrumentação em Controle** será importante para os aspectos dinâmicos da medição, para aplicação no sistema de controle através de sensores e atuadores e a aquisição de dados. Nesta disciplina também foi reforçado os conceitos dos tipos de controladores, que serão necessários na implementação do algoritmo de controle.

A disciplina **DAS 5501 - Estágio em Controle e Automação Industrial** foi teve sua importância devido a introdução para o tema que será abordado neste trabalho e também a integração do estagiário com a empresa, já que nela foi realizado o projeto (modelagem dinâmica de máquinas agrícolas) da disciplina. E a disciplina também trará conhecimentos de como funciona o produto, e da modelagem de veículos.

Nesta seção ficou claro o quanto foi enriquecedor todo o período da graduação para o capital humano do estudante Tiago Alencar Gonçalves.

1.6 Estrutura do Relatório

O presente documento, requisito para aprovação na disciplina DAS 5511 oferecida pelo Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina, está organizado como segue:

- capítulo 2: esse capítulo descreverá a base teórica do sistema do piloto automático e as suas aplicações. Nele será introduzido os conceitos de máquinas agrícolas, o planejamento de trajetórias e os tipos de sistemas de coordenadas para a correta georreferenciação dos pontos de controle com foco na correta orientação do veículo. Na seção 2.2 serão expostos os dois principais tipos de veículos agrícolas nos quais, o algoritmo de controle (que será proposto no capítulo 4) terá a função de controlar na trajetória georreferenciada que será descrita na seção 2.3. O veículo agrícola e os dados de posicionamento não estão no mesmo sistema de coordenadas como será descrito na seção 2.5, e por isso será necessário um georreferenciamento de coordenadas descrito na mesma seção. Será demonstrado as principais características dos sistemas de navegação e os receptores usados na agricultura de precisão. Por fim, na seção 2.7 será apresentado o modelo cinemático do veículo para máquinas agrícolas dotadas de esteira ou de rodas;
- capítulo 3: o capítulo tratará do sistema de sensoriamento e de atuação. Também será feita uma breve introdução dos sensores que complementam os sinais dos sistemas de navegação, o sistema de navegação inercial (INS). Será exposto a atuação na direção para os veículos agrícolas, para que possam seguir de forma precisa e correta as trajetórias geradas pelo sistema de seguimento de trajetórias;
- capítulo 4: o capítulo tratará das estruturas de controle propostas e as realizadas. Nesse capítulo será explicada as metodologias utilizadas para os ajustes dos parâmetros do controlador, e os demais utilizados no sistema. Também será mostrado o funcionamento do sistema com o algoritmo de controle;
- capítulo 5: análise dos resultados obtidos no desenvolvimento do projeto, com ênfase em trajetórias georreferenciadas de linha reta. Serão explicadas as saídas do controle e o do sinal do erro, para os dois controladores propostos no capítulo 4. Nesse capítulo também serão apresentados resultados obtidos para diferentes tipos de trajetórias que não foram escopo do projeto;

- capítulo 6: serão comentadas as perspectivas futuras para o projeto.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Pesquisas nos campos da robótica, sistemas autônomos e semi-autônomos, voltadas a aplicações agrícolas, se tornaram uma tendência nos últimos anos. A multidisciplinaridade que atualmente envolve esse tópico gera a necessidade da discussão do seu processo de desenvolvimento e implementação, a fim de se compreender as necessidades do sistema como um todo. Por isso o presente capítulo descreverá a base teórica do sistema do piloto automático e as suas aplicações. Este capítulo revisa os conceitos de máquinas agrícolas, o planejamento de trajetórias e os tipos de sistemas de coordenadas para a correta georreferenciação dos pontos de controle com foco na correta orientação do veículo. Na seção 2.2 serão expostos os dois principais tipos de veículos agrícolas nos quais, esse algoritmo de controle (que será proposto no capítulo 4) terá a função de controlar na trajetória georreferenciada que será descrito na seção 2.3. O veículo agrícola e os dados de posicionamento não estão no mesmo sistema de coordenadas como será descrito na seção 2.5, e por isso será necessário um georreferenciamento de coordenadas descrito na mesma seção. Por fim, na seção 2.7 será apresentado o modelo cinemático do veículo para máquinas agrícolas dotadas de esteira ou de rodas.

2.1 Introdução

Antes de iniciar o estudo sobre robótica agrícola, é necessário entender como a automação de sistemas e o uso de tecnologia de informação está presente nesse setor. Basicamente, pode-se dizer que estes tópicos, assim como uma série de outros, contribuem para formar

o sistema de manejo conhecido como agricultura de precisão. Esta deve ser vista como um conjunto de tecnologias e procedimentos utilizados para que o sistema de produção agrícola seja otimizado, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade da produção e de fatores relacionados a ela [5].

Devido ao processo contínuo de evolução das áreas que englobam a tecnologia da informação, tais como, microeletrônica, sensores, computadores e telecomunicações, o avanço da tecnologia é constante e novas ferramentas continuam a ser desenvolvidas e testadas. Assim sendo, a dinâmica deste processo possibilita que, uma determinada prática ou tecnologia que era inviável tecnicamente ou economicamente torne-se viável com o resultado de pesquisa e desenvolvimento de áreas não agrícolas, como o GPS e a fusão de sensores de navegação inerciais da indústria aeroespacial [3], [15].

No transcorrer deste capítulo, muito será abordado sobre o ângulo de giro em torno do eixo z , do veículo agrícola. Este ângulo é a variável de maior interesse para orientação das máquinas agrícolas (e também será no controle que será proposto) e é usualmente conhecido como *yaw* ou *heading*, sendo representado pela letra grega ψ (*psi*).

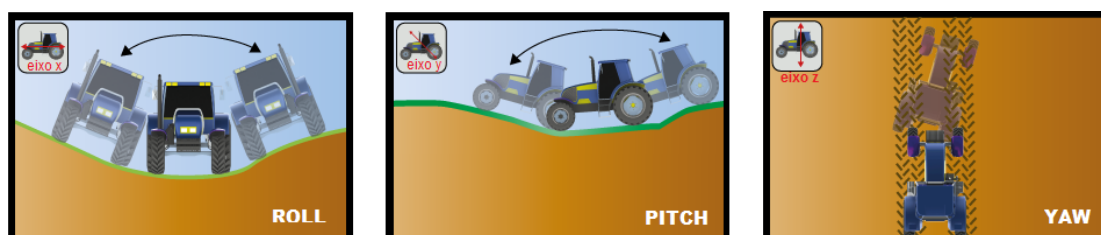


FIGURA 2.1: Ângulos de rotação, giro e inclinação do trator

Na figura 2.1 o ângulo de giro *yaw* é demonstrado no quadro mais á direita, assim como os outros dois ângulos base para saber a inclinação do veículo. O *roll* (quadro mais á esquerda) é o ângulo em torno do eixo horizontal, na direção do eixo logitudinal. E o *pitch* é o movimento em torno do eixo horizontal (quadro central da figura 2.1), perpendicular ao eixo longitudinal, onde o veículo fica com sua frente apontado para baixo ou para cima.

2.2 Veículos Agrícolas

Nesta seção será feita uma breve introdução dos dois tipos de máquinas agrícolas, que receberão maior foco da aplicação do controle que será proposto no capítulo 4, devido

a ambos serem o pior caso para controle. Uma breve introdução sobre ISOBUS, a tecnologia cada vez mais presente nas máquinas agrícolas de grande porte. A ISOBUS, provavelmente, substituirá o navegador de bordo da empresa (Titanium), pois os grandes fabricantes de equipamentos agrícolas, como as da John Deere, Case e New Holland, já estão fornecendo a tecnologia de navegação, juntamente com suas máquinas, no intuito de abranger, uma fatia de mercado em que não atuavam. Um veículo dotado desse computador de bordo, terá disponível entradas para conectar (de forma *plug and play*) um driver de piloto automático que deverá ser compatível com o sistema já presente nas máquinas.

2.2.1 Colhedoras de Cana-de-Açúcar

Locomoção baseada em esteiras oferecem uma grande área de contato com o solo, que gera menos compactação do mesmo, e também melhor tração em relação a veículos com rodas,

A fim de facilitar o entendimento do leitor, na figura 2.2 é mostrado um exemplo de veículo dotado de esteira, a colhedora de cana. Esta máquina agrícola de grande importância para produtores de cana, além de compactar menos o solo, se locomove em terrenos planos, acidentados, entre outros, como citado em [16]. Também possui integração com sistema de piloto automático e ferramentas de monitoramento para colheita.



FIGURA 2.2: Colhedora de Cana-de-Açúcar John Deere 3520; Fonte: John Deere

A colhedora de cana-de-açúcar, possui muitas vantagens para os produtores de cana-de-açúcar:

- colhe a cana crua, pica e carrega;
- substitui mais de cem homens facilmente;
- trabalha vinte e quatro horas por dia;
- crescimento estrondoso de vendas;
- fácil compra, devido a financiamento pelo Programa de Sustentação do Investimento (PSI), do BNDES.

Dentre as vantagens citadas, existe uma em especial no que se destaca a vantagem da automação, principalmente nas lavouras, o fim do corte manual da cana e extinção das queimadas, práticas com péssimas condições de trabalho. Uma pequena ilustração desta impactante mudança pode ser vista na figura 2.3.



FIGURA 2.3: Bioimpacto da colhedora de cana [17]

Um problema das cortadoras-de-cana para os produtores é que ela destrói as soqueiras¹, devido ao corte da cana ser muito alto, deixando no terreno a parte da planta que contém maior teor de açúcar e causando problemas à nova soqueira. A solução para este problema com as máquinas, seria aumentar em 10% a área de plantio para ter a mesma produtividade, em relação à colheita feita por humanos [18].

A perda de produtividade com o uso das máquinas colhedoras é rechaçada pela indústria e também pelas usinas altamente mecanizadas. Especialistas dizem que, com a colheita mecanizada adequada, usando as novas tecnologias e profissionais bem treinados, não há destruição de soqueiras ou perda de produtividade. Muitos produtores

¹Raízes e brotações que sobram após o corte da cana

usam linhas de cana georreferenciadas (as coordenadas são obtidas por GPS) no plantio de novos canaviais e máquinas com piloto automático para manter a produtividade, de forma a preservar as soqueiras e não compactar o solo, e ainda grande economia de combustível.

2.2.2 Tratores Com Chassi Articulado

Tratores tem como função principal servirem de equipamento motor para realização das mais diversas atividades, agrícolas ou não. São basicamente uma combinação perfeita entre motores, transmissões, sistema hidráulico, elétrico/eletrônico, rodas e integração do operador com a máquina.

A estrutura de um trator tem como função oferecer suporte e resistência aos conjuntos da máquina quando esta opera em regimes de esforços de torção e tração, protegendo e possibilitando a sua operação.

Os tratores com o chassi articulado foram desenvolvidos com o objetivo de conseguir aumentar a transferência de potência do trator para o solo. Com um chassi articulado consegue-se empregar pneus de maior diâmetro no eixo dianteiro para aumentar o contato sobre o solo, neste caso, ganha-se maior potência no solo e perde-se em flexibilidade de adequação do trator com os implementos e com a manobrabilidade [19].

Esses tratores permitem que o peso seja melhor distribuído², e permitem igual capacidade de tração nos eixos dianteiro e traseiro, o que aumenta a capacidade total de tração do trator. Como seus rodados são maiores, permitindo mais capacidade de lastro, a potência do motor é otimizada, tornando os tratores mais eficientes.

Na figura 2.4, são demonstrados três exemplos de tratores com chassi-articulado, onde em (a) um trator de chassi articulado sem carga, somente com sua cabine (cavalo), já em (b) pode-se observar a articulação do chassi ao ser acoplado um segundo chassi, ou seja, uma carga a ser puxada auxiliado nas atividades agrícolas, em (c) um trator também articulado, com carga e com acréscimo de rodas. Em (d) um articulado usando seus 620 cavalos de potência com sistema de locomoção por esteiras.

²Quando comparado em relação aos tratores comumente usados na agricultura



(a) Trator de chassi articulado sem carga



(b) Trator de esteira articulado com chassi dobrado



(c) Trator de esteira articulado com 8 rodas



(d) Trator de esteira articulado com sistema de esteira para maior potência e também aderência do solo

FIGURA 2.4: Exemplos de Tratores de Chassi Articulado; Fonte: **New Holland**

2.2.3 ISOBUS

Os grandes fabricantes de máquinas agrícolas em todo o mundo adotaram um protocolo universal, nomeado de ISOBUS, para a comunicação eletrônica entre implementos, tratores e terminais. O objetivo inicial da tecnologia de dados ISOBUS é padronizar a comunicação estabelecida entre máquinas agrícolas e implementos, ao mesmo tempo em que assegura a compatibilidade total de transferência de dados entre sistemas móveis e softwares da fazenda [20]

Para a compatibilidade do sistema, é essencial que o Terminal Universal³ e o implemento sejam capazes de funcionar de forma separada e em conjunto. Para uma maior transparência para o usuário, a *Agricultural Industry Electronics Foundation* (AEF) definiu as Funcionalidades ISOBUS AEF que agora são também a base para a certificação de produtos ISOBUS [21]. Estas funcionalidades foram divididas em:

1. Terminal Universal;

³A opção para operar um dispositivo ISOBUS usando qualquer terminal (UT) ou operar dispositivos diferentes usando um único terminal.

2. ECU do Trator Básico;
3. Controle auxiliar;
4. Controlador de Tarefas – básico (totais);
5. Controlador de Tarefas – baseado em localização geográfica (variáveis);
6. Controlador de Tarefas – Controle de Seção.

Sua base é a norma⁴ internacional ISO 11783: “Tratores e máquinas agrícolas e florestais – Rede serial para controle e comunicação de dados”. A norma ISO 11783 estabelece um padrão de comunicação de dados entre dispositivos eletrônicos em máquinas agrícolas. Atualmente, é o padrão adotado pelos maiores fabricantes de máquinas e implementos agrícolas no mundo.

A AEF oferece informações sobre quais funcionalidades são suportadas por um produto ISOBUS ou uma combinação, incluindo uma certificação independente. Os resultados podem ser encontrados no Banco de Dados ISOBUS AEF, onde os dados de todos os produtos ISOBUS certificados pela AEF estão publicados. Mais Informações também podem ser consultadas no site da AEF em [22].

Esse conceito apresenta vantagens para o usuário final, como por exemplo, a utilização conjunta de equipamentos de diferentes fabricantes para executar uma tarefa no campo. No Brasil, o desenvolvimento de equipamentos padronizados não acompanha o ritmo dos grandes centros desenvolvedores. Há vários motivos para o desinteresse das empresas que desenvolvem tecnologia para a agricultura, entre as principais pode-se citar: a falta de equipamentos para conexão, a complexidade de implementação de rotinas que obedeçam ao padrão ISOBUS e a falta de demanda do mercado por equipamentos padronizados [20].

2.3 Georreferenciação de Trajetórias

Geração de trajetórias georreferenciadas e controle de grandes máquinas em ambientes de campo aberto envolvem, operações em terrenos incertos e dinâmicos, gerando maiores

⁴Essa norma só está disponível para os usuários que adquirem seus módulos. Sendo que cada módulo tem um custo (bem alto), de acordo com sua aplicação

complexidades para o desenvolvimento de tecnologias capazes de suprir todo o processo de sensoriamento, monitoramento, atuação e navegação para essas máquinas.

O planejamento e geração de trajetórias, envolve as dificuldades citadas a cima, pois consiste em conhecer todo o meio em que atua e produzir planos de rota de um ponto para outro de forma correta e precisa. O planejamento de trajetória georreferenciadas (as coordenadas são obtidas por GPS) guiará o veículo agrícola de um ponto ao outro, englobando uma lista de segmentos⁵ de caminhos georreferenciados pré estabelecidos [23].

O planejador de trajetórias passa os dados de um segmento da trajetória a cada instante para um gerador de trajetória, o qual é incumbido de gerar um caminho suave entre a posição atual do veículo e o ponto de destino, sem se afastar da sua linha de destino, como citado nas especificações na seção 1.4.

O objetivo do seguimento de trajetórias georreferenciadas é fazer um algoritmo genérico que faça com que o veículo siga-as de maneira rápida e precisa. Nesse escopo podemos enquadrar o tema deste projeto de fim de curso, que consiste em projetar um algoritmo de controle capaz de realizar a tarefa de posicionamento com maestria.

Como citado em [24], a sintonização desses controladores é uma tarefa árdua e complexa, pois a sua aplicação final (piloto automático) é um sistema não linear e de tempo real. Raffo [24] também cita o desenvolvimento de métodos de controle com objetivo de convergência para uma trajetória georreferenciada. Essa capacidade de manter uma rota pré-determinada é realizada através de relações trigonométricas.

O gerador de trajetória georreferenciadas funciona como um navegador embarcado que continuamente fornece uma referência apropriada dos estados para o controlador, sendo este o encarregado de que o veículo siga a guia, como também pode ser visto em [24].

Nas seções 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3 será abordado como a ciência dos números pode ser relacionada e aplicada para tais realizações.

⁵Este projeto focou nos segmentos do tipo retas, mesmo funcionando em trajetórias curvas.

2.3.1 Erro de Posicionamento

O erro de posicionamento entre um veículo e sua trajetória de destino, pode ser representado por um ponto no sistema de coordenadas e uma reta. O ponto pode representar o veículo agrícola georreferenciado pelo GPS com sua coordenada em latitude e longitude, podendo ser convertida para metros. Já a trajetória é uma reta no sistema georreferenciado, que pode ser representado pela equação geral da reta. Com essas duas considerações, pode-se aplicar um pouco de algebrismo para definirmos o erro entre este ponto e esta reta, ou seja, a distância entre a máquina agrícola e sua guia de referência.

A distância entre um ponto e uma reta é calculada unindo o próprio ponto à reta através de um segmento, que deverá ser perpendicular à essa reta, ou seja, deverá formar um ângulo reto com a reta. Para estabelecer a distância entre os dois necessitamos da equação geral da reta e da coordenada do ponto. A figura 2.5 estabelece a condição gráfica da distância entre o ponto (veículo) e a reta (guia a ser seguida), sendo o segmento "erro" (vide figura 2.5) a distância entre eles.

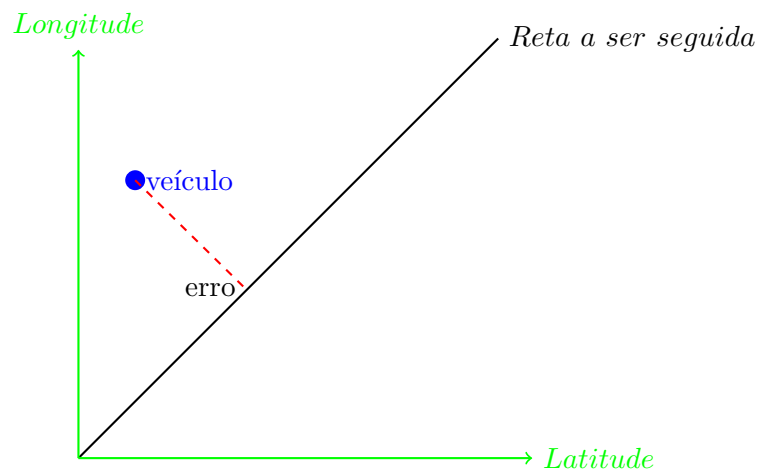


FIGURA 2.5: Distância entre ponto e reta no plano cartesiano

Estabelecendo a equação geral da reta : $ax_0 + by_0 + c = 0$ e a coordenada do ponto (máquina agrícola) $P(x_0, y_0)$, conseguimos concluir a expressão que nos fornece a relação matemática da distância entre o ponto P e a reta. Reescrevendo a equação ponto e reta para nossa aplicação, temos a seguinte expressão:

$$erro = \frac{|ax_i + by_i + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2.1)$$

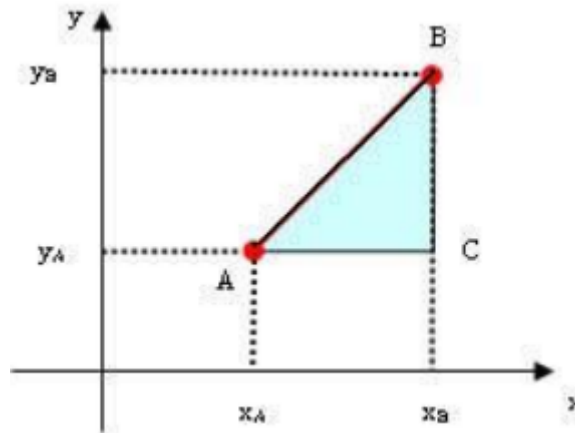


FIGURA 2.6: Área entre três pontos

De maneira que (x_i, y_i) são os pontos gerados pela posição do veículo em campo, fornecidas pelo GPS em latitude e longitude. A reta a ser seguida é gerada por dois pontos escolhidos pelo operador da máquina com o computador de bordo Titanium (Interface desenvolvida pela Hexagon Agriculture e também apresentada na figura 1.2).

Entretanto a distância entre ponto e reta não fornece todas informações necessárias para o algoritmo de controle, pois distância é sempre positiva e o erro para fins de controle deve ser positivo e negativo. Na seção 2.3.2 será tratado como diferenciar se o veículo está a direita da reta (sinal positivo) ou se está à esquerda da guia georreferenciada (sinal negativo).

2.3.2 Sinal do Erro de Posicionamento

Uma aplicação da geometria analítica relacionada com determinantes, está no cálculo da área de um triângulo de três vértices, quando conhecidas as coordenadas de cada vértice. Veja na figura 2.6 esse triângulo, onde os vértices foram denominados de A, B e C.

No caso da geometria plana, sejam (O, \vec{i}, \vec{j}) um sistema ortogonal de coordenadas e $A = (x_A, y_A)$, $B = (x_B, y_B)$ e $C = (x_C, y_C)$ três pontos não colineares. A área do triângulo ABC será dada por:

$$S = \frac{|\vec{AC}| \cdot h}{2} \quad (2.2)$$

Sendo $\overrightarrow{AC} = (x_C - x_A, y_C - y_A)$ e $h = |\overrightarrow{BC}|$ a distância do ponto B ao ponto C, vem:

$$|\overrightarrow{AC}| = \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2} \quad (2.3)$$

e

$$h = |\overrightarrow{BC}| = \frac{\begin{vmatrix} x_A & y_A & 1 \\ x_B & y_B & 1 \\ x_C & y_C & 1 \end{vmatrix}}{\sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2}} \quad (2.4)$$

E agora substituindo 2.3, e 2.4 em 2.2 tem-se a área do triângulo formado por esses três pontos:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} x_A & y_A & 1 \\ x_B & y_B & 1 \\ x_C & y_C & 1 \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

Porém a área entre esses três pontos sempre será positiva, contudo pelo determinante desses três pontos já se tem a informação necessária para a modelagem em questão. O determinante de uma matriz será uma ferramenta fundamental para obter-se o sinal correto do erro do veículo agrícola em relação à linha de referência.

O determinante é uma operação matemática que associa um escalar a uma matriz quadrada qualquer. Para matrizes 2 x 2 o determinante de uma matriz é dado pelo valor numérico resultante da subtração entre o somatório do produto dos termos da diagonal principal e do somatório do produto dos termos da diagonal secundária. Nas matrizes quadradas de ordem 3 x 3 esses cálculos podem ser efetuados repetindo-se a 1ª e a 2ª coluna, aplicando em seguida a regra de Sarrus.

Ao inserirmos na matriz os nossos três pontos de interesse, que são os dois pontos da reta de referência inseridos no Titanium e a coordenada do veículo agrícola naquele instante, obteremos um valor inteiro com um sinal positivo caso o veículo esteja à direita da reta, ou um sinal negativo caso esteja à esquerda da linha de referência.

2.3.3 Erro de Orientação da Máquina Agrícola

O erro de orientação do equipamento agrícola é tratado como sendo a diferença entre o ângulo da reta de referência (no sistema de coordenadas cartesianas) e o ângulo de giro no eixo z (*yaw*) do veículo originado.

Na figura 2.7 são demonstradas duas situações em relação ao erro de orientação, sendo a figura 2.7 (a) com erro entre a guia georreferenciada e a máquina agrícola, já na figura 2.7 (b) o contrário acontece, visto que a posição da máquina agrícola está na orientação desejada.

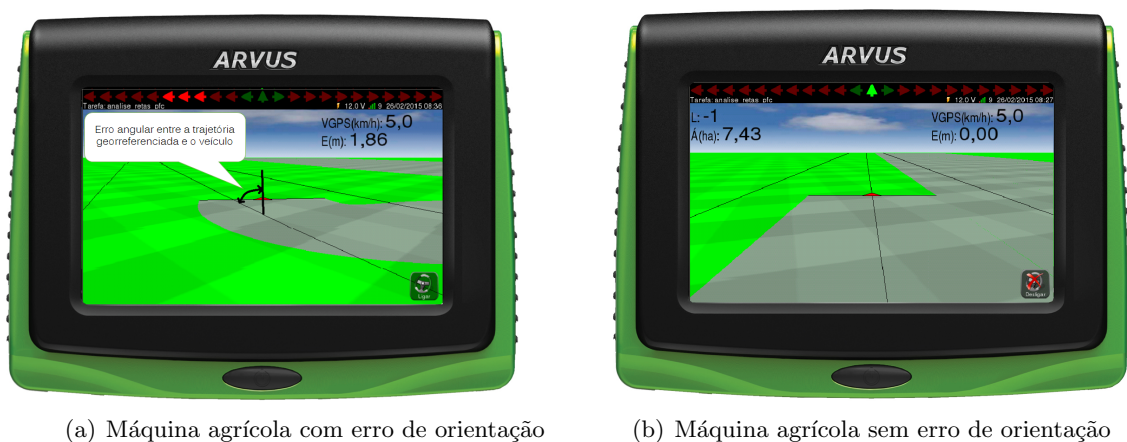


FIGURA 2.7: Erro de orientação de máquinas agrícolas

2.4 Sistemas de Navegação Por Satélite

Sistemas de navegações globais por satélite é um termo coletivo para sistemas que oferecem ao usuário uma solução de posicionamento em três dimensões, usando sinais de rádio transmitidos por uma órbita de satélites. Um número de sistemas com objetivo de fornecer posicionamento geo-espacial em todo o globo.

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) é o termo utilizado para descrever os sistemas de navegação por satélite. O que inclui GPS (EUA), GLONASS (o sistema russo), Beidou (sistema Chinês), e GALILEO (sistema desenvolvido pela União Europeia). Esses sistemas possuem diferentes altitudes e também diferença em seus períodos orbitais. Adicionalmente, eles usam diferentes frequências, contudo todos são L-band (1,3 GHz -1,7 GHz) [15].

O melhor e mais conhecido é o *Navigation by Satellite Ranging and Timing* (NAVSTAR) *Global Positioning System* (GPS), propriedade e também operado pelo governo dos Estados Unidos, e usualmente conhecido como GPS.

O sistema GNSS é mostrado na figura 2.8 com seus tempos de realização de um ciclo em torno da órbita terrestre, velocidades em que realizam a órbita e, por fim, a distância que estão em relação ao centro da Terra [3].

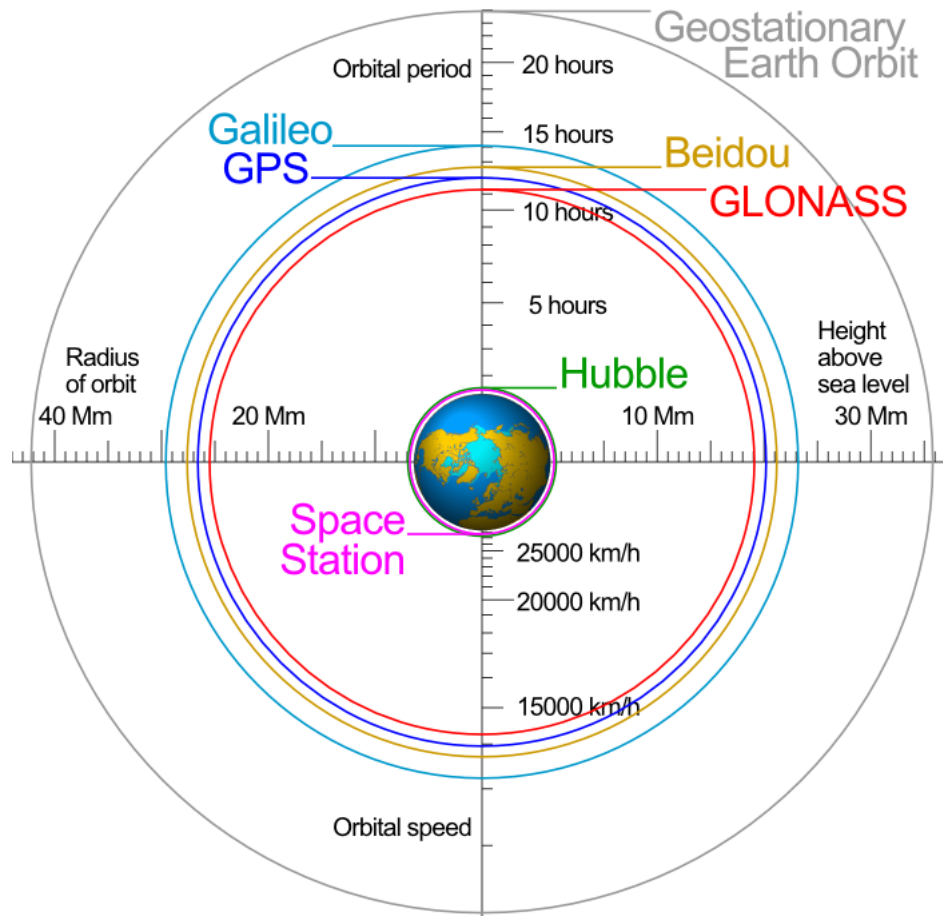


FIGURA 2.8: Informação Orbital sobre GNSS e outros sistemas ??

2.4.1 Sistema de Posicionamento Global

O GPS oferece dois serviços de navegação, o serviço de posição padrão (SPS), informalmente conhecido como um serviço civil, e o serviço de posicionamento preciso (PPS), ou serviço militar. O SPS está disponível para todos os usuários com equipamentos apropriados, entretanto o PPS somente é disponibilizado para os usuários licenciados pelo governo dos Estados Unidos. Usuários do sistema PPS possuem acesso criptografado aos

sinais. Em contrapartida o, sistema GPS civil pode ter seu sinal degradado de diversas maneiras, devido a alguns erros potenciais resultados de uma soma de erros preliminares das seguintes fontes:

- atrasos da Ionosfera e Troposfera: o atraso do sinal nessa parte da atmosfera é compensado por um modelo incluído no receptor, porém, por fazer apenas uma média dos atrasos, não é exato e assim perde-se um pouco de precisão;
- sinais “multi-path”, quando o sinal é refletido por prédios ou formações rochosas, o tempo de propagação muda e isso causa erros;
- erros do relógio do receptor, como não é possível ter um relógio atômico em cada receptor, podem ocorrer variações no relógio do receptor, causando assim perda de precisão;
- erros orbitais, são imprecisões nos relatórios de localização dos satélites;
- número de satélites visíveis, quanto mais satélites visíveis, maior a precisão. Prédios, terrenos acidentados, interferência eletrônica e até mesmo uma folhagem mais densa podem impedir a visualização dos satélites por parte do receptor. Tipicamente não se consegue um bom funcionamento dentro de locais fechados, embaixo da água ou da terra;
- geometria dos satélites / sombra, tipicamente existe uma geometria entre os satélites que favorece a decodificação da posição. Em alguns casos, satélites muito próximos uns dos outros ou alinhados, geram uma geometria ”pobre”, que resulta em uma precisão ruim;
- erros propositais, outra fonte significativa de erro é inserida propositadamente pelo Departamento de Defesa americano para causar uma degradação artificial do sinal do satélite. É chamada de Disponibilidade Seletiva (S/A - *Selective Availability*) e resulta em um erro de cálculo na posição disponível de mais de 100 m.

Problemas podem ocorrer quando o sinal de rádio encontra objetos grandes, como os arranha-céus, dando ao receptor a impressão de que o satélite está mais distante do que sua real posição.

Alguns complementos para o GPS são fundidos ao sistema fornecido pela América do norte, como sinais adicionais para aperfeiçoamento da precisão e adição de dados

secundários, que vão desde um serviço de correções diferenciais, fusão de sensores, como também alertas de integridade. Os sinais podem ter um aumento de sua cobertura nas zonas urbanas e montanhosas, onde muitos sinais de GPS podem vir a ser bloqueados pelo tipo do terreno ou edifícios. Correções diferenciais permitem o posicionamento mais preciso usando o DGPS, enquanto os alertas de integridade têm a função de proteger os usuários contra os efeitos dos erros presentes nos sinais de GPS, o que é essencial para aplicações críticas de segurança, como a aviação civil.

O GPS opera com uma constelação nominal de 24 satélites, podendo chegar a um máximo de 36 satélites. Os satélites desse sistema possuem uma órbita com raio de 26600 km (26 Mm na figura 2.8, com a cor de trajetória em azul), com um período aproximado de metade de um dia (11 horas e 58 minutos). Os satélites estão arranjados em seis planos orbitais, cada um inclinado com 55° (valor nominal) da linha do Equador e separados longitudinalmente, entre si por 60° [3]. A figura 2.9 ilustra esse posicionamento orbital.

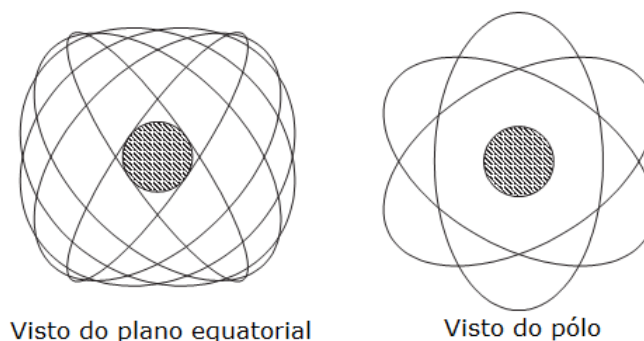


FIGURA 2.9: Planos orbitais do GPS, com vista pela linha do Equador, e pelos pólos [3]

2.4.2 GLONASS

O *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*, foi desenvolvido como um sistema de navegação militar pela extinta União Soviética em meados da década de 70, em paralelo com o GPS, como já comentado na seção 1.1. Como o GPS, o GLONASS foi desenvolvido para oferecer em dualidade, o serviço de posicionamento para o uso civil e militar. Seu primeiro satélite teve lançamento em 1982. Após a dissolução da União Soviética, o desenvolvimento do GLONASS foi continuado pela Rússia.

Sua constelação consta com 24 satélites. Os satélites tem uma órbita com raio de 25600 km (25 Mm na figura 2.8, com a cor de trajetória em vermelho), com um período de 11 horas e 15 minutos para cada satélite. Os satélites estão uniformemente espaçados em planos de 120° (longitude) com uma inclinação de 64.8° em relação a linha do equador. Veja a ilustração 2.10.

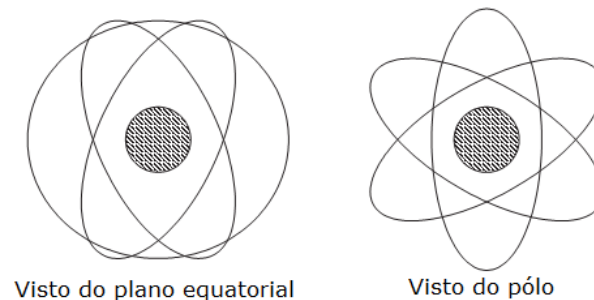


FIGURA 2.10: Órbitas GLONASS [3]

2.4.3 Galileo

Galileo, foi iniciado em 1999 pela União Europeia em conjunto com a Agência Espacial Europeia. Galileo foi desenvolvido como um sistema de navegação de exclusividade civil, e oferece quatro tipos de serviços de navegação: um serviço aberto (OS), o serviço de segurança de vida (SOL), serviços comerciais (CS), e um serviço público regulado (PRS).

O OS fornece sinais em duas bandas de frequência, para todos os usuários com equipamentos adequados, de forma gratuita.

O serviço SOL usa o mesmo sinal que o OS, mas adiciona um sinal de integridade e dados de autenticação, o que valida que o sinal do Galileo é genuíno, protegendo contra *spoofing*.

A CS fornecerá maior precisão para aqueles os usuários dispostos a pagar tarifas de assinatura. Sinais codificados em uma banda de frequência que podem oferecer maior proteção contra interferências e melhor posicionamento de fase da portadora.

O PRS é destinado a fornecer alta integridade, continuidade e alguma resistência a interferência, para os assinantes nos estados membros da UE, tais como serviços de emergência e serviços de segurança. No entanto, a precisão será ligeiramente pior do que a obtida a partir do serviço aberto a 3 m horizontalmente e verticalmente 6 m. Não

é especificamente um serviço militar, mas é operado de uma maneira semelhante para o PRS GPS, com dedicados sinais codificados e espectralmente separados em duas bandas de frequência. Apenas informações limitadas sobre o PRS estão disponíveis ao público por razões de segurança.

Galileo possui uma constelação nominal de 27 satélites. O raio de órbita é de 29600 km com um período de 14 horas e 5 minutos. Os satélites estão distribuídos entre três planos orbitais, separados por 120° de longitude e nominalmente inclinado em 56° do Equador. A figura 2.11 ilustra esse posicionamento. Cada plano contém 9 satélites, e separados longitudinalmente, entre si por $40^\circ \pm 2^\circ$.

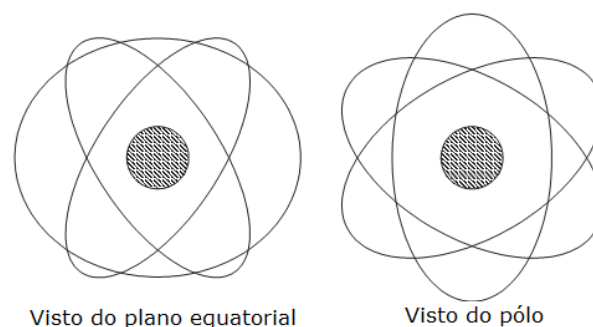


FIGURA 2.11: Órbitas dos Satélites Galileo [3]

2.4.4 Sistemas de Navegação Regional

O sistema de navegação Beidou (*Big Dipper*), usa uma constelação de três satélites geoestacionários com longitudes de 80° , 110° , e 139° . O sistema de navegação oferece serviços precisos e estáveis para todos os usuários da Ásia do Pacífico. O Beidou tem a funcionalidade e desempenho compatíveis com o sistema GPS. Até o momento, o sistema chinês é composto por 16 satélites que servem a região Ásia do Pacífico. A precisão está dentro de 7 metros em Pequim, Zhengzhou, Xi'an e Urumqi, no centro e no norte da China (longitudes com aproximadamente 70° e 150°). Ainda, a exatidão pode chegar a 5 metros em alguns países asiáticos de baixa latitude, de acordo com um teste avaliativo de operação. O sistema destina-se ao transporte rodoviário, ferroviário e aplicações marítimas operando de forma totalmente independente do GPS.

2.4.5 GPS Diferencial

O GPS é na atualidade o sistema de posicionamento global mais difundido e utilizado. Para se obter uma maior precisão do GPS, pode-se utilizar a técnica de correção diferencial [7]. Este sistema é denominado de Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS) ou GPS diferencial. O funcionamento do DGPS baseia-se na suposição de que o erro na determinação de um ponto é semelhante para todos os receptores situados em um raio de até centenas de quilômetros. A eliminação desse erro permite que o usuário reduza significativamente o erro total presente [15].

Neste sistema, um receptor GPS base é instalado em um local georreferenciado. Isto permite conhecer a diferença entre a posição obtida através do receptor de GPS base e a posição real do equipamento, possibilitando a correção diferencial do erro. A correção diferencial pode ser realizada após a coleta dos dados ou em tempo real. No primeiro caso, é necessário um software de pós-processamento e registros de dados simultâneos para ambos os receptores. Para operações em tempo real, o receptor base deve enviar imediatamente para o receptor móvel, o sinal de correção diferencial. O sinal de correção diferencial em tempo real pode ser obtido de: rádios-faróis operados pela marinha, estações de rádio terrestres ou ainda pelo uso de satélites de comunicação. Na figura 2.12 pode-se visualizar a ilustração em que, uma estação geo-referenciada com localização conhecida recebe os sinais do GPS e envia as correções dos erros no sinal antes recebidos para um usuário final, que no estudo de caso é a antena receptora do sinal GPS instalada no topo da máquina agrícola.

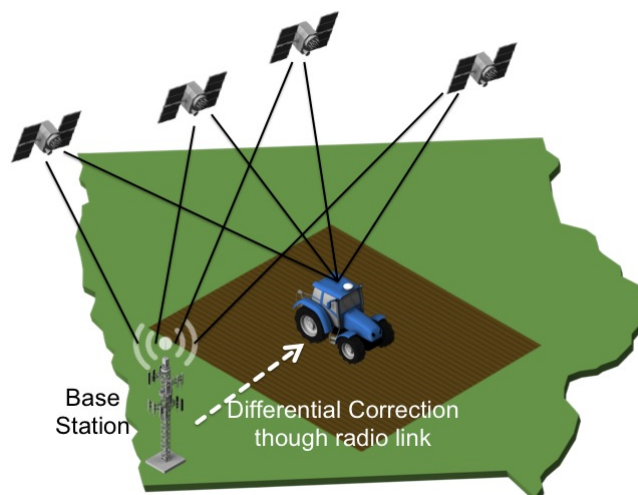


FIGURA 2.12: Sistema DGPS aplicado a agricultura de precisão [25]

2.4.6 RTK

Uma alternativa para a obtenção do sinal de correção diferencial é a utilização de uma estação de correção privada. A estação receptora comumente usada nas aplicações do campo, é a base RTK. A sigla RTK significa *Real Time Kinematic*, ou posicionamento cinemático em tempo real, e alia a tecnologia de navegação por satélites a um rádio-modem ou a um telefone GSM para obter correções instantâneas.

A técnica de posicionamento RTK é baseada na solução da portadora dos sinais transmitidos pelos sistemas globais de navegação por satélites GPS, Glonass e Galileo, este último ainda em fase de implantação. Uma estação de referência provê correções instantâneas para estações móveis, o que faz com que a precisão obtida forneça medidas em centímetros [26].

A estação base retransmite a fase da portadora que ela mediu, e as unidades móveis comparam suas próprias medidas da fase com a recebida da estação de referência. Isto permite que as estações móveis calculem suas posições relativas com precisão milimétrica, ao mesmo tempo em que suas posições relativas absolutas são relacionadas com as coordenadas da estação base.

Esta técnica exige a disponibilidade de pelo menos uma estação de referência, com as coordenadas conhecidas e dotada de um receptor GNSS e um rádio-modem transmissor. A estação gera e transmite as correções diferenciais para as estações móveis, que usam os dados para determinar precisamente suas posições [26].

A figura 2.13 faz uma ilustração das duas técnicas apresentadas nesta e na seção 2.4.5, com a base georreferenciada à esquerda e a base RTK a direita.

Para ambas as técnicas o que pode influenciar na precisão das medidas é a proximidade da estação de referência (quanto mais longe, pior será a medida), condições atmosféricas, geometria da configuração de satélites e qualidade dos receptores (base RTK e antena GPS) [26].

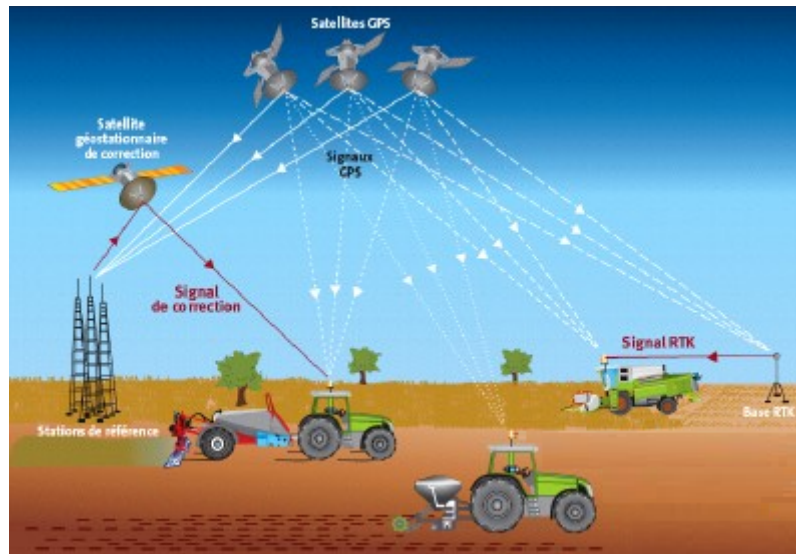


FIGURA 2.13: Sistemas de correção do sinal de GPS [27].

2.5 Sistema de Coordenadas

O sistema do piloto automático como um todo está representado por dois sistemas de coordenadas, sendo que um deles é fixo à Terra, e o outro fixo na máquina agrícola. Logicamente o segundo tem mobilidade em relação ao primeiro, e assim o sistema global é georreferenciado para a área agrícola em que a máquina se encontra em operação. A figura 2.14 demonstra esses dois sistemas de coordenadas

A posição espacial de cada eixo e o sentido positivo de giro em torno de cada eixo são definidos pela regra-da-mão-direita. A regra de G (Terra) estipula que o dedo indicador representa o eixo X, o médio os eixo Y e o polegar o eixo Z. Nesta regra, o polegar deve apontar para o centro da Terra. Esse sistema de coordenada representado por G, é o mesmo usado no GPS.

Também regido pela regra-da-mão-direita, têm-se a representação da posição espacial de cada eixo e o sentido positivo de giro do veículo na janela B (do inglês *body*), estipulando que o dedo polegar representa o sentido positivo do eixo em torno do qual ocorre a rotação e o feixe formado por todos os outros dedos representa o sentido positivo de rotação.

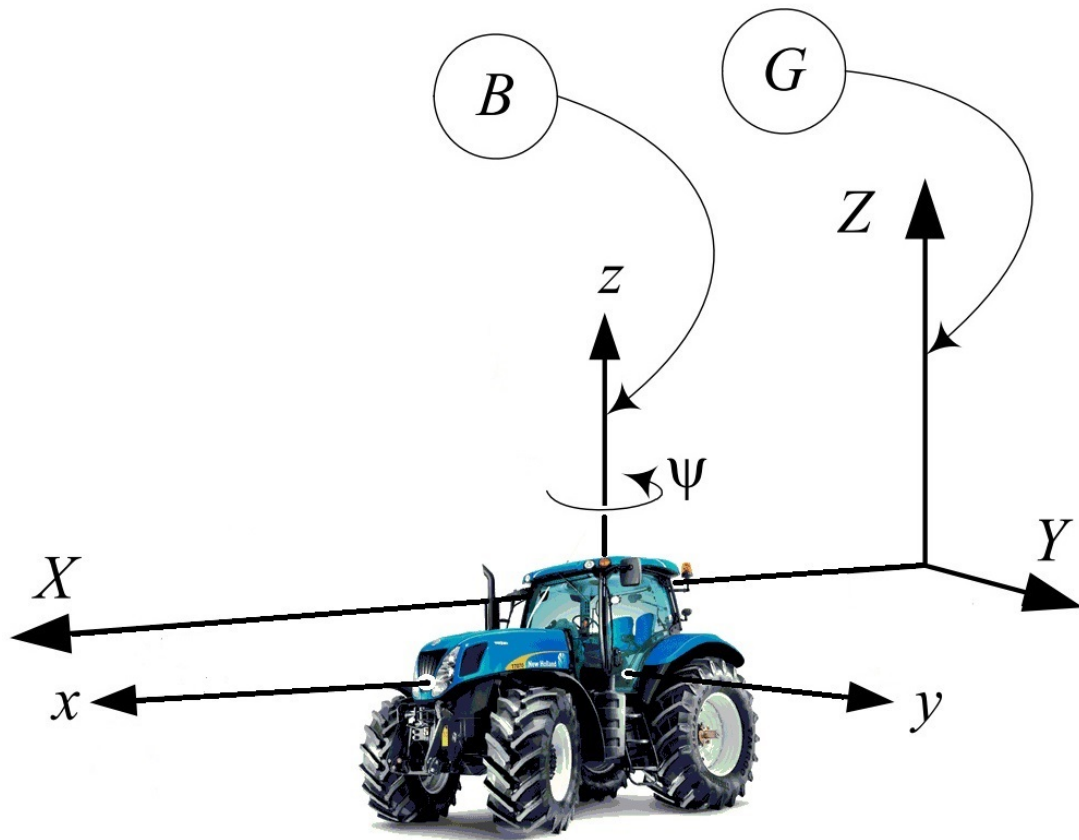


FIGURA 2.14: Veículo e seu sistema de coordenadas: indicado por sua coordenada local (janela B) na coordenada global (janela G)

2.5.1 Sistema Fixo de Coordenadas

Este sistema de coordenadas representa as medidas de direção e sentido dos ângulos enviados pelo GPS, na figura 2.14 representado por X, Y e Z. Nesse sistema são medidos acelerações, velocidades e deslocamentos absolutos, lineares e angulares, pois possui orientações fixas e perpendiculares à superfície da Terra. É importante observar que os ângulos θ e ψ não são os ângulos de Euler, porque a orientação dos eixos em torno dos quais são considerados é fixa. Comparando esse sistema de coordenadas a um relógio analógico convencional, a sua orientação tem como o 0° (zero graus) quando o ponteiro marca 12h, e cresce no sentido horário.

2.5.2 Sistema Móvel de Coordenadas

O sistema móvel tem sua origem fixa no centro de massa da estrutura mecânica da máquina agrícola e é representado pela notação xyz . Acelerações e velocidades relativas, lineares e angulares, são medidas neste sistema de coordenadas georreferenciadas.

A importância deste sistema de coordenadas juntamente com o da seção 2.5.1 se projeta no georreferenciamento de suas coordenadas, já que receberemos do GPS as medidas em um sistema (global), de uma variável de interesse no sistema local (veículo agrícola).

2.5.3 Georreferenciamento de Pontos de Controle

Para o georreferenciamento das informações recebidas do GPS algumas transformações geométrica de coordenadas são necessárias. O desempenho da transformação de coordenadas está diretamente relacionado à exatidão das coordenadas dos pontos de controle originados do GPS.

Atualmente, com a tecnologia GNSS [4], não existe mais a dificuldade de se medir com exatidão coordenadas de pontos da trajetória.[28]

Os deslocamentos das máquinas no campo devem ser medidos no sistema de coordenadas fixo à Terra para serem corretamente determinados e orientados pelo driver de controle do piloto automático, mantendo o veículo na trajetória estabelecida. Não é possível determinar os deslocamentos absolutos do veículo agrícola pela integração do vetor de velocidades relativas no tempo, se há deslocamento angular em torno do eixo normal do veículo, z . Portanto é necessária, a conversão da posição relativa do modelo para posição absoluta.

Qualquer deslocamento na Terra pode ser georreferenciado para o veículo como a composição de dois movimentos diferentes: translação simples mais rotação simples em torno da origem do sistema global.

2.6 Modelo de Estado de Veículos do Tipo Triciclo

O atual modelo da empresa usa como base um modelo de triciclo, como demonstrado e provado em [11]. Segundo Thuilot [11] a modelagem matemática deste sistema pode ser realizada através das equações de estado a seguir, definindo um veículo agrícola do

tipo triciclo:

$$\dot{s} = V \left(\frac{\cos \psi}{1 - yc(s)} \right) \quad (2.6)$$

$$\dot{y} = V \sin \psi \quad (2.7)$$

$$\dot{\psi} = V \left(\frac{\tan \delta}{l} - \frac{c(s) \cos \psi}{1 - yc(s)} \right) \quad (2.8)$$

Definições locais,

- ψ é o ângulo de giro no eixo z ou também mais conhecido como *yaw*, ângulo de orientação do CM do trator no globo;
- y erro entre o trator e a reta;
- $c(s)$ referência de curvatura ao longo da curva de referência;
- s é o ponto da curva onde a perpendicular que passa pela intersecção dos três eixos coordenados (centro de massa) do trator se cruza com a curva de referência;
- l é a distância entre eixos do trator;
- δ é o ângulo de giro da roda dianteira.

Essa modelagem, apesar de válida para a maioria das máquinas agrícolas, tem uso limitado em veículos dotadas de esteira e também em veículos cuja a posição da antena não esteja entre os dois eixos dianteiros.

2.7 Cinemática das Máquinas Agrícolas

No desenvolvimento do piloto automático para auxílio de navegação, a tarefa inicial é modelar o comportamento do sistema a ser controlado. Em sistemas complexos como veículos existe um número muito grande de variáveis, componentes e subsistemas não lineares que influenciam no comportamento do sistema, o que faz com que a modelagem de todos esses detalhes do sistema seja economicamente e temporalmente inviáveis.

Um modelo cinemático pode ser basicamente representado pela álgebra ou equações diferenciais que descrevem as forças ou movimentos de interesse para serem controlados.

Através desse modelo matemático é possível a predição do comportamento do sistema modelado causado pela variação no tempo das suas variáveis de entrada [29].

Tendo como argumentos as baixas velocidades, baixas acelerações, condições de carregamento ligeiramente abaixo da qual as máquinas agrícolas operam e assumindo que não ocorre deslizamento das esteiras, como em [29] e [30], é descrito o veículo somente em função da velocidade e sua orientação, como no modelo em coordenadas locais representado pelas equações de estado 2.9, 2.10 e 2.11:

$$\dot{x} = V \cdot \cos \psi \quad (2.9)$$

$$\dot{y} = V \cdot \sin \psi \quad (2.10)$$

$$\dot{\psi} = \omega \quad (2.11)$$

Para as equações 2.9, 2.10 e 2.11 tem-se a seguinte definição:

- x coordenada da máquina agrícola no eixo cartesiano x ;
- y coordenada da máquina agrícola no eixo cartesiano y ;
- ψ orientação da máquina agrícola em torno do seu eixo perpendicular ao plano da Terra, eixo z ;
- V velocidade da máquina agrícola;
- ω taxa de giro em torno do eixo z .

As equações 2.11 descrevem somente as coordenadas do veículo, desconsiderando qualquer comportamento da natureza a respeito de sua dinâmica. A modelagem, prova e desenvolvimento das equações podem ser melhor detalhadas em [29].

2.8 Conclusões

No presente capítulo foram demonstradas as ligações entre os conceitos físicos, matemáticos e da engenharia de controle e automação, para as aplicações na agricultura de precisão. Com esta base conceitual formada, nos capítulos 3 e 4 serão fundamentadas as teorias de controle e da instrumentação que auxiliarão as aplicações dos conceitos revisados neste capítulo.

Capítulo 3

Instrumentação do Sistema

O presente capítulo têm a função de informar o sistema de sensoriamento usado no piloto automático, como o recebimento do sinal de GPS e a fusão sensorial para melhoria nas medidas de atitude e posição. Será apresentada a forma de atuação na direção dos veículos agrícolas para que possam seguir de forma precisa e correta as trajetórias georreferenciadas pelo sistema de seguimento de trajetórias.

3.1 Sistemas Sensoriais

Muitos sistemas ainda podem complementar o sinal do GPS, como o INS (*Inertial Navigation System*), aumentando a precisão nas medidas das aplicações de uso civil. O sinal do GPS também pode ser melhorado com correção diferencial, que possibilita maior precisão no posicionamento, no que é conhecido como DGPS. Uma outra ferramenta de auxílio tem-se com o alerta de integridade de dados, que protege o usuário dos efeitos errôneos oriundos de um sinal de GPS, sendo essencial para aplicações de segurança de nível crítico [3]. Devido à adição desses sistemas, o sinal, que sempre chega ao usuário com uma grande margem de ruídos, fica mais puro ou confiável aumentando sua cobertura em áreas com maior dificuldade de propagação de sinal, como as urbanas e montanhosas.

3.1.1 Receptor GPS

O receptor GPS utilizado é fornecido pela empresa Hemisphere, sendo ela uma receptora ideal para aplicações da indústria agrícola. Possui uma taxa de atualização de 10 Hz, garantindo uma precisão de 10 cm para o sinal DGPS, e se trabalhando com o sistema RTK a precisão é de 10 mm.

3.1.2 Sistema de Medição Inercial

Os sensores de navegação utilizados em automação veicular possuem a tarefa de enviar ao sistema (driver mostrado na figura 1.2) informações sobre a localização da máquina agrícola, e sobre os giros realizados em seus eixos. Com o objetivo de ter um melhor desempenho realiza-se a fusão dos dados enviados pelos sensores, tornando assim o sistema de controle mais robusto e confiável [31].

Um dos tipos de sensores usados no piloto automático é o *encoder* (também mostrado na figura 1.2) acoplado ao eixo da roda, sendo habilitado a transmitir pulsos cuja frequência varia conforme a velocidade das rodas, e assim, permitir que se estime o deslocamento do veículo utilizando a técnica de odometria. A ideia básica da odometria é a integração da informação do movimento em um dado período de tempo, o que inevitavelmente leva ao acúmulo de erros de integração de velocidade para determinação da posição. Para limitar estes erros são usados sensores de medida absoluta, como o GPS, e um método de fusão sensorial.

Os sensores de navegação, podem ser citados o acelerômetro e o giroscópio. Os acelerômetros são os sensores inerciais que fornecem a medida da força específica que atua no veículo, que é a resultante das ações da aceleração inercial e da aceleração da gravidade. Portanto, a partir da medida da força específica e do modelo do campo gravitacional da Terra determina-se a aceleração linear, informação que é integrada para determinação da velocidade e posição do veículo [31].

Os giroscópios fornecem a medida da velocidade angular. O giroscópio é responsável por medir rotações ou inclinações do veículo em qualquer um dos três eixos. Este por exemplo, é capaz de informar se o veículo está em uma pista em aclive ou declive ou a inclinação do automóvel durante uma curva [31].

3.1.3 Fusão Sensorial

Nesta seção será apresentado um método informativo de integração entre os sistemas de navegação inercial (INS) [31] e GPS como solucionador das principais desvantagens em se utilizar sensores de atitude, posição e velocidade sem fusão dos sensores disponíveis no mercado. O uso de INS (acelerômetro mais giroscópio) ou o GPS de maneira individual pode acarretar mal funcionamento do sistema devido à ausência de dados momentâneos (caso do sinal de GPS sendo bloqueado devido a condições meteorológicas) ou também de dados com margem de erro cada vez maiores (caso do giroscópio devido a sucessivas integrações de suas medidas). Para contornar essas desvantagens de cada sensor é adotado uma fusão entre o INS e o GPS. O navegador integrado INS/GPS apresenta um desempenho superior quando comparado com os sistemas GPS e INS operando isoladamente (INS puro), e isso se deve ao fato dos sistemas apresentarem características complementares.

A principal desvantagem do INS que faz com que ele necessite de algum auxílio externo é o erro acumulativo que as sucessivas integrações das equações de navegação fornecem. Tendo em vista que sensores, por melhores que sejam, nunca estão desprovidos de erros em suas leituras, um sistema de navegação inercial operando sozinho irá fatalmente fornecer informações errôneas com o passar do tempo. O tempo em que um INS sem um auxílio externo consegue fornecer informações confiáveis é diretamente proporcional à qualidade de seus sensores inercias [31].

Em contrapartida, em um sistema integrado de INS/GPS, os dados fornecidos pelo GPS são utilizados como atualizações do INS, mantendo os erros desse sistema limitados. A fusão desses sistemas é normalmente implementada através do Filtro de Kalman¹. Baseado em modelos que descrevem a propagação dos erros, o Filtro de Kalman obtém estimativas dos erros em posição, velocidade e atitude.

Como citado no início da seção, a fusão sensorial descrita sucintamente aqui não faz parte do tema principal do projeto, e foi assumido pelo estagiário que os dados de velocidade, posição e atitude disponíveis para o algoritmo de controle já estavam tratados de interferências e inconsistências da integridade do sinal.

¹Filtro de Kalman é um estimador de estados que leva em consideração características estocásticas das variáveis. Seu detalhamento não será abordado neste projeto devido a sua complexidade, entretanto as definições matemáticas de suas equações e aplicações podem ser encontradas em [31].

3.2 Sistemas de Atuação da Direção

Nesta seção serão abordadas as duas formas mais comuns de atuação na direção de um veículo agrícola: a atuação do piloto elétrico realizada pelo acoplamento de um motor ao volante, e a atuação do piloto hidráulico feita através de uma válvula hidráulica. Esta seção tem caráter de elucidar o leitor em relação aos dois acionamentos do piloto automático da Hexagon Agriculture, pois em ambos os casos o sistema já foi desenvolvido e implementado pelos engenheiros da empresa.

3.2.1 Motor Elétrico

No piloto elétrico, o motor de corrente contínua utilizado é fornecido pela Bodine Electric Company. A alimentação é feita via sinal PWM de 10 bits (largura de pulso de 0 a 1024) com tensões máximas de ± 12 V. Seu circuito alimentador é do tipo Ponte H, o que possibilita seu giro nos sentidos horário e anti-horário.

3.3 Plataforma de Simulação

Para a implementação foi necessário produzir uma estrutura com atuador, placas com software embarcado e ferramentas para posterior análise dos resultados. Os equipamentos e ferramentas usadas para simulação do sistema de auto-guiamento² foram:

- software³ e placa com sistema embarcado para realizar a simulação de um sistema de posicionamento (GPS), de maneira a enviar coordenadas geográficas de latitude e longitude, para o Titanium;
- driver com algoritmo de controle embarcado;
- volante de uma máquina agrícola e um suporte para adaptar o mesmo na mesa;
- suporte para acoplamento do motor de cc ao volante;
- computador para aquisição de dados via serial, leitura de mapas e compilação de códigos;

²auto-esterçamento ou piloto automático

³sistema operacional desenvolvido pelo setor de pesquisa e desenvolvimento da empresa para testes e simulações internas

- Titanium;
- cabeamento para conexão de dados via serial e CAN;
- cabeamento para comandos e conexão entre o atuador e o algoritmo de controle (embarcado no driver);
- fontes de alimentação para o Titanium e o motor cc.

A estrutura dessa plataforma de simulação pode ser vista na figura 3.1.

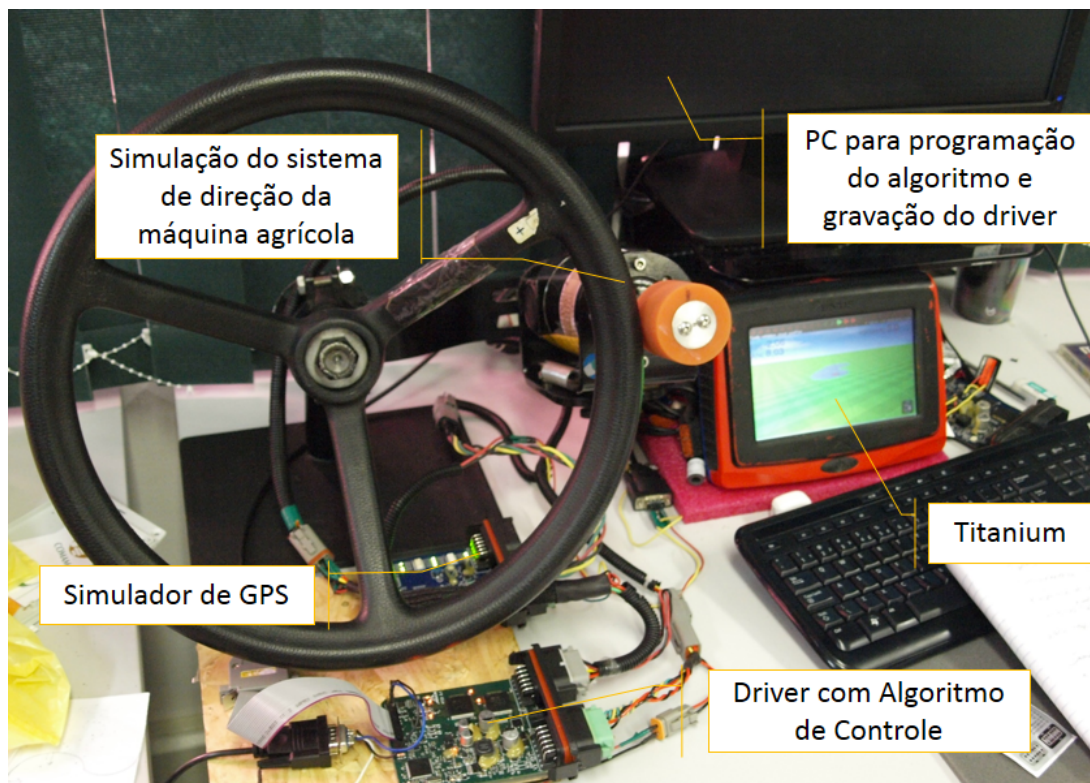


FIGURA 3.1: Plataforma de Simulação do Sistema

3.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as especificações da instrumentação usada no sistema piloto automático da empresa, e a estruturação física para a implementação do algoritmo de controle a ser fundamentado no próximo capítulo.

Capítulo 4

Controle de Posição e Orientação

Neste capítulo serão discutidos os efeitos das ações de controle proporcional, integral e derivativa, assim como a sintonização de seus ganhos e configurações para o correto desempenho do sistema.

4.1 Ações de Controle

Um controlador compara o valor real da grandeza de saída do processo com a grandeza de referência, determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. À maneira pela qual o controlador produz o sinal de controle é chamada ação de controle [32].

Os controladores podem ser sintonizados (ajustados) a partir de suas ações de controle e podem ser somadas para projetar a saída desejada de um determinado sistema. Nos métodos práticos de sintonia de um controlador, primeiro se escolhe os termos a se utilizar, que podem ser proporcional, derivador, integral, ou uma combinação destes. Para determinada escolha é fundamental a compreensão dos princípios de cada tipo de ação e de sua estrutura, sendo as mais comuns para o projeto de controladores:

1. ação proporcional (P);
2. somar-se a ação proporcional (P) um termo derivador (D);
3. uma ação integral juntamente com a proporcional, resultando em um (PI);

4. e a mais usada na indústria, o controlador em que soma-se as três ações de controle: proporcional, integral e derivativa, o PID.

O ajuste, calibração ou sintonia do controlador consiste em deduzir, partindo-se da resposta do sistema, quando este é sujeito a entradas específicas, determinados valores que vão permitir o cálculo dos referidos parâmetros. Nas subseções 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 serão descritas detalhadamente como cada ação de controle age no processo do sistema.

Para dar-se continuidade ao presente capítulo alguns conceitos preliminares serão importantes, como segue:

- **Variável de Processo**, é a variável controlada no processo, podendo ela ser temperatura, pressão, umidade, entre outras grandezas físicas. Para o presente trabalho serão abordadas duas variáveis de processo, a distância da trajetória georreferenciada e o ângulo de giro do veículo, o *yaw*;
- **Variável Manipulada**, é a variável sobre a qual o controlador atua para controlar o processo, como posição de uma válvula, tensão aplicada a uma resistência, entre outras. No algoritmo que será proposto a variável a ser manipulada será a posição da roda.

4.1.1 Ação Proporcional

Para um controlador com ação de controle proporcional, a relação entre o sinal de saída do controlador $u(t)$ e o sinal de erro atuante $e(t)$ é

$$u(t) = \underbrace{K_p}_{\text{ganho}} \underbrace{e(t)}_{\text{erro}}$$

que têm-se a determinação de K_p sendo ganho proporcional, e $e(t)$ o erro entre a referência e a variável de processo [32].

Em processos didáticos, o $u(t)$ normalmente já é a variável manipulada, entretanto no sistema do piloto automático é necessário fazer uma conversão relacional entre a saída do controlador com o atuador, para que o motor cc gere pulsos o suficiente para girar o volante, e ocasionando ângulo de giro exato da roda para a execução de determinada referência (saída do controle).

Qualquer que seja o mecanismo real ou a forma da energia usada na operação, o controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável, visto que a correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado, de maneira que essa diferença entre as variáveis venha a convergir para um valor nulo. Em contrapartida deve-se notar que ao aumentar o ganho K_p também se aumenta o tempo em que se alcança o regime permanente, e eventualmente a sua instabilidade [33]. Uma característica importante desta ação de controle é a existência de um erro residual permanente quando o sistema não possui um integrador.

4.1.2 Ação Integral

O termo integral não é isoladamente uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação integral consiste em uma resposta na saída do controlador $u(t)$ que é proporcional a amplitude e duração da diferença entre a referência e a saída do controle. A ação integral tem o efeito de eliminar o erro característico de um controle puramente proporcional.

Em um controlador com a ação de controle integral, o valor da saída do controlador $u(t)$ é variado segundo a taxa proporcional ao sinal de erro atuante $e(t)$. Isto é,

$$\frac{du(t)}{dt} = \underbrace{K_i}_{\text{ganho}} \underbrace{e(t)}_{\text{erro}}$$

ou

$$u(t) = \underbrace{K_i}_{\text{ganho}} \underbrace{\int_0^t e(t) dt}_{\text{integral do erro}}$$

sendo que K_i é uma constante ajustável, e $\int_0^t e(t) dt$ é a integral do erro entre a trajetória georreferenciada e a variável de processo [32].

Se o erro da entrada do controlador for dobrado, então o valor da saída $u(t)$ irá variar duas vezes mais rápido, devido a esse aumento do erro. No caso em que o erro atuante for nulo, o valor de $u(t)$ permanecerá estacionário [32].

4.1.3 Ação do Derivador

Assim como a ação de controle integral a ação derivativa não é isoladamente uma técnica de controle, pois não pode ser empregada separadamente de uma ação proporcional. A ação derivativa consiste em uma resposta na saída do controlador $u(t)$ que é proporcional a taxa de variação do erro atuante, como segue

$$u(t) = \underbrace{K_d}_{\text{ganho}} \underbrace{\frac{de(t)}{dt}}_{\text{taxa do erro}}$$

para K_d sendo o ganho ajustável, e $\frac{de(t)}{dt}$ a variação do erro entre a trajetória georreferenciada e a variável de processo [32].

Matematicamente, a contribuição da taxa de variação do erro (termo derivativo) no controle é calculada a intervalos regulares, de maneira que o controlador calcula a variação do desvio do processo em relação à guia georreferenciada, somando (não diretamente) a variável manipulada (ângulo da roda) o valor desta variação.

Um controlador proporcional somado com a ação de um derivador, pode produzir uma correção significativa antes mesmo da diferença entre, o veículo e à guia tornar-se demasiadamente grande. O controle derivativo, portanto, antecipa o erro atuante no sistema e inicia uma ação corretiva mais cedo, tendendo a aumentar a estabilidade do sistema.

A ação derivativa tem o efeito de reduzir a taxa de variação da variável de processo através da variável manipulada, evitando que se eleve ou reduza muito rapidamente, propiciando um meio de se obter um controlador com alta sensibilidade. A ação de controle só atua quando há variação no erro, se o processo está estável seu efeito será nulo [32]. Durante perturbações ou na partida do processo, quando o erro está variando, o derivativo sempre atua no sentido de atenuar as variações, sendo portanto sua principal função melhorar o desempenho do processo durante a resposta transitória.

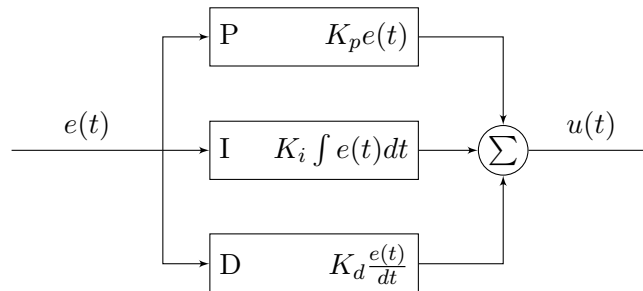
4.1.4 Controlador PID

A combinação da ação de controle proporcional, integral e derivativa é denominada ação de controle proporcional-integral-derivativa (PID) [32]. Esta ação combinada possui as

vantagens de cada uma das três ações de controle. A equação de um controlador PID é dada por

$$u(t) = \underbrace{K_p e(t)}_P + \underbrace{K_i \int_0^t e(t) dt}_I + \underbrace{K_d \frac{de(t)}{dt}}_D$$

e visto que ela pode ser representada pelo esquema abaixo:



Para o presente trabalho foi estabelecido a estrutura do PID no controle das máquinas agrícolas para seu correto posicionamento nas guias, e mantendo-as na trajetória pré-estabelecida.

4.2 Controles Propostos

A metodologia usada na escolha pela estrutura de controle foi feita analisando cada ação de controle (P,I,D). A partir da fixação de um ganho K_p de valor baixo (quase nulo) para as duas variáveis de processo do sistema, citadas no início do capítulo (primeiro item da seção 4.1), e com velocidade em aproximadamente 5 km/h somou-se a saída do controlador da posição com a do controle de orientação, resultando em uma estrutura de controle com dois controladores proporcionais paralelos. Após esse passo foi acrescentado um termo integrador no controle da posição, sucedido de uma ação derivativa. O controlador do ângulo permaneceu inalterado. Em contrapartida o controlador não teve saídas satisfatórias quando simuladas na ferramenta Matlab.

A segunda estrutura proposta era somente um controlador com ação proporcional agindo na orientação do sistema e recebendo o erro de posição. Essa estrutura de controle teoricamente foi muito satisfatória, visto que a resposta do sistema era muito rápida, e com sobresinal (sobrepassagem da guia) nula. Esta ação de controle surgiu de modo que, era pressuposto o alinhamento angular (erro entre o ângulo da reta e o *yaw* do veículo) do veículo na guia de forma natural às variáveis do processo, após o mesmo ter

entrado em regime permanente. No caso de existir erro de posição, mínimo que fosse, o controlador continuaria atuando até o perfeito alinhamento do veículo.

Por melhor que tenha sido a resposta do sistema na simulação do Matlab, foi necessário a inclusão da ação integral no controlador, devido aos ruídos na medida da instrumentação, e o requisito de rejeição a perturbação.

Com os resultados satisfatórios em simulação na ferramenta Matlab, o algoritmo de controle então foi desenvolvido e implementado na linguagem C, de maneira a complementar os códigos do piloto automático, e conseqüentemente se deu o início dos testes em plataforma de simulação (subseção 3.3).

Após o desenvolvimento e implementação do algoritmo de controle, o sistema na plataforma de simulação não obteve os resultados esperados, pois o veículo só andava em círculos independentemente de mudanças realizadas nos parâmetros do controlador. Diante desses resultados a orientação dos engenheiros da empresa, foi que novamente realizasse uma mudança na configuração do controle, adicionando um controlador na orientação da máquina agrícola.

4.3 Sistema de Controle de Posição e Orientação

O algoritmo de controle que será proposto neste trabalho precede da estrutura de controle em cascata¹, como pode ser observado na figura 4.1, sendo o primeiro um controlador PID para tratamento do erro de posicionamento, e o segundo controlador é um P para garantir a correta orientação angular do veículo.

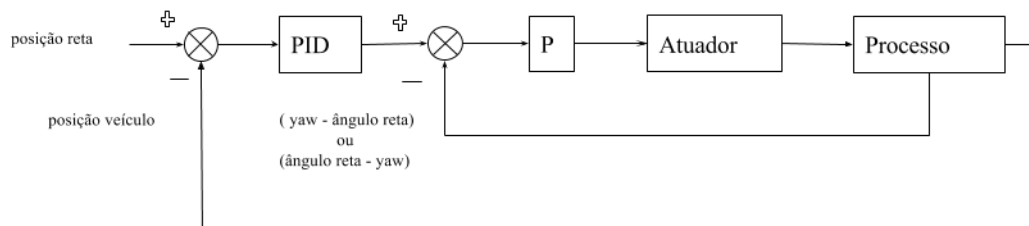


FIGURA 4.1: Diagrama de blocos da estrutura de controle

O sistema de controle que será proposto nas subseções 4.3.1 e 4.3.2 garantirão os requisitos de projeto iniciais para o proposto trabalho. Com essa estrutura de controle

¹O controle em cascata é definido como a configuração onde o sinal de saída de um controlador é o *set point* do próximo controlador

definida (será demonstrada nas subseções 4.3.1 e 4.3.2) foi implementado em linguagem de programação C o algoritmo de controle, de maneira a integrar o restante do sistema² formado pelo, modelo matemático do veículo descrito no capítulo 2, e o gerador de trajetórias retas também descrito no capítulo 2.

A estrutura final do sistema de controle e do processo como um todo, está simplificada na figura 4.2, para que o leitor possa entender a ação dos controladores no atuador do piloto elétrico, resultando no correto posicionamento e orientação da máquina agrícola.

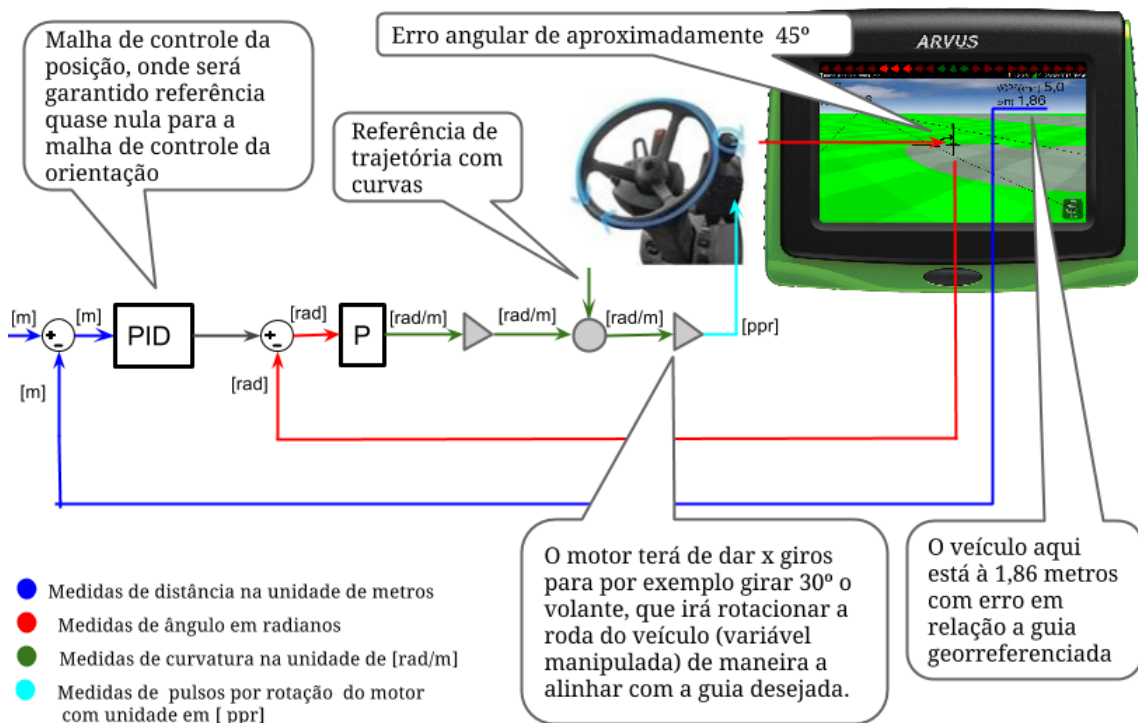


FIGURA 4.2: Sistema do Projeto

O Titanium da figura 4.2 indica que o veículo está com um erro angular (ângulo da reta - *yaw*) de aproximadamente 45° e se distanciando da guia desejada. No canto inferior direito da tela do Titanium têm um botão virtual (acionado pelo toque na tela) que ao ativá-lo o algoritmo de controle inicia sua operação. Ao ser acionado o algoritmo, o Titanium informa via comunicação CAN o driver³ do piloto (vide figura 1.2), o erro de posição e de orientação da máquina agrícola. O algoritmo de controle recebe o erro de posição e o referencia para a entrada do controlador PID, que tem a função de garantir referência quase nula para a entrada do controlador P da orientação, que terá a função de zerar os erros por completo. A saída do segundo controlador

²implementados na validação da segunda estrutura de controle mencionada na seção 4.2

³local em que o software com o algoritmo de controle está implementado.

será uma referência de curvatura, que no caso do piloto elétrico será multiplicado por uma constante⁴ que gera quantidade de pulsos necessários para que o motor de corrente contínua gire o volante (somente o necessário) fazendo com que a roda dianteira do veículo seja orientada frequentemente⁵ (ao recebimento sinal de posição e orientação) para aproximação, e estabelecimento do veículo na guia georreferenciada.

Com o entendimento da atuação geral do controle e funcionamento do sistema, é possível o detalhamento de cada controlador e sua ação de controle.

4.3.1 Controle do Erro de Posicionamento

Nesta seção foram combinadas as três técnicas de controle abordadas anteriormente, o controle básico do P (subseção 4.1.1) com a eliminação do erro em regime permanente pelo I (subseção 4.1.2) e com a redução de oscilações do D (subseção 4.1.3), para obtenção de um controlador do tipo PID que irá atuar diretamente no erro de posicionamento entre a guia e o veículo.

A escolha por essa estrutura de controle foi feita analisando a resposta do sistema, a medida que era implementado uma nova ação de controle, e assim definiu-se um controlador PI. Mesmo que a ação proporcional já garantisse a aproximação da máquina agrícola à trajetória, foi adicionado um termo integral devido aos erros na medida do *yaw* recebido do GPS e para rejeições das perturbações originadas das incertezas do terreno.

Com o controlador PID seria esperado⁶ como resposta do sistema, a aproximação do veículo de maneira brusca e rápida até a trajetória, e ao se aproximar da guia a máquina agrícola deverá segui-lá independentemente de sua orientação, ou seja o erro de posição seria anulado nem que para isso o veículo siga a trajetória sem seu eixo longitudinal (eixo x na figura 2.7) estar paralelo a trajetória⁷, o que acontece quando o ângulo *yaw* não é zero. Com efeito da resposta do sistema há de se dizer que a função do controlador

⁴adquirida através de ensaios em que eram pré estabelecidos valores de referência de curvatura na saída do sistema, e por conseguinte era observado a quantidade de pulsos necessários que o motor de corrente continua girasse o volante (somente o necessário) fazendo com que a roda dianteira do veículo realizasse uma circunferência com o diâmetro ($Curvatura = 1 / (\text{raio da trajetória})$ e $Diâmetro = 2 * (\text{raio da trajetória})$) referenciado.

⁵período de 5 milisegundos.

⁶comportamento que acontece no campo, segundo os engenheiros da empresa

⁷uma maneira não real do comportamento do veículo, porém de fácil analogia para entender a função do controlador seria como se a máquina agrícola após estar na referência trafegasse por ela mesmo que de lado, ou arrastado lateralmente.

PID será a de aproximar o erro a zero para a distância entre a variável de processo e a referência, e não de orientá-lo na guia, contudo o próximo controlador terá essa função.

4.3.2 Controle do Erro de Orientação

O controlador de orientação será do tipo proporcional (P), com a função de orientar o veículo na trajetória de referência, através da anulação do erro entre o *yaw* da máquina agrícola e a orientação da guia georreferenciada. Esta ação de controle será complementar ao controlador da seção 4.3.1, e com toda a certeza aproximando a máquina agrícola da trajetória e seguindo-a com a correta orientação.

Este controlador atua na diferença entre a referência que chega do controlador da posição e o *yaw* da máquina agrícola. Analisando exclusivamente a atuação deste P na resposta do sistema, o veículo deverá trafegar paralelamente a guia de referência mesmo que esse paralelismo tenha uma distância não nula (que seria o caso ideal) da trajetória de referência.

4.4 Ganhos

Devido a complexidade da planta do processo, não foi possível aplicar as técnicas para sintonização dos ganhos aprendidas na graduação, o que otimizaria seus valores e a estabilidade do sistema em malha fechada. Entretanto a sintonia dos ganhos K_p , K_i e K_d do controlador da posição, e o ajuste do K_p da orientação, pode ser feito por tentativa e erro, sintonizando os quatro parâmetros individualmente e verificando o desempenho do processo, até se adquirir o desempenho desejado.

Para a sintonização dos controladores é necessário o conhecimento do efeito de cada parâmetro da ação de controle sobre o desempenho do sistema, além de experiência em diferentes processos, que foram adquiridas durante as últimas seis fases do curso. Para atingir um desempenho de controle satisfatório (sobrepasse nula na entrada da guia após ligar o guiamento automático, estabilização rápida, rejeição à perturbações), o projetista se imaginou no lugar do controlador e o que faria com a variável manipulada (ângulo de posição da roda) ao analisar os erros recebidos e comparando-os com a ação

tomada pelo controlador, através de dados de tempo real pela saída serial e análise qualitativa da saída da navegação no Titanium.

Apesar da dificuldade de ajustar a intensidade de cada um dos termos a seguir são apresentadas diretrizes para otimização manual do desempenho do controlador PID em série com o P para uma velocidade de 5 km/h:

Resposta em malha fechada	Tempo de aproximação da guia	Sobrepassagem da guia	Tempo de estabilização do veículo	Erro estacionário
K_{pp}	DIMINUI	AUMENTA	NADA ALTERA	DIMINUI
K_{ip}	DIMINUI	AUMENTA	AUMENTA	ELIMINA
K_{dp}	NADA ALTERA	DIMINUI	DIMINUI	NADA ALTERA
K_{po}	DIMINUI	AUMENTA	NADA ALTERA	AUMENTA

No esquema acima a primeira coluna representa os parâmetros de ajuste dos controladores de posição e orientação, visto que K_{pp} , K_{ip} e K_{dp} são os ganhos proporcional, derivativo e integral do controlador da posição respectivamente e K_{po} o ganho proporcional do controlador da orientação. A análise foi feita ajustando os parâmetros da primeira coluna e observando se aumentava, diminuiria ou eliminava os requisitos da primeira linha em negrito. Um exemplo, ao aumentar o valor do K_{pp} o tempo de aproximação da guia e o erro estacionário diminui, aumentando a sobrepassagem da guia sem interferência no tempo de estabilização da máquina agrícola na trajetória.

Além dos parâmetros acima foi observado que o controle da orientação não pode ser dominante em relação ao controle da posição pois acarreta em um sistema que normalmente ficará rotacionando em círculos sem tempo para agir na diminuição do erro da posição.

Na identificação dos parâmetros do controlador, inicialmente foi estabelecida uma velocidade de 5 km/h e após foi realizado a sintonização dos ganhos de ambos os controladores, e identificados os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 K_{pp} &= 0,2752990 \\
 K_{ip} &= 0,3426411 \\
 K_{dp} &= 0,0820000 \\
 K_{po} &= 0,4539201
 \end{aligned}$$

Para esses ganhos o sistema se adequou as especificações de projeto como será apresentado no capítulo 5. Foi feito também testes para outras variações de velocidade (de

1 km/h à 28 km/h), entretanto era necessário a alteração dos valores dos ganhos para cada ponto de operação, e alterando-os proporcionalmente de acordo com a velocidade, o veículo não se aproximava e nem seguia a trajetória como desejado. Por isso foi pressuposto o sistema com velocidade constante de 5 km/h para a realização dos ensaios que serão demonstrados no capítulo 5.

4.5 Adaptações Para o Correto Funcionamento Físico

Devido aos requisitos de projeto foi inviável um perfeito funcionamento do sistema devido ao comportamento da planta. Ao ligar o algoritmo de controle, a máquina agrícola deve aproximar-se rapidamente da trajetória sem sobrepassar a guia em sua entrada. Esse comportamento não era satisfeito para erros de posição abaixo de 1,2 metros (valor verificado experimentalmente) e sempre o veículo ultrapassava a guia, e ainda em certos valores (altos) de K_{ip} o sistema se tornava oscilatório. Em contrapartida se o valor de K_{ip} fosse nulo, o veículo se aproximava e se estabelecia na guia sem sua sobrepassagem, entretanto seu erro residual em relação a guia nunca se anulava.

A solução proposta para resolução deste problema foi o desligamento da ação integral ao ligar o piloto automático. Após 7 segundos de operação do algoritmo, a máquina agrícola já está muito próxima a trajetória e nesse momento a ação de controle I é ligada. Dessa maneira o sistema se comporta como esperado para os requisitos de sobrepassagem, tempo de aproximação à trajetória inferior a 10 segundos e rejeição as perturbações.

4.6 Conclusões

O presente capítulo demonstrou o algoritmo de controle, com suas ações e estrutura. Foi descrita a metodologia para a correta sintonia dos ganhos, dos controladores de posição e orientação, para um ponto de operação de velocidade. Com o entendimento do fechamento da malha do sistema é finalizado aqui o entendimento necessário para aquisição dos dados e análise dos resultados que será abordado no capítulo seguinte (Capítulo 5).

Capítulo 5

Resultados

No presente capítulo serão apresentados os resultados do desenvolvimento e implementação do algoritmo de controle de trajetórias georreferenciadas. Os resultados que serão aqui explicitados foram simulados na matriz da Hexagon Agriculture. Para realização da simulação foi definido que a velocidade da máquina agrícola seria constante e no valor de 5 km/h. Os resultados foram coletados de duas maneiras diferentes: primeiro via entrada serial entre o driver¹ e depois através de um programa que permite a geração, leitura, visualização e exportação de dados dos mapas de aplicação gerados pelo Titanium. No programa da empresa serão demonstrados dois comportamentos da máquina agrícola ao realizar as trajetórias retas, primeiro na seção 5.1.1, e sucessivamente na seção 5.1.2 serão realizadas as análises de controle.

5.1 Trajetórias Retas em Plataforma de Simulação

Nesta sessão serão mostrados os resultados obtidos através da simulação do sistema na plataforma apresentada na seção 3.3. O procedimento de aquisição dos resultados foi realizado da seguinte maneira: primeiro, o sistema de simulação de sinal de GPS iniciava o envio de coordenadas para o Titanium, que é o responsável pelo envio dos erros de posição e orientação para o driver do piloto automático. Segundo, eram escolhidos dois pontos (para se formar uma reta) na tela do Titanium, para que o Titanium gerasse uma trajetória reta, que será a referência (linhas retas de cor preta que aparecem na tela do

¹placa com sistema operacional embarcado

Titanium e pode ser visto na figura 5.8). Por fim o piloto automático era ligado através da tela do Titanium, dando início a operação do algoritmo de controle desenvolvido.

5.1.1 Análise pelo SAIG

O SAIG é uma sigla utilizada para o Software Arvus de Informações Geográficas, que permite a geração, leitura, visualização e exportação de dados de mapas de aplicação (rastros cinza na figura 5.8). Através do SAIG foi realizada a interpolação dos dados do mapa de aplicação (gerado pelo Titanium), da simulação de operação do piloto.

Em seguida, dois estados da máquina agrícola ao realizar as trajetórias retas puderam ser verificados no SAIG, como o erro de posição (Figura 5.1(a)) da máquina agrícola em relação a trajetória georreferenciada, e também o ângulo de orientação, *yaw* da máquina agrícola² durante uma aplicação agrícola (Figura 5.1(b)).

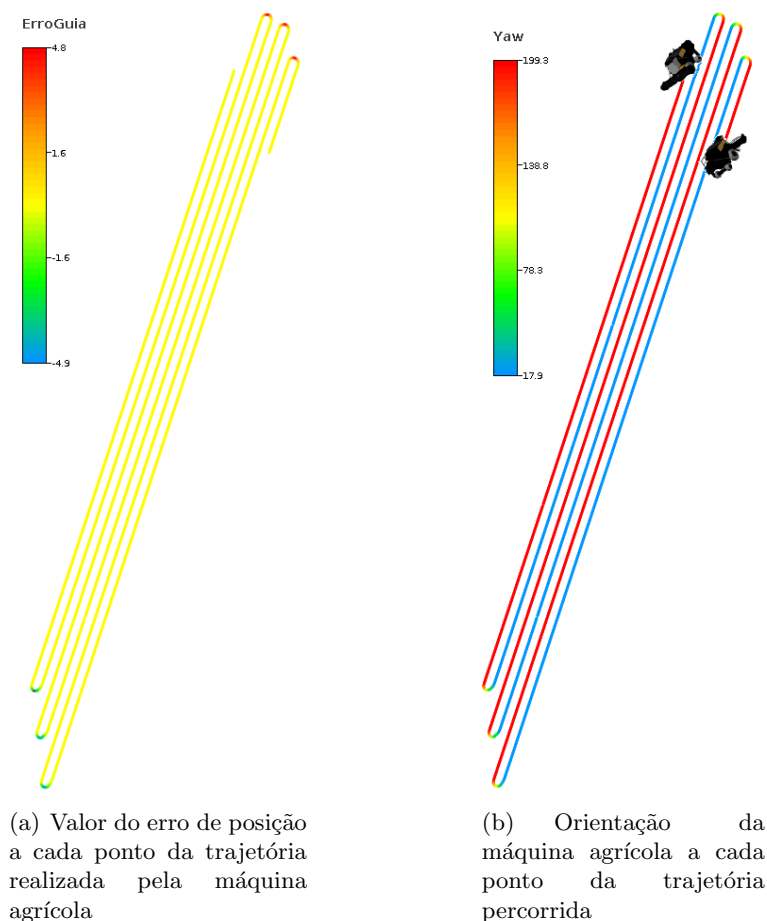


FIGURA 5.1: Dados do erro e do yaw, ponto a ponto

²colheitadeira adicionada em software de edição de imagens, e não faz parte do programa SAIG.

Analisando ponto a ponto o erro da máquina agrícola em relação a guia, se verifica que seu valor é nulo no transcorrer da trajetória reta, e de valor alto quando o veículo se distancia da referência. No entanto o algoritmo de controle, quando acionado inicia o reposicionamento para a guia lateral mais próxima, sendo este o comportamento observado na figura 5.1(a).

A trajetória reta georreferenciada está com orientação angular de 200° em relação ao norte da Terra³, sendo assim o *yaw* do veículo precisa ter 200° se a colheitadeira estiver descendo ou 20° se subindo, em relação ao norte da Terra, para que o erro angular entre a guia e o veículo seja nulo.

5.1.2 Análise em Matlab

A figura 5.2 representa as coordenadas geográficas da trajetória realizada pelo sistema de auto-esterçamento desenvolvido nesse trabalho. As guias de referência são somente as retas e que foram totalmente sobrescritas pela precisão da trajetória realizada pela máquina agrícola.

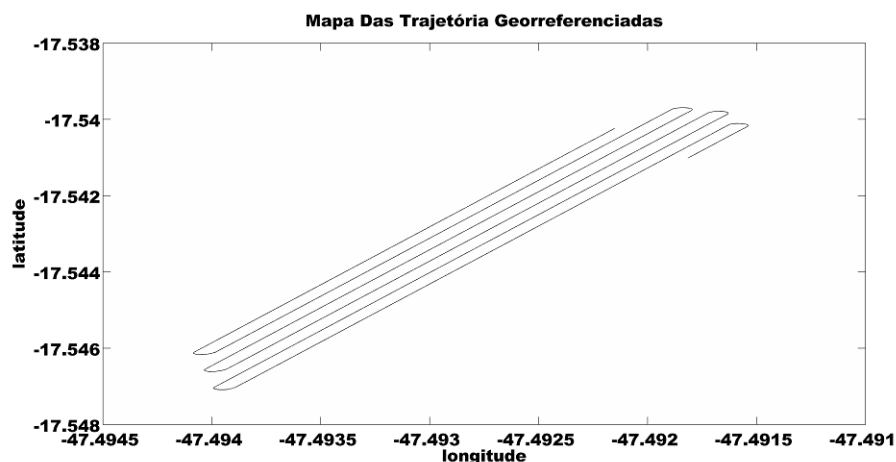


FIGURA 5.2: Trajetórias realizadas pela máquina agrícola com o algoritmo de controle implementado

Nas proximidade da latitude $-17,546^{\circ}$ e $-17,548^{\circ}$ com longitude de $-47,494^{\circ}$, assim como latitude $-17,540^{\circ}$ com longitude de $-47,492^{\circ}$, foram os momentos em que o piloto era desligado⁴ manualmente para que eu pudesse girar o volante o suficiente para o *yaw*

³coordenada do GPS com orientação crescente no sentido horário

⁴através da interface do Titanium

(orientação do veículo) alterar em aproximadamente 180° para novamente ser acionado e realizar uma nova reta.

Pode-se visualizar na figura 5.3 a saída do controlador (na cor azul) pelo erro (na cor verde). Cada pico de linha verde é o erro da posição no momento em que é ligado o piloto automático para nova aproximação da trajetória, e o pico de linha azul é a resposta da ação de controle no momento em que é ligado o algoritmo de controle.

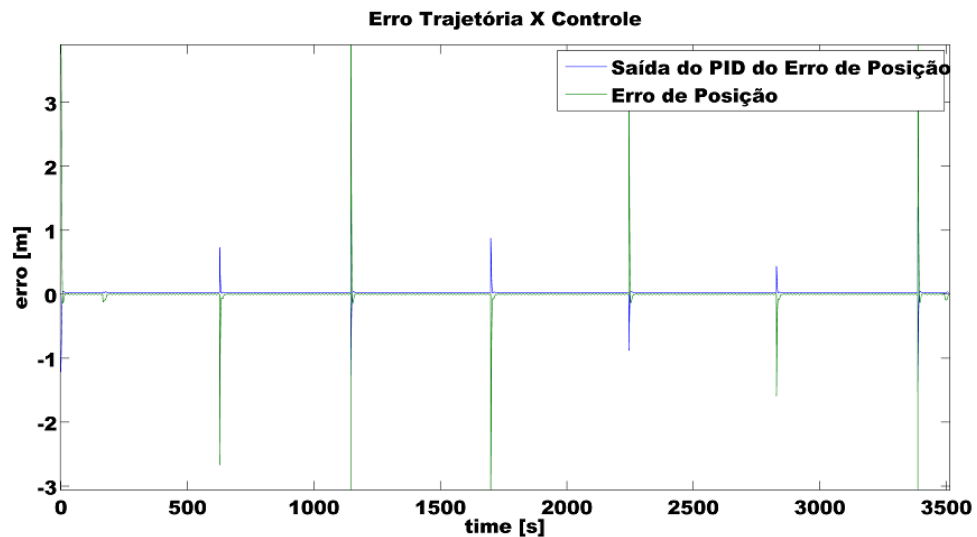


FIGURA 5.3: Sinal do erro de posição e sinal de controle do PID

Continuando a análise sobre a figura 5.3, cada pico⁵ da ação de controle acontece no momento que o piloto automático inicia a aproximação da trajetória e o controle é acionado após um giro de aproximadamente 180° em relação ao final da reta anterior. Tais curvas onde o controle é mais exigido pode ser visto na figura 5.2.

A figura 5.4 é apenas uma aproximação (zoom) da figura 5.3, para que a resposta do controlador diante ao erro possa ser melhor verificada. No caso a cada oscilação do valor do erro e aumento rápido do erro de posição, a ação do controlador PID é imediata e contrária, estabilizando o sistema e o mantendo com as especificações de projeto desejadas.

⁵seis pontos de ações dos controladores para seis retornos de trajeto.

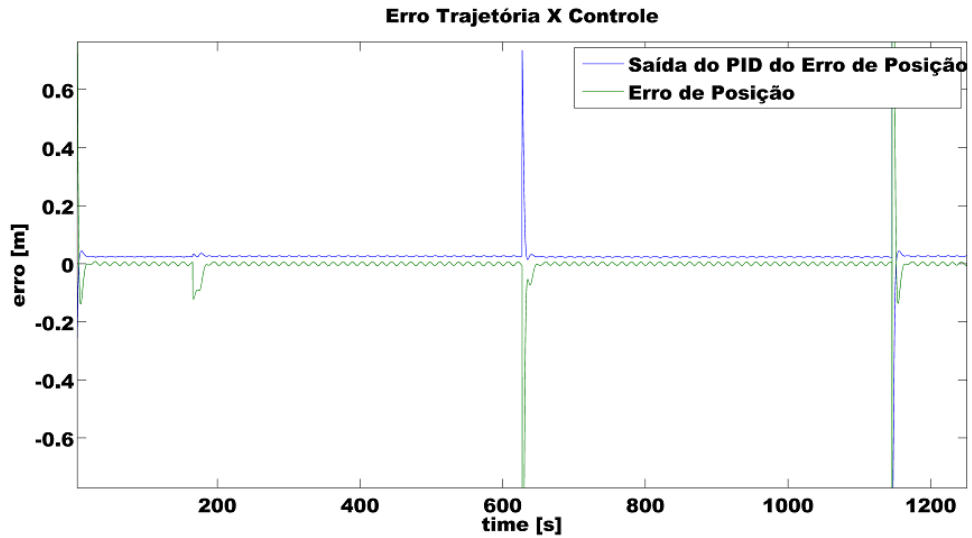


FIGURA 5.4: Aproximação visual dos sinais de erro de posição e de controle

Como pode ser analisado na figura 5.5, o controlador da posição realizou as ações de controle conforme foi projetado, fazendo com que o veículo acompanhe a trajetória mesmo sem sua correta orientação, rejeitando as perturbações⁶, e agindo rapidamente ao ser ligado a ação de controle integral.

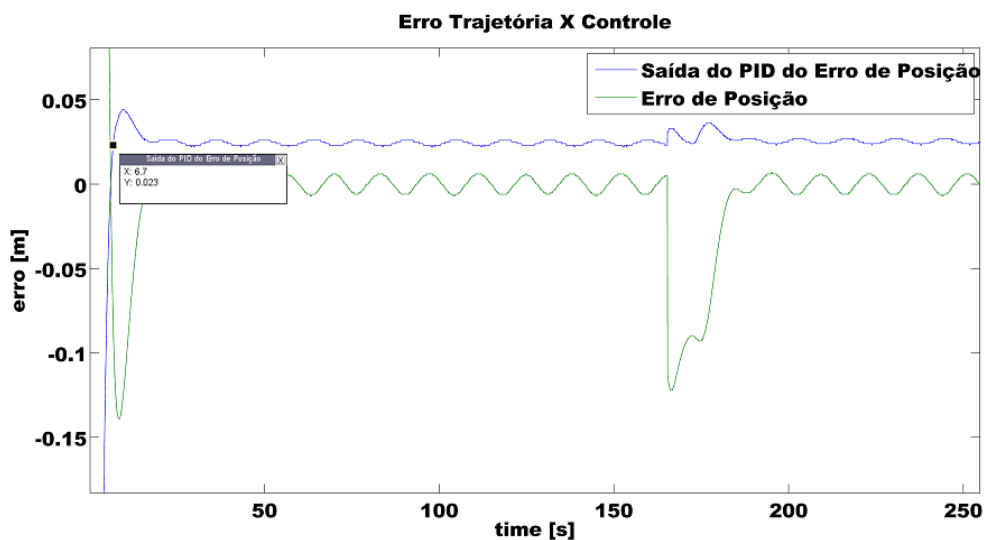


FIGURA 5.5: Demonstração do sinal em regime permanente

A figura 5.6 é a saída do controlador da orientação (na cor azul) pelo erro da orientação (na cor verde) demonstrado graficamente. No ativamento do piloto tem-se um erro na orientação grande, por isso esses picos de linha verde, e o pico de linha azul é a resposta da ação de controle no momento em que a diferença da orientação do veículo está mais

⁶as perturbações eram realizadas de maneira manual, de maneira que era segurado com a mão a borracha de acoplamento entre o atuador e o volante

distante da reta de referência, casos que acontecem no momento que o piloto não está em funcionamento e sendo guiado manualmente para a próxima guia.

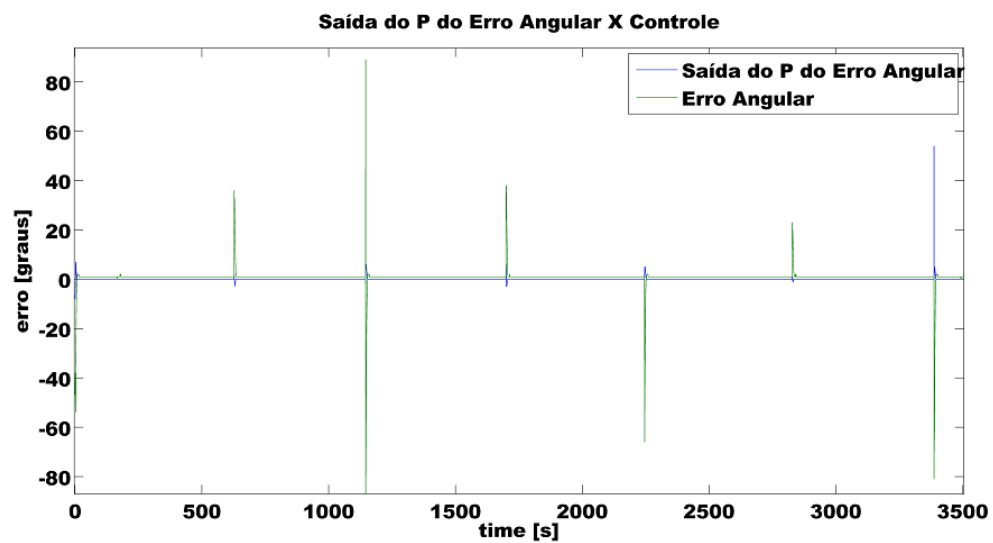


FIGURA 5.6: Sinal do erro de orientação e sinal de controle do controlador da orientação

O controlador da orientação executou a ação de controle conforme foi projetado, realizando a correta orientação da máquina agrícola sem permitir que o veículo sobrepassasse a guia de referência e demonstrando a teoria relacional dos valores dos ganhos visto na seção 4.4 como visto na figura 5.7. Até o veículo se aproximar da trajetória, antes do tempo de 7 segundos, a variável de processo decaí rapidamente, devido a variável manipulada estar com a correta orientação (roda esterçada) para o alinhamento da máquina agrícola.

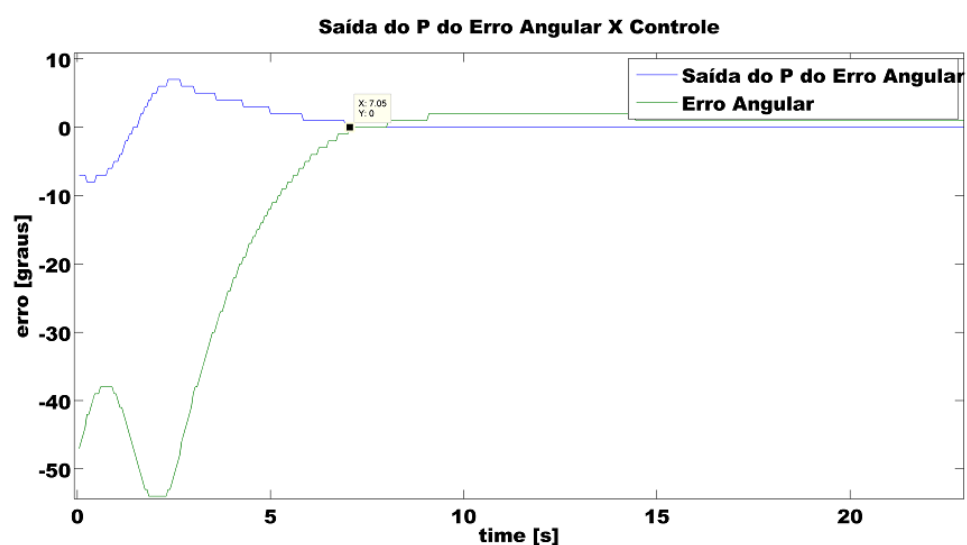


FIGURA 5.7: Saída do sistema pela saída do controle

Nessa mesma figura (Figura 5.7) é visto que, o sinal do erro de posição decai rapidamente devido a ação proporcional diminuir o tempo de aproximação da guia, e a ação derivativa atenuar, mesmo que pouco, a agressividade do sistema. Ao se atingir o tempo de 7 segundos que o sistema de auto-guiamento é atingido, o integrador do controlador de posição é ligado para que o K_{ip} atue no sistema de controle e conseqüentemente na variável de processo, acelerando o tempo de aproximação da trajetória e eliminando o erro estacionário da função proporcional do controlador de posição.

Devido a referência da malha de orientação⁷ não estar perfeitamente nula, a saída do controlador não será zero (desejado), pois o controlador entenderá que esse valor é uma referência. Entretanto essa sincronização e balanceamento das funções dos controladores, separando o tratamento dos erros, apresentou resultados interessantes para serem aprimorados no sistema em trabalhos futuros.

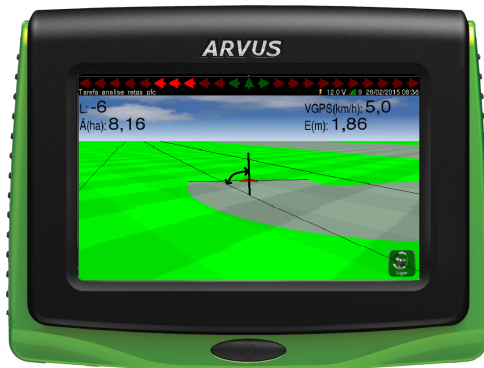
5.2 Saídas no Titanium

A simulação realizada para as análises da seção 5.1 também foram registradas do ponto de vista do operador da máquina agrícola. Essa demonstração é para um completo entendimento para o leitor em relação ao sistema, para saber o que acontece com a variável de processo e a variável medida nos principais momentos da operação agrícola.

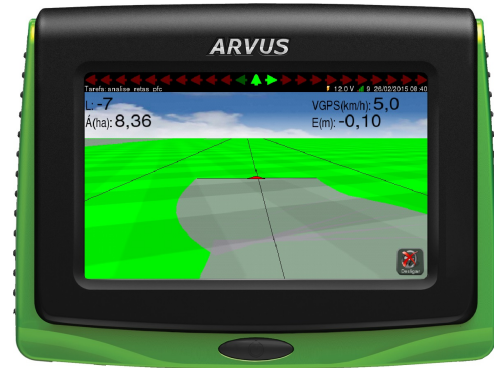
Na figura 5.8 são demonstradas quatro situações diferentes do piloto automático, visto que na primeira delas (5.8(a)) o algoritmo de controle não está sendo executado, e a máquina agrícola está com um ângulo de aproximadamente 30° em relação a guia de referência o que gera um distanciamento do veículo em relação a trajetória georreferenciada. No caso (b) da figura 5.8 o sistema de auto-guiamento foi desligado, depois sendo gerado um torque no volante pelo operador tirando a máquina agrícola da direção em que se encontrava, entretanto o piloto foi acionado e deu-se início a operação de alinhamento à trajetória.

Prosseguindo, a figura 5.1 (c) demonstra a operação do piloto logo após o procedimento de troca de guias, realizada para análise na seção 5.1 de diversas trajetórias retas. Por fim, a figura 5.1 (d) mostra o algoritmo de controle guiando uma máquina agrícola na

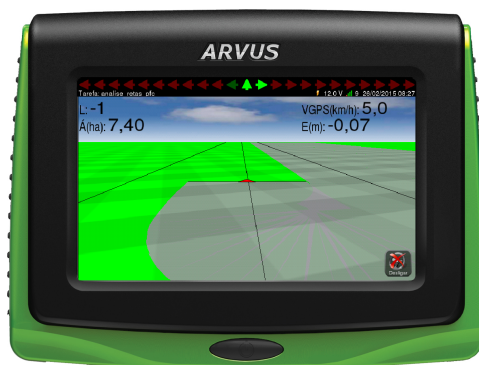
⁷ existe um erro angular residual de aproximadamente um grau devido a transformação de coordenadas do sistema de aquisição de coordenadas do GPS para o sistema de coordenadas local. A resolução deste problema ainda não é conhecida, entretanto ela não interfere significativamente no controle.



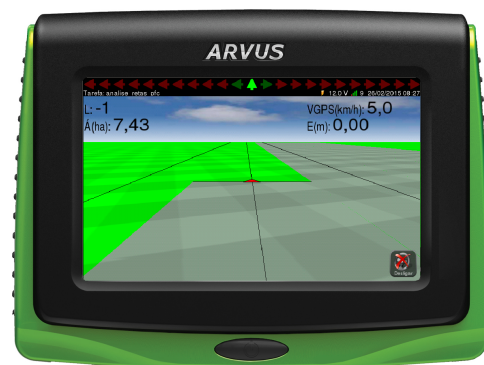
(a) Piloto desligado, e veículo se afastando da trajetória com um erro angular de aproximadamente 30° .



(b) Piloto no instante em que inicia a operação em um veículo que se distanciava com alta angulação em relação a reta de referência



(c) Algoritmo de controle sendo executado após entrar em uma reta paralela.



(d) Sistema de auto-guiamento em regime permanente.

FIGURA 5.8: Estados de operação do algoritmo de controle, vistos pelo Titanium.

guia georreferenciada, de forma perfeita. Deste modo finaliza-se o ciclo de funcionamento do sistema proposto no presente trabalho.

5.3 Análise do Sistema

1. média do sinal do erro: uma das análises feita foi, obter a média do valor do erro entre a trajetória referenciada e o trajeto realizado pela máquina agrícola, e que resultou no valor esperado pelos engenheiros da Hexagon, sendo ele de magnitude igual a 0,0026 metros. Para a orientação o erro nulo também era esperado, visto que tanto o simulador como o sistema de coordenadas do algoritmo de controle estão no mesmo sistema de coordenadas, sendo o resultado também satisfatório de $0,021^\circ$.

2. Integral do Valor Absoluto do erro (IAE): é um índice tipicamente usado para analisar a resposta de um sistema em ambiente de simulação, representado pela equação

$$IAE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (5.1)$$

e aplicada no erro de posição e posteriormente de orientação do sistema, resultando em um $IAE = 0$, do que se conclui que o controlador é muito satisfatório.

5.4 Trajetórias Além do Escopo do Projeto

Embora as imagens que serão mostradas a seguir não façam parte do escopo do projeto de fim de curso devido aos tipos de trajetórias referências, como curvas e circunferências, fica provado a variabilidade do controlador projetado, pois consegue controlar a máquina agrícola em guias de referência muito mais complexas do que simples segmentos de reta.

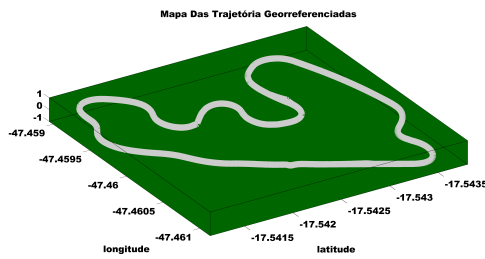
5.4.1 Circuito Adaptado do Autódromo de Interlagos

O circuito mostrado nas figuras 5.9(a) e 5.9(b) é uma adaptação da trajetória percorrida pela máquina agrícola com os mesmos parâmetros de controle vistos no decorrer do trabalho. A trajetória de referência foi dada pelo Titanium através da opção de curva adaptativa, que não foi desenvolvida nem implementada pelo estudante, entretanto a motivação de projetar um algoritmo de controle robusto para percorrer trajetórias curvas foi feita pelos engenheiros do produto da Hexagon Agriculture, e o resultado foi melhor do que o esperado, e pode ser visto na figura 5.9.

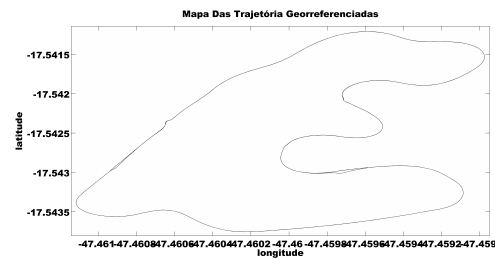
Devido ao sistema de controle não ter sido projetado para executar tal função, o que se foi entendido é que o algoritmo de controle aproximava as curvas por pequenas retas, e dessa maneira o algoritmo de controle executava a função para que foi projetado. Contudo era esperado, e aceitável um valor residual no valor do erro de posicionamento do sistema, como pode ser visto na figura 5.10. Também foi adquirido o valor médio do erro:

1. de posição através do Matlab sendo igual a -0,0060 metros;
2. pelo programa SAIG resultando em -0.0376 metros da posição desejada;

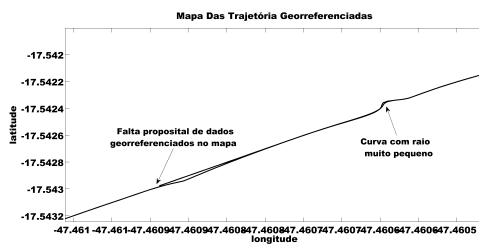
3. angular de 0.1215° pelo Matlab.



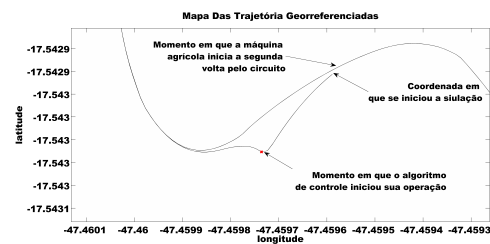
(a) Trajetória percorrida pela máquina agrícola



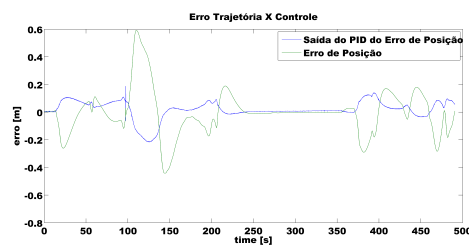
(b) Trajetória percorrida pela máquina agrícola



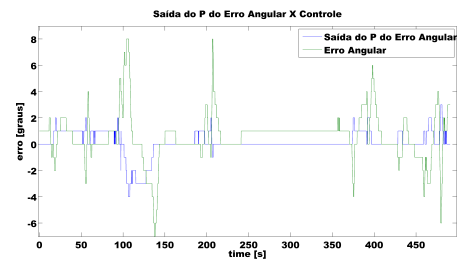
(c) Rejeição a perturbações



(d) Momento em que o algoritmo de controle é acionado, e seu funcionamento na mesma região quando em operação



(e) Saída do controlador (PID) de posição diante do erro de posição da trajetória



(f) Saída do controlador (P) da orientação diante do erro erro angular entre o yaw da máquina agrícola e a trajetória de referência

FIGURA 5.9: Interlagos

Sendo esta subseção apenas demonstrativa, não será feita uma análise crítica dos controladores, até porque não se distanciaria da que foi realizada na seção 5.1.



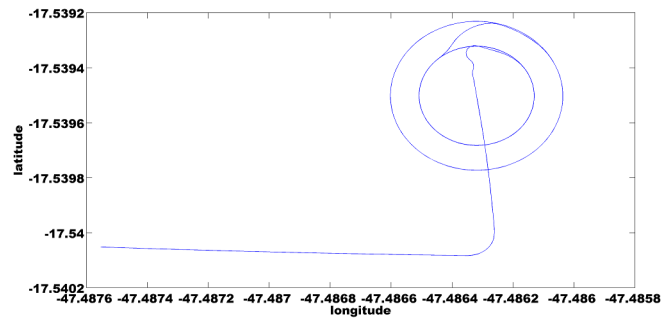
FIGURA 5.10: Algoritmo de controle em regime permanente para trajetórias curvas

5.4.2 Circunferências e Retas

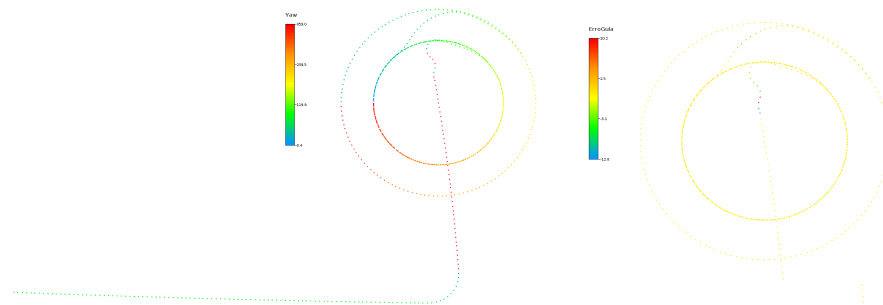
A trajetória curva foi fornecida pelo Titanium através da opção pivô, que não foi desenvolvida nem implementada pelo estudante, entretanto a motivação de projetar o algoritmo de controle foi o mesmo que o da subseção 5.4.1, e o resultado novamente foi satisfatório, podendo ser visto na figura 5.11.

As trajetórias mostradas na figura 5.11(a) são os percursos realizados pelo sistema de auto-guiamento desenvolvido. O piloto automático foi ligado no início da reta horizontal. A máquina agrícola realizou o percurso de uma reta com ângulo de 119° e após, o gerador de trajetória foi orientado (opção disponível pela interface do Titanium) a diminuir o ângulo da reta em 130° , e conseqüentemente o algoritmo de controle, gerou a quantidade de pulsos para o atuador girar o volante, resultando em uma diminuição de aproximadamente 90° (cotovelo entre as retas da figura 5.11(b)) no *yaw* do veículo e, novamente seguindo uma trajetória reta. Quando o piloto estava em operação (no guiamento para a referência reta), foi alterada a trajetória de referência para uma circunferência, sem o desligamento do algoritmo de controle, gerando um valor de erro alto na entrada do controle que atuou de maneira rápida e eficiente a máquina agrícola para a trajetória curva (Figura 5.11(d)) com pouca sobrepassagem da guia (visto que o integrador estava ligado) (Figura 5.11(e)).

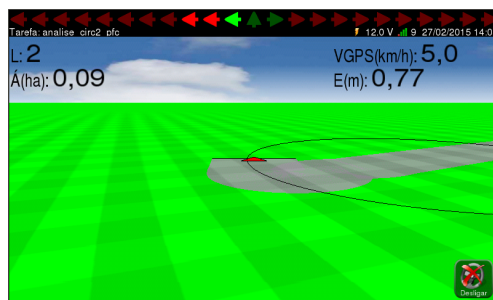
Devido ao sistema de controle não ter sido projetado para executar tal função, o que se foi entendido é que o algoritmo de controle aproximava as curvas por pequenas retas, e dessa maneira o algoritmo de controle executava a função a para que foi projetado.



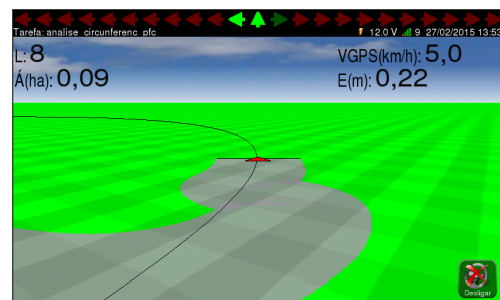
(a) Trajetórias realizadas pelo sistema de auto-guiamento.



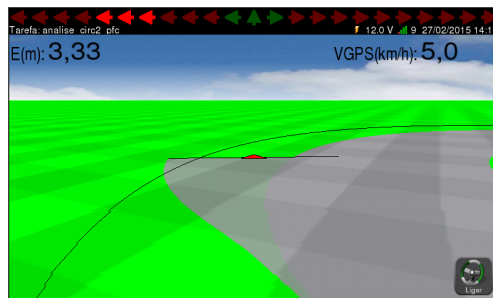
(b) Yaw da máquina agrícola durante a realização da trajetória. (c) Erro ponto a ponto da posição do veículo.



(d) Momento em que o gerador de trajetórias troca a trajetória de linha reta para guiar curva (pivô).



(e) Momentos de tempo depois da figura do item (d).



(f) Troca de trajetória pivô (circunferência) para a de guia lateral, com maior raio feita manualmente.



(g) Piloto automático em regime permanente para trajetórias curvas.

FIGURA 5.11: Trajetórias curvas realizadas pelo sistema de auto-esterçamento.

Contudo era esperado, e aceitável um valor residual no valor do erro de posicionamento

do sistema, como pode ser visto na figura 5.10. Também foi adquirido o valor médio do erro:

1. de posição através do Matlab sendo igual a 0,0050 metros;
2. pelo programa SAIG resultando em 0.076 metros da posição desejada;
3. angular de -0.3435° pelo Matlab.

Sendo esta subseção apenas demonstrativa, não será feita uma análise crítica dos controladores, até porque não se distanciaria da que foi realizada na seção 5.1.

5.5 Conclusões

A seção aqui finalizada, demonstrou os resultados do projeto de fim de curso para o algoritmo de controle projetado no capítulo 4. Os resultados foram considerados melhor do que o esperado, principalmente pelo tempo em que foi desenvolvido e realizado o projeto. Na presente seção foi provado e validado um controle robusto, capaz de rejeitar perturbações de forma rápida e efetiva, por fim respeitando o principal requisito do erro nulo em regime permanente sem sobrepassagem de guias para qualquer circunstância de operação do sistema de auto-guiamento de máquinas agrícolas.

Capítulo 6

Considerações Finais

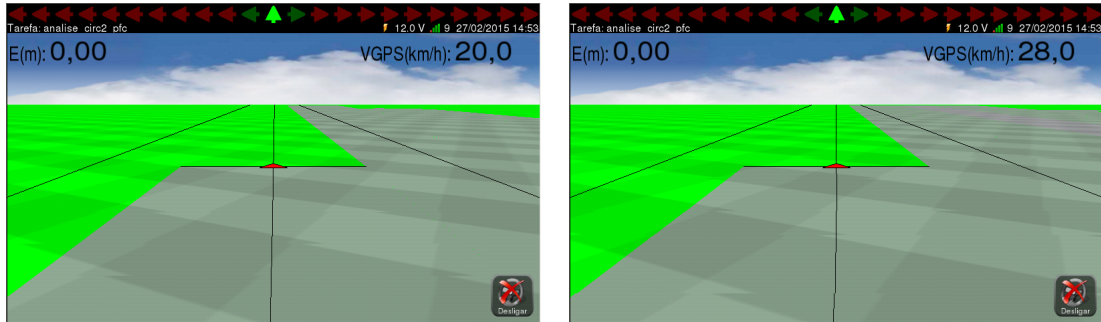
Diante dos resultados positivos do capítulo 5, ficou claro a perspectiva positiva da implementação desse algoritmo de controle, que poderá aprimorar o piloto automático comercializado pela empresa. Este algoritmo pode ser implementado e adaptado para diversos tipos de trajetórias, entretanto com adaptações nos controladores para cada tipo de referência.

6.1 Saturações

O controle atual, em ambiente de simulação não apresentou saturações no controle em nenhuma das situações ensaiadas, contudo para trabalhos futuros será de fundamental importância a implementação de saturadores, para o giro máximo a ser realizado pela roda de cada tipo de veículo, e conseqüentemente do giro máximo do volante.

6.2 Algoritmo de Escalonamento de Ganhos

No presente trabalho os testes foram realizados e validados para uma velocidade de 5 km/h, entretanto com algumas restrições o algoritmo funcionou em velocidades maiores (Figura 6.1).



(a) Algoritmo de controle em operação para velocidade de 28 km/h

(b) Algoritmo de controle em operação para velocidade de 20 km/h

FIGURA 6.1: Algoritmo de controle em operação para velocidades altas

Essas restrições¹ para funcionamento em velocidades altas, são impossíveis de serem descartados no campo, o que conseqüentemente não valida o algoritmo para o funcionamento em velocidades diferentes de 5 km/h.

Como o controlador não se mostrou robusto no quesito variação da velocidade, vale a pena a realização de um escalonador de ganhos para que as máquinas agrícolas possam ser devidamente guiadas e mantidas na referência para diversos tipo de ponto de operação da velocidade.

6.3 Implementação no Trator de Testes da Empresa

O algoritmo de controle que foi proposto no capítulo 5 funciona muito bem nas situações em que se consideram o sinal de posicionamento do GPS sem falhas e sem atraso, sem restrições físicas de válvulas e acionamentos, sem restrições de giro da roda e de máximo giro em torno do próprio eixo (yaw), ou seja o algoritmo deve ser adaptado com as saturações do trator ou caso contrário pode danificar algum dos componentes aqui descrito e principalmente colocar o operador em risco de vida.

6.4 Controle para Trajetórias Curvas

Como perspectiva de projeto principal, fica à respeito da implementação de um controle exclusivo para trajetórias curvas, entretanto continuando com o mesmo tipo de variável

¹uma simples perturbação no volante já desestabilizava o sistema

na entrada do atuador (curvatura), para que o algoritmo de controle possa ser compatível com o sistema ISOBUS.

6.5 Implementação de Modelo Dinâmico

No caso do erro entre a guia georreferenciada e a máquina agrícola não estar dentro das especificações necessárias na agricultura de precisão, a modelagem matemática dinâmica das máquinas, além da modelagem matemática cinemática seria uma boa opção a ser implementada.

6.6 Considerações Finais

O projeto de um algoritmo de seguimento de trajetórias georreferenciadas para máquinas agrícolas foi muito útil para o estagiário de pesquisa e desenvolvimento, devido a constante aquisição de conhecimentos que capacitaram e aumentaram seu capital humano. O estudante Tiago Alencar Gonçalves muito agradece a Arvus Tecnologia (atual Hexagon Agriculture) pelas oportunidades.

Referências Bibliográficas

- [1] Cláudio Rosito Jung, Fernando Santos Osório, C Kelber, and F Heinen. Computação embarcada: Projeto e implementação de veículos autônomos inteligentes. *Anais do CSBC*, 5:1358–1406, 2005.
- [2] Jeff Wit, Carl D Crane, and David Armstrong. Autonomous ground vehicle path tracking. *Journal of Robotic Systems*, 21(8):439–449, 2004.
- [3] Angus S. G. Mohinder ; R. W. Lawrence; P. Andrews. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. 2 edition, 2007.
- [4] Joao Francisco Galera Monico. *Posicionamento pelo Navstar-GPS*. Unesp, 2000.
- [5] José Paulo Molin. Congresso brasileiro de agricultura de precisão. In *Tendências da Agricultura de Precisão no Brasil*, pages 1–10, 2004.
- [6] Arvus Tecnologia. Agricultura de precisão, . URL http://www.arvus.com.br/publicacoes_exibe.html?id=1.
- [7] José Paulo Molin. Engenharia agrícola. *Orientação de Aeronave Agrícola por DGPS Comparada com Sistema Convencional por Bandeiras*, 18(2):62–70, 1998.
- [8] Pecuária e Abastecimento Ministério da Agricultura. Boletim técnico, 2013. URL http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/Boletim%20tecnico.pdf.
- [9] Arvus Tecnologia. Titanium barra de luz, . URL http://arvus.com.br/guia_virtual_titanium_bl.html?linha=agricola.
- [10] Arvus Tecnologia. Titanium, . URL <http://arvus.com.br/produto.html?linha=agricola>.

- [11] Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet, and Michel Berducat. Autonomous robots. *Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS*, 13(1):53–71, 2002.
- [12] Apresentação institucional, February 2015. URL <http://www.arvus.com.br/apresentacao.html>.
- [13] Parceria entre cooperativa e empresa de tecnologia beneficia mais de cem produtores de arroz no sul do estado, 2006. URL http://arvus.com.br/noticias_exibe.html?id=2.
- [14] Hexagon anuncia aquisição da arvus tecnologia sa, 2014. URL http://www.arvus.com.br/noticias_exibe.html?id=83.
- [15] GPS Reflections Research Group. How gps works - gnss.
- [16] Mieczyslaw Gregory Bekker. Theory of land locomotion. 1956.
- [17] Biopact Team. Brazilian law proposal would make mechanised sugarcane harvesting obligatory, january 2008. URL <http://news.mongabay.com/bioenergy/2008/01/brazilian-law-proposal-would-make.html>.
- [18] Eliane Silva. O desafio das colhedoras de cana, 2013. URL <http://www.novacana.com/n/cana/maquina-agricola/desafios-colhedoras-cana-110613/>.
- [19] John Deere Team. Tratores john deere linha 5000. URL http://www.deere.com.br/pt_BR/industry/agriculture/agriculture.page?
- [20] Congresso brasileiro de agricultura de precisão-conbap 2014 são pedro-sp, 14 a 17 de setembro de 2014.
- [21] Funcionalidade isobus. URL <http://www.aef-online.org/fileadmin/MEDIA/downloads/blaetterkatalog/en/index.html>.
- [22] Agricultural industry electronics foundation, 2008. URL <http://www.aef-online.org/>.
- [23] Leticia Ane Suzuki;Barbosa José Carlos Farias, Paulo Roberto Silva; Nociti and Dilermando Perecin. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade em pomares cítricos usando geoestatística. *Revista Brasileira de Fruticultura*, pages 235–241, 2003.

- [24] G.V. Raffo. *Algoritmos de Controle Preditivo para Seguimento de Trajetórias de Veículos Autônomo*s. PhD thesis, 2005.
- [25] International journal of advanced robotic systems. URL http://www.intechopen.com/journals/international_journal_of_advanced_robotic_systems.
- [26] Hiromune Namie; Osamu Okamoto; Chunming Fan; Shinji Tanaka; Akio Yasuda. Development and experimental study of a network-based rtk-gps positioning system using a satellite communication line. *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 89, 2006. doi: 10.1002/ecja.20298.
- [27] Sistema de correção do sinal de gps. URL <http://grandes-cultures.reussir.fr/reussir/public/index.php>.
- [28] Adriana Goulart dos Santos. *Método para o georreferenciamento de mapas urbanos baseado na atribuição de pesos aos pontos de controle*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- [29] HAN Qing-jue and LIU Shao-jun. Path tracking control of tracked vehicle. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 10(6), 2013.
- [30] M Ahmad, Vladimir Polotski, and Richard Hurteau. Path tracking control of tracked vehicles. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00 International Conference on*, volume 3, pages 2938–2943, 2000.
- [31] Eun-Hwan Shin and Naser El-Sheimy. *Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications*. University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, 2001.
- [32] Bernardo Severo Katsuhiko Ogata. *Engenharia de Controle Moderno, 3a Edição*.
- [33] João Lourenço. Sintonia de controladores pid.