

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

RÔMOLO LASCH

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PLATAFORMA
PARA CONTROLE DE SEGUIMENTO DE CAMINHO
BASEADO EM GNSS PARA VEÍCULO AGRÍCOLA**

**PORTO ALEGRE-RS
2018**

RÔMOLO LASCH

Análise de Viabilidade de Plataforma para Controle de Seguimento de Caminho Baseado em GNSS para Veículo Agrícola

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado à Banca Julgadora como pré-requisito para aprovação na atividade.

Orientador: Prof. Dr. Pedro R. B. Fernandes

**PORTO ALEGRE - RS
2018**

RÔMOLO LASCH

Análise de Viabilidade de Plataforma para Controle de Seguimento de Caminho Baseado em GNSS para Veículo Agrícola

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado à Banca Julgadora como pré-requisito para aprovação na atividade.

PORTO ALEGRE, 25 DE JUNHO DE 2018.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Eduardo A. Perondi

Prof. Dr. Rafael A. C. Laranja

Prof. Dr. Renato V. B. Henriques

Orientador: Prof. Dr. Pedro R. B. Fernandes

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me fornecer saúde e a São Pedro pelas condições climáticas favoráveis para a realização dos experimentos.

Ao meu orientador, Prof. Pedro, pelas valiosas dicas e sugestões.

Aos meus pais, Paulo e Adriana, pelo apoio incondicional ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus avós, Ivo e Teresinha, por cederem os tratores utilizados nesse trabalho e à minha vó Neusa pelo recebimento de todas as encomendas de eletrônicos do trabalho.

RESUMO

Neste trabalho, foi analisada a viabilidade de uma plataforma de controle de baixo custo, projetada e desenvolvida para um veículo agrícola. Essa plataforma busca direcionar e/ou manter o veículo em um caminho previamente definido (*path following*), através da geração de um sinal de comando para o ângulo de esterçamento das rodas dianteiras. O funcionamento da plataforma é baseado no Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), do qual se obtêm as coordenadas do veículo usando um receptor de baixo custo acoplado ao mesmo. A partir desse sinal, um modelo no *software* Simulink compara a posição momentânea do veículo em relação ao caminho previamente definido, e, através da aplicação de uma lei de controle, informa qual o ângulo de esterçamento que deve ser aplicado no veículo para o seguimento do caminho. Foram implementados dois sistemas com diferentes sensores para obter o valor do ângulo de esterçamento: o primeiro utiliza um sensor laser de medição de distância linear; e o segundo, um *encoder* absoluto. A aplicação da lei de controle ocorreu de forma manual, visto que não estava prevista na proposta do trabalho a disponibilidade de um atuador automático. Cinco experimentos foram realizados, nos quais se estudou a estabilidade da resposta do sistema, bem como a influência da variação da velocidade no desempenho do sistema de controle. Verificou-se que tanto o sistema que utiliza o *encoder*, quanto o que utiliza o sensor laser apresentaram estabilidade e convergência para o caminho de referência definido, mas o desvio lateral médio encontrado foi de até 2,564 m em relação à referência em regime estacionário, o que ocorreu principalmente devido às simplificações de modelagem e os equipamentos de baixo custo utilizados. Portanto, apesar de funcional, a plataforma não apresenta viabilidade para aplicação na Agricultura de Precisão, pois não apresenta a acurácia necessária para este fim.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão, sinal GNSS, controle não-linear, controle de seguimento de caminho, veículo agrícola.

ABSTRACT

In this paper, the viability of a low-cost control platform, designed and developed for an agricultural vehicle, was analyzed. The aim of this platform is to direct and/or to keep the vehicle on a previously defined path (path following) by generating a command signal for the front wheels' heading angle. The operation of the platform is based on the Global Navigation Satellite System (GNSS), which provides the vehicle coordinates to a low-cost receiver attached on it. Taking this signal, a model on Simulink compares the vehicle's instantaneous position relating to the (previously defined) reference path, and, through the application of a control law, informs the front wheel heading angle that must be applied on the vehicle for path following. Two systems were implemented with different sensors to read the wheel heading angle: the first uses a linear distance measuring laser sensor, and the second uses an absolute encoder. The input of the control law on the vehicle occurred manually, since an automatic actuator was not available for this work. Five experiments were accomplished in order to evaluate the system response stability as well as the velocity influence on system performance. It was verified that both platforms (based on the encoder and on the laser sensor) were stable and converged to the defined reference path, but both presented an average lateral deviation up to 2,564 *m* on steady state, which appeared mainly due to the modeling assumptions and low-cost devices that were acquired. Therefore, although the control platform was functional, its use is not pointed as a viable application on Precision Agriculture, because the platform does not present the demanded accuracy for this purpose.

Key-words: Precision Agriculture; GNSS signal; nonlinear control; path following control; agricultural vehicle.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Piloto automático e seus componentes: (1) sensor de posição, (2) controlador, (3) sensor de ângulo das rodas, (4) válvula eletro-hidráulica. Fonte: Oliveira (2009)..... | 15 |
| Figura 2: Plano tangente local. Fonte: Lu, Tsiotras e You (2017) - adaptado. | 19 |
| Figura 3: Modelo cinemático do veículo. Fonte: BERDUCAT, <i>et al.</i> (2002) - adaptado. | 22 |
| Figura 4: Esquema do modelo projetado no Simulink. Fonte: Autor..... | 25 |
| Figura 5: Tratores utilizados: MF 4292 HD (a) e MF 275 (b). Fonte: Autor..... | 26 |
| Figura 6: Fixação do receptor GPS nos tratores MF4292(a) e MF275(b). Fonte: Autor. . | 27 |
| Figura 7: Procedimento realizado para calibração do sensor IR. Fonte: Autor..... | 28 |
| Figura 8: Gráfico de calibração do sensor IR. Fonte: Autor. | 29 |
| Figura 9: Sensor IR instalado e variáveis utilizadas para equacionamento. Fonte: Autor. | 29 |
| Figura 10: <i>Encoder</i> instalado. Fonte: Autor. | 31 |
| Figura 11: Tela exibida durante condução manual do veículo. Fonte: Autor. | 32 |
| Figura 12: Caminho utilizado para os experimentos (de A até B). Fonte: Autor..... | 33 |
| Figura 13: Referência e trajetória dos tratores no Teste I (MF 4292) e Teste II (MF 275). Fonte: Autor..... | 34 |
| Figura 14: Desvio lateral ao longo do tempo nos teste I II. Fonte: Autor..... | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 15: Diferença de orientação no Teste I e Teste II. Fonte: Autor..... | 35 |
| Figura 16: Erro no seguimento do sinal de controle no Teste I (a) e no Teste II (b). Fonte: Autor..... | 36 |
| Figura 17: Caminho de referência e percurso do veículo no Teste III. Fonte: Autor..... | 37 |
| Figura 18: Estados do sistema (l e θ) no Teste III. Fonte: Autor. | 38 |
| Figura 19: Sinal de controle (da lei de controle e aplicado) no Teste III. Fonte: Autor.... | 38 |
| Figura 20: Referência e trajetória do trator no Teste IV. Fonte: Autor..... | 39 |
| Figura 21: Desvio lateral l no Teste IV. Fonte: Autor. | 39 |
| Figura 22: Diferença de orientação θ e sinal de controle no Teste IV. Fonte: Autor. | 40 |
| Figura 23: Referência & trajetória (a) e desvio lateral l (b) no Teste V. Fonte: Autor.... | 41 |
| Figura 24: Diferença de orientação θ e sinal de controle no Teste V. Fonte: Autor. Trocar amarelo. | 41 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| AP | Agricultura de Precisão |
| DGPS | GPS Diferencial (<i>Differential GPS</i>) |
| ECEF | Centrado e Fixo no Centro da Terra (<i>Earth-centered Earth-Fixed</i>) |
| GLONASS | Sistema de Satélites de Navegação Global |
| GNSS | Sistema de Navegação Global por Satélite (<i>Global Navigation Satellite System</i>) |
| GPS | Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>) |
| IRC | Centro de Rotação Instantâneo (<i>Instantaneous Rotational Center</i>) |
| IR | Infravermelho |
| NMEA | <i>National Marine Electronic Association</i> |
| RTK | Cinemático em Tempo Real (<i>Real-Time Kinematic</i>) |
| SIG | Sistema de Informações Geográficas |
| SSI | Interface Serial Síncrona (<i>Serial Synchronous Interface</i>) |
| WGS 84 | Sistema Geodésico Global 1984 (<i>World Geodetic System 1984</i>) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|---|
| N_0 | comprimento da normal WGS 84 (m) |
| a | semieixo maior da Terra (m) |
| e | excentricidade |
| λ | latitude (rad) |
| φ | longitude (rad) |
| h | altitude (m) |
| X, Y, Z | coordenadas ECEF (m) |
| E, N, U | coordenadas em um plano local (m) |
| C | função caminho de referência (m) |
| M | posição atual do veículo (m) |
| M' | projeção ortogonal do veículo sobre o caminho de referência (m) |
| l | desvio lateral (m) |
| $curv(s)$ | função curvatura (m^{-1}) |
| s | distância curvilínea (m) |
| θ_r | orientação de referência do caminho (rad) |
| v | velocidade do veículo (m/s) |

| | |
|------------------------|---|
| θ_v | orientação do veículo (<i>rad</i>) |
| ω | velocidade angular do veículo (<i>rad/s</i>) |
| \dot{l} | derivada temporal do desvio lateral (<i>m/s</i>) |
| \dot{s} | derivada temporal da distância curvilínea (<i>m/s</i>) |
| $\tilde{\theta}$ | diferença de orientação entre o veículo e o caminho (<i>rad</i>) |
| $\dot{\tilde{\theta}}$ | derivada temporal da diferença de orientação entre veículo e caminho (<i>rad/s</i>) |
| δ | ângulo de esterçamento (<i>rad</i>) |
| d_{IRC} | distância entre o IRC e M' (<i>m</i>) |
| d | distância entre os eixos do veículo (<i>m</i>) |
| K_d | ganho derivativo do controlador |
| K_p | ganho proporcional do controlador |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1 - Introdução | 14 |
| 1.1 <i>Motivação</i> | 15 |
| 1.2 <i>Objetivos.....</i> | 16 |
| 1.3 <i>Organização do trabalho.....</i> | 16 |
| Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica | 17 |
| 2.1 <i>Sistemas de Navegação Global por Satélites (GNSS)</i> | 17 |
| 2.1.1 <i>Erros e correções</i> | 18 |
| 2.1.2 <i>Transformação para coordenadas um plano tangente local.....</i> | 18 |
| 2.2 <i>Tipos de controle de movimentação.....</i> | 20 |
| 2.2.1 <i>Estabilização em pontos (Point Stabilization)</i> | 20 |
| 2.2.2 <i>Rastreamento de trajetória (Trajectory Tracking)</i> | 20 |
| 2.2.3 <i>Seguimento de caminho (Path Following)</i> | 20 |
| 2.2.4 <i>Rastreamento de trajetória X seguimento de caminho</i> | 21 |
| 2.3 <i>Modelo Cinemático</i> | 21 |
| 2.4 <i>Controle</i> | 23 |
| Capítulo 3 - Metodologia..... | 24 |
| 3.1 <i>Modelo no Simulink.....</i> | 24 |
| 3.2 <i>Tratores Utilizados</i> | 25 |
| 3.3 <i>Receptor GNSS</i> | 26 |
| 3.4 <i>Leitura do ângulo da Roda do Veículo</i> | 27 |
| 3.4.1 <i>Sensor Infravermelho (IR).....</i> | 28 |
| 3.4.2 <i>Encoder</i> | 30 |
| 3.5 <i>Definição do Caminho.....</i> | 31 |
| 3.6 <i>Controle</i> | 31 |
| 3.6.1 <i>Projeto do controlador</i> | 32 |
| 3.6.2 <i>Seguimento do sinal de controle</i> | 32 |
| Capítulo 4 - Resultados e Discussões..... | 33 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1 Validação de Estabilidade para Ambos os Veículos | 34 |
| 4.2 Mudança de Velocidade..... | 37 |
| 4.3 Verificação da Distância de Assentamento | 38 |
| 4.4 Manutenção do Seguimento de Caminho | 40 |
| Capítulo 5 - Conclusões..... | 42 |
| 5.1 Trabalhos Futuros..... | 42 |
| Referências Bibliográficas | 44 |
| Apêndice A – Equacionamento sensor Laser..... | 48 |
| Anexo A - Sistemas Encadeados | 50 |
| Anexo B - Dedução da Lei de Controle | 53 |

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009) a Agricultura de Precisão (AP) é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial de propriedades do solo e das plantas encontradas nas lavouras visando o aumento da produtividade, bem como, a sustentabilidade e proteção do meio ambiente. Trata-se de um sistema de manejo integrado de informações e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento que considere a variabilidade espacial da produção.

Dentro do conjunto de ferramentas que podem ser utilizadas na agricultura de precisão encontram-se o Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*), o Sistema de Informações Geográficas (SIG), instrumentos e sensores para medidas ou detecção de parâmetros ou de alvos de interesse na lavoura, entre outros. (EMBRAPA, 2013).

Segundo Hansen, Más e Zhang (2010), a automação de veículos agrícolas complementa o conceito de Agricultura de Precisão. A disponibilidade de uma grande quantidade de dados e sensores aumenta a precisão e eficiência das tradicionais tarefas agrícolas. Algumas das possíveis funcionalidades que podem ser incorporadas à nova geração de veículos incluem: 1) Navegação automatizada (compreendendo um assistente para direção e para evasão de colisões); 2) Controle automático do implemento (incluindo alinhamento, controle de dosagem, plantio/fertilização precisa, etc.); 3) Mapeamento e monitoramento, adquirindo e armazenando dados para uso futuro; 4) Alertas de segurança automáticos, como por exemplo, detectando quando o operador dormiu ou quando está dirigindo muito rápido na proximidade de outros veículos ou construções e; 5) Mensagens de rotina, para mandar informações atualizadas para a fazenda sobre a produção e qualidade da safra, condições de colheita, *status* da manutenção do veículo, etc.

Dentre as funções automatizadas, a navegação é a tarefa que mais alivia o motorista, permitindo que o veículo seja conduzido sem muito esforço para o seguimento de caminho (HANSEN, MÁ S E ZHANG, 2010). A Figura 1 mostra um exemplo de sistema de navegação com direcionamento automático.



Figura 1: Piloto automático e seus componentes: (1) sensor de posição, (2) controlador, (3) sensor de ângulo das rodas, (4) válvula eletro-hidráulica. Fonte: Oliveira (2009).

1.1 MOTIVAÇÃO

Aplicações com GNSS são usadas em todas as fases do ciclo de vida agrícola e representam um fator de auxílio para o gerenciamento das propriedades rurais. De 2006 a 2016, sistemas de navegação para tratores constituíram a aplicação mais difundida (com 41% dos produtos expedidos) dentre aquelas que utilizam dispositivos baseados em GNSS na agricultura, contando mais de 700.000 unidades instaladas em 2016 (GSA, 2017). Uma pesquisa realizada por Borghi *et al.* (2016) revelou que as tecnologias mais usadas no Brasil por produtores que adotam a Agricultura de Precisão são a navegação GNSS com controle manual (89%), navegação GNSS com controle automático (56%) e mapas de produtividade (56%).

Além de produtos comerciais, diversos trabalhos acadêmicos estão relacionados com a área. Berducat *et al.* (2002), assim como Cariou *et al.* (2001), utilizam a combinação de GNSS com método cinemático em tempo real (RTK - *Real-Time Kinematic*) e um sistema inercial para desenvolver um piloto automático para seguimento de caminho. Cai *et al.* (2018) empregam estas mesmas técnicas para o rastreamento de trajetória, enquanto que Oksanen (2013) utiliza em um veículo autônomo para plantio. Tais métodos exigem bastante recursos de *hardware* e de *software* para a sua implementação.

Contudo, verificam-se esses equipamentos não estão acessíveis para muitos produtores. Segundo Gong (2017), constituem motivos para a falta de máquinas agrícolas modernas nos campos: a pouca quantidade de terra arável para cada agricultor, que se torna muito pequena para o uso de grandes máquinas, e; a renda anual de cada família rural, que é muito baixa para aquisição de grandes máquinas. Na pesquisa de Borghi *et al.* (2016), os agricultores relataram que, embora os valores cobrados sejam coerentes com a tecnologia adquirida, o custo necessário para a adoção da agricultura de precisão continua alto. De fato, atualmente no país constata-se que o custo de antenas GNSS comerciais é superior em mais de dez vezes o custo de receptores simples. Por outro lado, deve-se ter em mente que equipamentos de baixo custo apresentam um desempenho mais modesto, e algumas vezes insatisfatório, dependendo da aplicação desejada.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste em analisar a viabilidade técnica do uso de uma plataforma de controle de baixo custo baseada em GNSS para seguimento de caminho. Especificamente, deseja-se avaliar qual acurácia é possível alcançar nestas condições. Para tanto, será realizado o seu projeto, implementação da plataforma num sistema real e posterior estudo dos resultados experimentais obtidos. Esta plataforma deverá informar o ângulo de esterçamento necessário a ser aplicado de forma manual em um veículo agrícola para que ele rastreie e siga um caminho predeterminado. Visando ao baixo custo, o sensoriamento de sua posição deve ocorrer utilizando um único receptor GNSS.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Organizou-se o trabalho em capítulos. No Capítulo 2 serão detalhados os conceitos, definições, equações, demais conhecimentos teóricos utilizados para a realização do projeto, além de apresentar o que vem sendo feito na área. No Capítulo 3, serão descritos os equipamentos e dispositivos utilizados, bem como os procedimentos adotados para a implantação do sistema. A fim de validar o funcionamento desse sistema, realizaram-se diversos experimentos, os quais terão seus resultados expostos e analisados no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões obtidas com base na proposta inicial do trabalho, além das sugestões de alterações e/ou adições a serem feitas em trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se neste capítulo de forma breve o Sistema de Navegação Global por Satélites ou GNSS, bem como as considerações necessárias para sua utilização como sensor de posicionamento do veículo para a plataforma. Também são detalhados os tipos de controle comumente utilizados em veículos autônomos. Mostram-se equações e premissas adotadas para elaboração do modelo cinemático do veículo, bem como aquelas adotadas para a definição de uma equação para lei de controle.

2.1 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITES (GNSS)

Adota-se o termo "Sistemas de Navegação Global por Satélite" (GNSS) para se referir a um conjunto de satélites que transmitem dados de posição e tempo para receptores situados na terra que, então, utilizam esses dados para determinar a localização. São exemplos de sistemas GNSS o Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*), dos EUA, o Sistema de Satélites de Navegação Global (GLONASS), da Rússia, o Sistema de Satélite de Navegação Galileo, da Europa, e o Sistema BeiDou de Navegação por Satélite, da China (GSA, 2018).

De acordo com Correia (2003), o GNSS é baseado no princípio de posicionamento conhecido como triangulação. Para que ela ocorra de maneira apropriada são necessários, no mínimo, um conjunto de quatro satélites. Desses, três são necessários para determinar a posição, e o quarto envia um sinal ao receptor que o auxilia a determinar o tempo preciso em que ocorrem as emissões desses sinais, evitando, assim, que o receptor necessite de um relógio atômico para determinação do tempo. Deste modo, um sistema de posicionamento global pode averiguar, de forma segura, a posição absoluta de um dado usuário.

2.1.1 Erros e correções

Elsheikh, Karaim e Noureldin (2018) citam algumas possíveis fontes de erro para o sinal GNSS: erros relacionados com os relógios do satélite e receptor; erros na propagação, como atraso do sinal ao atravessar as camadas da atmosfera terrestre e multipercursos (recepção de mais de um sinal proveniente da mesma fonte); bloqueio e falsificação de sinal. Outro possível erro no posicionamento é devido a uma variação no ângulo de rolamento do veículo, que produz mudanças importantes em sua velocidade e posição (BERDUCAT *et al.*, 1999).

Oliveira (2009) explica que, para contornar essa degradação do sinal obtido com um posicionamento absoluto, foi criado o posicionamento diferencial, que pode ser realizada com o método cinemático em tempo real (RTK - *Real-Time Kinematic*) ou GPS diferencial (DGPS - *Differential GPS*), por exemplo.

2.1.2 Transformação para coordenadas um plano tangente local

Receptores GPS fornecem a posição online do veículo em coordenadas geodésicas, conhecidas como latitude (λ), longitude (ϕ) e altitude (h). O Sistema Geodésico Global de 1984 (WGS 84 - *World Geodetic System 1984*), desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA, define um elipsoide de revolução que modela o formato da Terra, sobre o qual as coordenadas geodésicas são definidas. (HANSEN, MÁ S E ZHANG, 2010).

O WGS 84 também define um sistema de coordenadas cartesiano fixado na Terra com sua origem situada no centro de massa do planeta. Esse sistema é chamado de Centrado e Fixo no Centro da Terra (ECEF - *Earth-Centered Earth-Fixed*) e fornece um modo alternativo de localização de um ponto na superfície terrestre com as coordenadas cartesianas usuais (X , Y e Z). O eixo Z coincide com o eixo de rotação da Terra e, portanto, passa pelos seus polos; o eixo X no plano da linha do Equador e passa pelo Meridiano de Greenwich; e o eixo Y também fica no plano da linha do Equador e completa o sistema pela regra da mão direita (HANSEN, MÁ S E ZHANG, 2010).

Entretanto, é mais prático definir um sistema de coordenadas local, visando a facilitar as tarefas que utilizam GNSS. As coordenadas locais são medidas ao longo de três eixos ortogonais em uma configuração cartesiana gerada pela alocação de um plano tangente à superfície terrestre em um ponto escolhido pelo usuário e definido como a origem do sistema. Tanto o sistema ECEF quanto o plano tangente local podem ser observados na Figura 2.

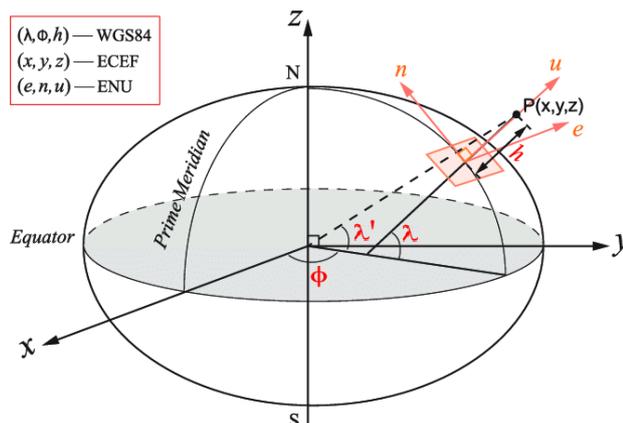


Figura 2: Plano tangente local. Fonte: Lu, Tsiotras e You (2017) - adaptado.

Os receptores GNSS tipicamente fornecem coordenadas geodésicas, enquanto que, geralmente, para projetos de controle de veículos terrestres, usa-se o sistema com o plano tangente local. Nesse sentido, faz-se necessário uma transformação de coordenadas. O primeiro passo consiste em obter um elipsoide como referência para o modelo do formato da Terra. Utilizando os parâmetros fundamentais do WGS 84 (HANSEN, MÁ S E ZHANG, 2010):

$$N_0(\lambda) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\lambda)}} \quad (1)$$

onde λ representa a latitude, $a = 6.378.137,0 \text{ m}$ é o semieixo maior da Terra, $e = 0,818$ é a excentricidade e N_0 representa o comprimento da normal (para o ponto P da Figura 2).

A transformação do sistema de coordenadas geodésico para o ECEF é dada por:

$$X = (N_0 + h) \cos(\lambda) \cos(\varphi), \quad (2)$$

$$Y = (N_0 + h) \cos(\lambda) \sin(\varphi), \quad (3)$$

$$Z = [N_0(1 - e^2) + h] \sin(\lambda). \quad (4)$$

onde X , Y e Z são as coordenadas cartesianas no sistema ECEF mostrado na Figura 2.

Já a transformação das coordenadas ECEF para as coordenadas no plano local necessita primeiramente da definição, por parte do usuário, da origem do sistema de coordenadas do plano tangente (X_0, Y_0 e Z_0). Feito isso, as coordenadas cartesianas no plano tangente local E, N, U (conforme a Figura 2) podem ser obtidas utilizando a transformação:

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen}(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ -\text{sen}(\lambda) \cos(\phi) & -\text{sen}(\lambda) \text{sen}(\phi) & \cos(\lambda) \\ \cos(\lambda) \cos(\phi) & \cos(\lambda) \text{sen}(\phi) & \text{sen}(\lambda) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 TIPOS DE CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO

Segundo SOLEA (2009), os problemas relacionados ao controle de veículos autônomos encontrados na literatura podem ser classificados em três grupos: estabilização em pontos; rastreamento de trajetória e seguimento de caminho.

2.2.1 Estabilização em pontos (*Point Stabilization*)

Na estabilização em um ponto, o objetivo é estabelecer o veículo em um dado ponto com uma orientação desejada. (SOLEA, 2009). Segundo Ding, *et al.* (2016), quando o veículo tem restrições não-holonômicas, o objetivo não pode ser atingido com um controle suave (ou até mesmo contínuo). Para superar essa dificuldade, duas principais abordagens têm sido propostas: leis de controle suaves e variantes no tempo; e, leis de controle híbridas e descontínuas (SOLEA, 2009).

2.2.2 Rastreamento de trajetória (*Trajectory Tracking*)

Aguiar (2008) e Solea (2009) afirmam que no rastreamento de trajetória é solicitado que o veículo rastreie (persiga) uma posição parametrizada no tempo. Segundo Liu, *et al.* (2016) o problema do rastreamento de trajetória para sistemas completamente atuados é bem entendido, entretanto, no caso de veículos subatuados (isto é, aqueles que possuem menos atuadores do que variáveis de estados a ser rastreadas), o problema ainda é amplamente pesquisado. Métodos de linearização, linearização por retroalimentação, bem como leis de controle baseadas em Lyapunov tem sido propostas (SOLEA, 2009).

2.2.3 Seguimento de caminho (*Path Following*)

Aguiar (2008) e Solea (2009) citam que no seguimento de caminho, é requisitado que o veículo convirja e siga um caminho geométrico, sem nenhuma especificação temporal. A suposição implícita no controle para seguimento de caminho é que a velocidade do veículo é controlada independentemente, enquanto que o controlador atua na orientação do veículo para

dirigi-lo ao caminho (SOLEA, 2009). Tipicamente, uma convergência mais suave ao caminho é atingida (quando comparada ao comportamento obtido com lei de controle no rastreamento de trajetória) e os sinais de controle são menos propensos a atingir a saturação já que é dada prioridade às restrições espaciais em vez das restrições temporais (LIU *et al.*, 2016).

2.2.4 Rastreamento de trajetória X seguimento de caminho

O rastreamento de trajetória foi mais estudado devido à sua similaridade com servossistemas e a sua convergência para a trajetória desejada em um tempo determinístico usando uma lei de controle assintoticamente estável, nos casos em que não ocorrem grandes perturbações (como aquelas que forçam o sistema a ficar em repouso). Por outro lado, o seguimento de caminho, apesar de não ser recomendado para sistemas com requisitos restritivos de tempo, é adequado para sistemas não-holonômicos e é aplicável para vários robôs móveis e veículos, uma vez que eles geralmente não estão envolvidos em sistemas com essas restrições. Embora a primeira abordagem pareça ser a mais direta, a segunda é mais facilmente aplicável para várias situações onde o tempo não é um parâmetro crítico (SOLEA, 2009).

2.3 MODELO CINEMÁTICO

Para fins de projeto de um controlador, é desejável empregar-se um modelo simples, mas que descreva de forma satisfatória o comportamento cinemático do trator (BERDUCAT *et al.*, 2002). Para tanto, Berducat, *et al.* (2002) consideram algumas premissas e restrições para o desenvolvimento do modelo: 1) as variáveis de controle são a velocidade do veículo e o ângulo de direção das rodas dianteiras; 2) o trator e o(s) equipamento(s) eventualmente acoplado(s) a ele podem ser considerados um único corpo rígido; 3) simplifica-se o trator para o modelo de um triciclo: cria-se uma única roda dianteira virtual equivalente às duas rodas dianteiras reais e seu local é definido exatamente na metade da distância existente entre as rodas reais; 4) assume-se que o trator move-se em um terreno horizontal plano; 5) assume-se que não há deslizamentos e o trator move-se com rolamento puro.

Segundo SAMSON (1992), o modelo segue o estabelecido na Figura 3, no qual C representa o caminho de referência a ser seguido. O ponto M representa a posição atual do veículo (M está localizado no meio do eixo traseiro do trator), e o ponto M' é a projeção

ortogonal do veículo sobre C . Chama-se s de coordenada curvilínea no ponto M' , enquanto que l representa a distância entre C e o ponto M .

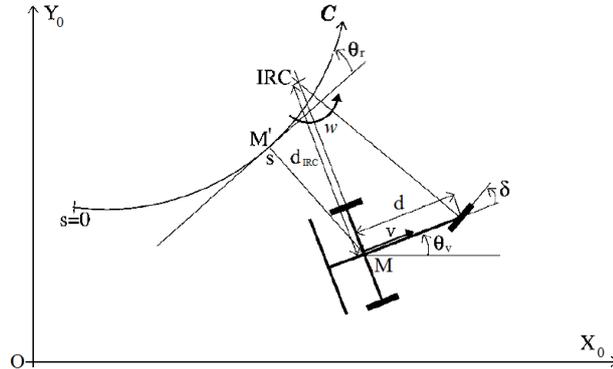


Figura 3: Modelo cinemático do veículo. Fonte: BERDUCAT, et al. (2002) - adaptado.

Além disso, Berducat, et al. (2002) assumem que, a cada instante, o movimento do veículo ocorre em torno de um ponto móvel chamado IRC (Centro de Rotação Instantâneo - *Instantaneous Rotational Center*), inclusive nos casos de translação pura, onde então esse ponto fica localizado no infinito. Ademais, assume-se que o vetor da velocidade linear v está ao longo da linha central do veículo em M' e que nas rodas dianteiras o vetor da velocidade linear apresenta um ângulo δ em relação à linha central, o que simplifica a geometria de Ackerman. Ainda, define-se a distância entre o IRC e M' como d_{IRC} e a distância entre os eixos do veículo como d , conforme pode ser observado na Figura 3.

Utilizando-se o erro de orientação $\tilde{\theta}$, cuja definição é a diferença entre a orientação do veículo θ_v e a do caminho θ_r (PLASKONKA, 2013):

$$\tilde{\theta} = \theta_v - \theta_r. \quad (6)$$

Consegue-se chegar ao modelo cinemático do veículo (BERDUCAT et al., 2002):

$$\dot{s} = \frac{v \cos(\tilde{\theta})}{1 - l \text{curv}(s)}, \quad (7)$$

$$\dot{l} = v \text{sen}(\tilde{\theta}), \quad (8)$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = v \left(\frac{\text{tg}(\delta)}{d} - \frac{\text{curv}(s) \cos(\tilde{\theta})}{1 - l \text{curv}(s)} \right). \quad (9)$$

onde $\text{curv}(s)$ representa a função curvatura do caminho de referência C .

2.4 CONTROLE

Segundo Berducat, *et al.* (2002), modelo cinemático (equações (7), (8) e (9)) pode ser escrito na forma encadeada:

$$\begin{aligned}x_1' &= 1, \\x_2' &= x_3, \\x_3' &= u_3.\end{aligned}\tag{10}$$

onde se adota $x_1 = s$, $x_2 = l$. Mais detalhes sobre sistemas encadeados podem ser encontrados no Anexo I, e a dedução da equação de controle pode ser encontra no Anexo II.

Ainda, segundo Cariou *et al.*, (2001), como o sistema é linear, utilizando os ganhos K_d e K_p , pode-se adotar a seguinte lei de controle para a entrada u_3 :

$$u_3 = -K_d x_3 - K_p x_2.\tag{11}$$

Logo, substituindo a Equação (11) no sistema encadeado (Equação (10)) obtêm-se:

$$x_2'' + K_d x_2' + K_p x_2 = 0\tag{12}$$

o que demonstra que x_2 e x_3 , e por consequência l e $\tilde{\theta}$, convergem para zero. (CARIOU *et al.*, 2001).

Então, a lei de controle pode ser escrita na seguinte forma:

$$\begin{aligned}\delta(l, \tilde{\theta}) = \arctg \left(\frac{d \cos^3(\tilde{\theta})}{(1 - l \operatorname{curv}(s))^2} \left[\frac{d \operatorname{curv}(s)}{ds} l \operatorname{tg}(\tilde{\theta}) \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{curv}(s)(1 - l \operatorname{curv}(s)) \operatorname{tg}(\tilde{\theta}) + \frac{\operatorname{curv}(s)(1 - l \operatorname{curv}(s))}{\cos^2(\tilde{\theta})} \right. \right. \\ \left. \left. - K_d(1 - l \operatorname{curv}(s)) \operatorname{tg}(\tilde{\theta}) - K_p l \right] \right).\end{aligned}\tag{13}$$

Para um caminho em linha reta, tipicamente seguido na agricultura, a lei de controle se reduz a:

$$\delta(l, \tilde{\theta}) = \arctg(d \cos^3(\tilde{\theta})[-K_d \operatorname{tg}(\tilde{\theta}) - K_p l]).\tag{14}$$

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Para implantar o sistema de controle, utilizou-se um receptor GPS, um veículo terrestre - trator agrícola - e um sensor a partir do qual se torna possível obter a informação do ângulo de esterçamento desse veículo. Além disso, desenvolveu-se um modelo no Simulink (*software* de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos baseado em diagrama de blocos), o qual obtêm os dados desses dispositivos e, através do algoritmo de controle, fornece o ângulo de esterçamento necessário ao veículo no próximo instante de amostragem para que se chegue ao caminho definido. Por fim, o valor desse ângulo é aplicado manualmente no trator.

3.1 MODELO NO SIMULINK

O modelo foi configurado para trabalhar de modo *online*, com um passo fixo de operação de 1 *ms*. Para tanto, os blocos de I/O utilizados foram obtidos na biblioteca *Simulink Desktop Real-Time* e selecionou-se o *External mode* como modo de simulação. Essa combinação gera um código com as configurações de I/O que é executado no sistema operacional do computador (de forma sincronizada com seu relógio) e transmite as informações para o Simulink através de uma interface de memória compartilhada (MathWorks, 2018).

Quanto à lógica desenvolvida, projetou-se o modelo exibido na Figura 4. Nele, o bloco “GNSS” trata os dados provenientes do receptor GPS (detalhado na Seção 3.3) e fornece as coordenadas do veículo no globo terrestre (altitude, longitude e altitude), além da velocidade e orientação deste. O subsistema de “Posicionamento (no plano)” aplica as equações (2), (3), (4) e (5), resultando nas coordenadas do veículo em um plano cartesiano, com a origem arbitrada no projeto como o ponto inicial do caminho. Ainda, na parte inferior, “Reconstrutor de Estados” (detalhado na Seção 3.5) utiliza o caminho definido para encontrar as variáveis necessárias ao controle (l , $\tilde{\theta}$, $curv(s)$ e $d(curv(s)) / ds$).

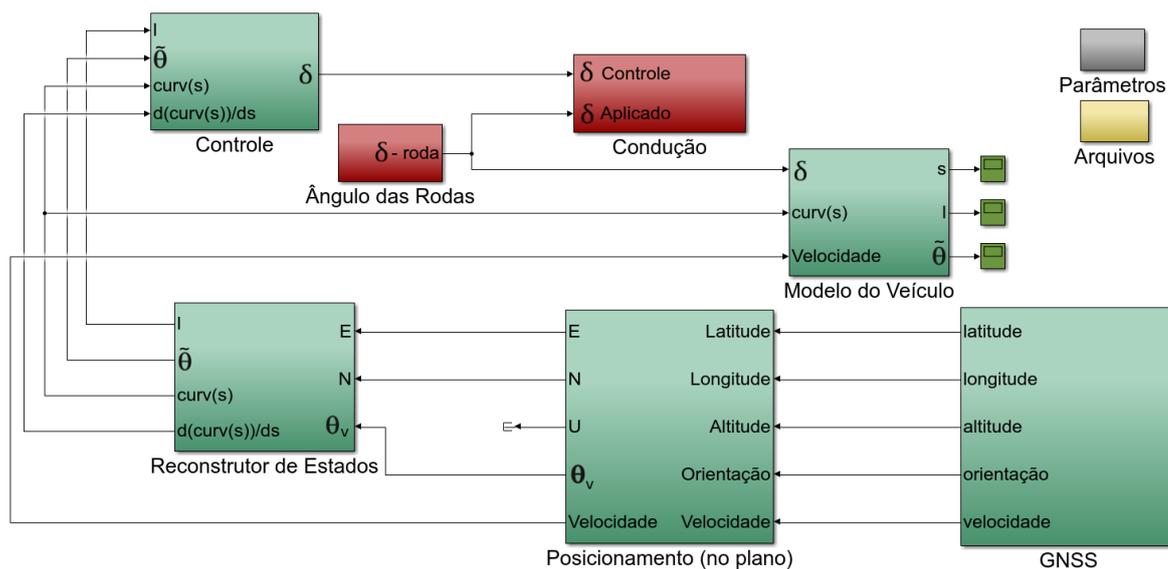


Figura 4: Esquema do modelo projetado no Simulink. Fonte: Autor.

Na parte superior, o bloco “Controle” aplica a Equação (13), utilizando os valores de K_d e K_p definidos na Seção 3.6.1. Já o bloco “Condução” (detalhado na Seção 3.6.2) apresenta a tela visualizada pelo tratorista durante os testes, enquanto que “Ângulo das Rodas” (detalhado na Seção 3.4) informa o ângulo momentâneo de esterçamento do veículo. O bloco “Modelo do Veículo” apresenta as equações (7), (8) e (9).

Ainda, em “Parâmetros” são inseridos os valores dos parâmetros da simulação, como os pontos inicial e final do caminho, o ponto de referência (origem do sistema de coordenadas no plano) e a distância entre os eixos do veículo utilizado; e em “Arquivos” contém as configurações para armazenamento dos resultados dos experimentos em arquivos de texto para análise posterior.

3.2 TRATORES UTILIZADOS

Neste trabalho foram utilizados dois modelos de tratores devido à disponibilidade. Ambos os tratores são da marca Massey Ferguson, modelos MF 4292 HD (Figura 5 (a)) e modelo MF 275 (Figura 5 (b)).

Considerando que o veículo é apenas modelado cinematicamente, o único parâmetro de interesse é à distância d entre os eixos dianteiro e traseiro, a qual foi obtida no manual do fabricante e confirmada através de medição: 2,61 m para o MF 4292 (Massey Ferguson, 2015) e 2,08 m para o MF 275 (Tractor Data, 2017).



Figura 5: Tratores utilizados: MF 4292 HD (a) e MF 275 (b). Fonte: Autor.

3.3 RECEPTOR GNSS

O receptor GNSS é da marca GlobalSat, modelo BU-353S4 e apresenta suporte para o protocolo NMEA (*National Marine Electronic Association*) 0183, bem como para comunicação serial através de uma porta USB. Sua frequência de aquisição é de 1Hz, somente recebe sinal dos satélites do sistema GPS e pode apresentar uma acurácia (proximidade entre o valor obtido experimentalmente e o valor verdadeiro) de até 2,5 m (GlobalSat, 2009).

Nota-se que nem a acurácia, nem a taxa de aquisição, são muito adequadas. Hansen, Mas e Zhang (2010) recomendam 5 Hz ou mais e Berducat *et al.* (2002) utilizam 10 Hz em um experimento similar. Porém, o uso deste receptor é justificado pela proposta de baixo custo do trabalho, uma vez que, atualmente, o valor de uma antena receptora comercial desenvolvida para essa aplicação e com especificações técnicas mais desejáveis não se enquadra na proposta deste trabalho.

A fixação nos tratores ocorre através de um ímã, presente no receptor. Seguindo o modelo matemático, essa fixação deve ser realizada sobre centro do eixo traseiro do trator (considerando o plano da vista superior), e também é preferível que seja em um local que não tenha obstáculos recebimento do sinal GPS. Assim, no trator MF 4292, o receptor foi fixado na superfície superior do toldo do trator como mostra a Figura 6 (a), e no trator MF 275, foi fixado na superfície atrás do banco como mostra a Figura 6 (b). Salienta-se que não foi realizado nenhum estudo para a determinação exata do local de fixação do receptor GNSS no veículo. No entanto, é perceptível que as imprecisões decorridas da fixação do receptor no veículo devem ocasionar erros no resultado, assim como o rolamento do veículo (dado que

não são utilizados sensores inerciais neste trabalho), uma vez que ambos alteram diretamente o posicionamento do ponto utilizado para controle do veículo.



Figura 6: Fixação do receptor GPS nos tratores MF4292(a) e MF275(b). Fonte: Autor.

Para importação dos dados no modelo no Simulink, utiliza-se um bloco (“*Stream Input*”) que lê os caracteres ASCII enviados pela porta serial de modo *online*. Essa leitura é de 75 caracteres a cada 1 *ms*, uma vez que o bloco exige uma quantidade fixa de caracteres, um período de amostragem fixo e também pelo fato de que o receptor fornece vários tipos de mensagens (RMC, VTG, GGA, GSA, GSV) existentes no protocolo NMEA.

Antes do seguimento para o restante do modelo, há um bloco com código do MATLAB (*software* de cálculo numérico) que seleciona as mensagens e os valores de interesse: de mensagens do tipo GGA, ele recebe latitude (em graus e *min*), longitude (em graus e *min*), altitude (em *m*) e qualidade do sinal; de mensagens VTG, retira a velocidade (em *km/h*) e a orientação (em graus com relação ao Norte e com sentido horário positivo).

3.4 LEITURA DO ÂNGULO DA RODA DO VEÍCULO

Neste trabalho, para efeito de simplificação, a medição do ângulo δ é obtida através de um simples acoplamento do sensor na roda. Como consequência, desconsideram-se certos efeitos da geometria de Ackerman. Assim, como explica Barreto (2015), em curvas, há uma pequena diferença entre o ângulo δ medido na roda e o ângulo δ do modelo cinemático (no qual se adota a simplificação para o modelo de um triciclo): caso a roda na qual se encontra o sensor seja a interna, o ângulo medido é maior; e, caso essa roda seja a externa, o ângulo medido é menor.

Quanto aos sensores utilizados, inicialmente, buscou-se instalar o *encoder* absoluto no trator MF 4292, porém sua estrutura não apresenta espaço físico disponível para acoplamento direto do mesmo no eixo de giro da roda. Como alternativa para fins acadêmicos, utilizou-se um sensor infravermelho (IR) nele, obtendo-se o ângulo da roda através de relações

trigonométricas. Posteriormente, acoplou-se o *encoder* ao trator MF 275, gerando duas opções de veículos para experimentos.

3.4.1 Sensor Infravermelho (IR)

O sensor utilizado é da marca Sharp, modelo GP2Y0A21YK0F e segundo o *data sheet* do fabricante é indicado para distâncias de 10 *cm* a 80 *cm*, além de apresentar saída analógica de 0 *V* a 3,3 *V* (SHARP, 2018). Destaca-se que, de modo geral, sensores ópticos não são recomendados para o meio agrícola, visto que o sensor *laser* sofre com perturbações como sujeiras ou plantas, por exemplo, que possam ficar entre o sensor e o anteparo. A utilização do sensor laser no trabalho é justificada pelo fato deste ser um trabalho exploratório na área e pela proposta de baixo custo do trabalho. Para leitura dos dados desse sensor, utiliza-se um microcontrolador Arduino Uno R3 que apresenta portas analógicas que trabalham de 0*V* a 5*V*, que por sua vez interage com o modelo no Simulink através da comunicação serial.

3.4.1.1 Calibração

A calibração do sensor foi realizada utilizando um código executado Arduino que informa o valor digital lido na porta analógica (de 0 a 1023) a um modelo desenvolvido no Simulink que armazena esse dado em um arquivo de texto. A distância para o qual o sensor apresenta aquele dado foi medida com o auxílio de uma trena digital (Marca Bosch, modelo GLM 30), como mostra a Figura 7.

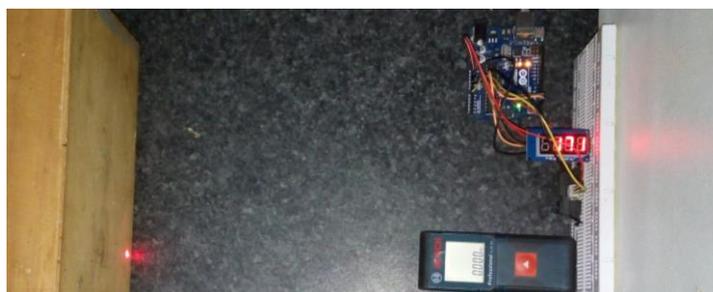


Figura 7: Procedimento realizado para calibração do sensor IR. Fonte: Autor.

Após as respostas do sensor para os pontos medidos, estes foram importados em uma planilha no *software* Excel, onde foi gerado um gráfico de dispersão com os dados fornecidos, a partir do qual se pôde gerar uma linha de tendência para obter a equação que descreve a

resposta do sensor (o que pode ser visualizado na Figura 8). Nota-se que a linha de tendência apresenta coeficiente de determinação $R^2 = 0,9993$.

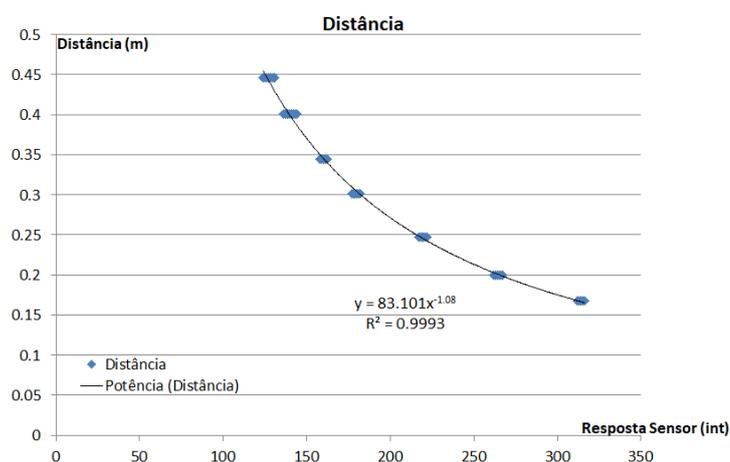


Figura 8: Gráfico de calibração do sensor IR. Fonte: Autor.

3.4.1.2 Equacionamento e Instalação

Para instalação do sensor no trator, fixou-se uma placa de madeira paralelamente ao pneu (aproveitando a estrutura do para-lama do mesmo) para fazer o papel de anteparo, onde deve ocorrer a reflexão do infravermelho do sensor. Além disso, fixou-se uma braçadeira no eixo dianteiro do trator, a partir da qual uma estrutura metálica rígida fixava o sensor na posição desejada. A Figura 9 apresenta a estrutura montada juntamente com as variáveis de interesse para o equacionamento. Também na Figura 9, nota-se que o desempenho do sistema apresenta vulnerabilidade às perturbações, como poeira ou plantas, entre o sensor e o anteparo.

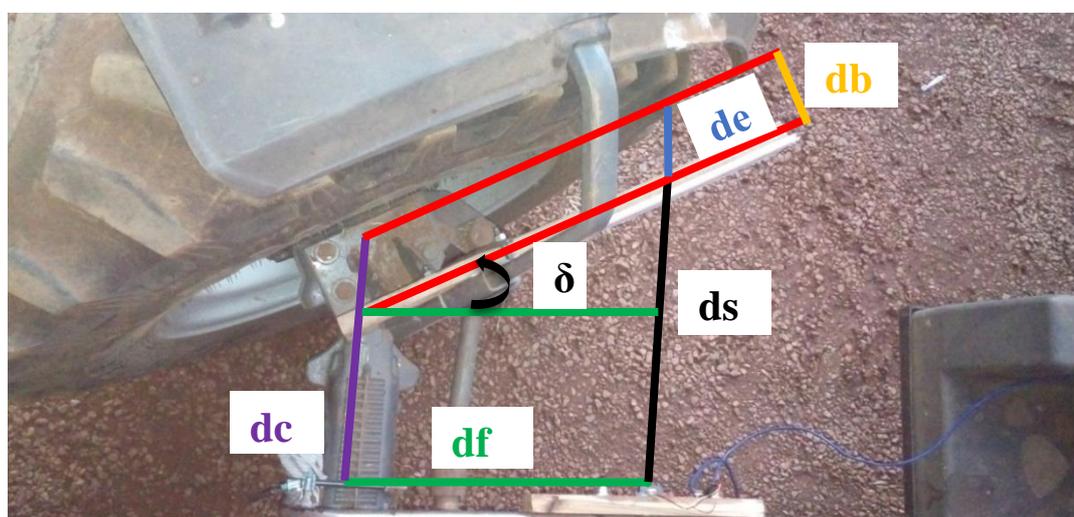


Figura 9: Sensor IR instalado e variáveis utilizadas para equacionamento. Fonte: Autor.

Na Figura 9, δ é o ângulo da roda; d_s é à distância (fornecida pelo sensor) entre o sensor e anteparo paralelo ao pneu; d_c é à distância (fixa) entre o ponto de giro da roda e a projeção da posição do local onde o sensor está instalado sobre o eixo da roda, sendo que o eixo que passa por d_c é sempre paralelo ao que passa por d_s ; d_f é à distância (fixa) entre o local de instalação do sensor IR e o eixo da roda; d_b é à distância (fixa) entre as linhas paralelas: do anteparo e a que passa pelo centro de giro da roda e tem 115 mm ; e, d_e é à distância de erro, isto é, a projeção de d_b ao longo de uma linha paralela ao eixo da roda.

Com base nas medições realizadas, encontrou-se $d_c = 323 \text{ mm}$, $d_f = 385 \text{ mm}$ e $d_b = 115 \text{ mm}$. Além disso, considerando o sentido anti-horário como positivo, o equacionamento (detalhado no Apêndice A) leva à equação:

$$\delta = \arcsen \left(\frac{d_f d_b + (d_s - d_c) \sqrt{-d_f^2 + d_b^2 (d_s - d_c)^2 - (d_s - d_c)^4}}{d_f^2 + (d_s - d_c)^2} \right) \quad (15)$$

3.4.2 Encoder

O *encoder* utilizado é do tipo absoluto, da marca Sick, modelo AFS60B-S4AA032768, com 32.768 passos por revolução. Seus dados são lidos por uma placa Arduino Mega 2560 que informa esses dados para o modelo no Simulink, onde são utilizados para a condução e no modelo do veículo.

O *encoder* apresenta como interface de comunicação *Serial Synchronous Interface* (SSI) e *Gray Code* para informar o valor do ângulo. A SSI utiliza um trem de pulso de *clock* de um controlador para dar início a uma saída, *data*, bloqueada do sensor (SICK, 2018). Já o *Gray Code* pode ser convertido para um número binário, desde que se saiba o número total de bits utilizados no código (15 bits nesse caso).

Devido ao fato de que a SSI é baseada nos padrões RS-422, tornou-se necessária à aquisição de um circuito transceptor Max485 para compatibilização dos níveis lógicos entre as portas digitais do Arduino e o RS-422, uma vez que o Arduino trabalha de 0 V a 5 V , enquanto que o RS-422 trabalha com sinal diferencial. Nesse caso, foram utilizados dois Max485: o primeiro para transmitir o sinal da porta 5 (definida como saída) do Arduino para o par de *clock*, e o segundo para transmitir o sinal do par *data* do sensor para a porta 6

(definida como entrada) do Arduino. Após a leitura dos dados no Arduino, estes eram convertidos do *Gray Code* para binário e de binário para uma variável *float* que informa o ângulo em graus.

Quanto à instalação do sensor, utilizou-se um acoplamento flexível para transmissão do movimento de rotação do eixo da roda para o *encoder* para evitar problemas de desalinhamento. Além disso, definiu-se o sentido horário de giro do *encoder* como positivo, uma vez que o sensor foi instalado invertido, o que pode ser visualizado na Figura 10.



Figura 10: Encoder instalado. Fonte: Autor.

3.5 DEFINIÇÃO DO CAMINHO

O subsistema responsável pelo caminho no modelo (“Reconstrutor de estados” na Figura 4) converte as coordenadas geodésicas desses parâmetros para as coordenadas cartesianas em um plano. Depois disso, um bloco com uma função programada em um *script* no MATLAB aplica as equações que descrevem o caminho (reta linear): primeiramente encontra-se o ângulo θ_r de inclinação da reta; após a coordenada s mais próxima do veículo no caminho (lembrando que s é limitada pelo início e fim do caminho, isto é, existe um valor máximo e um mínimo para s) e por fim, x_r e y_r , com base em s e θ_r . Então, com o resultado dessas equações, podem-se obter as demais variáveis de estado do sistema $(l, \tilde{\theta})$.

3.6 CONTROLE

O controlador é desenvolvido no bloco “Controle” no modelo no Simulink (Figura 4) através da implantação da Equação (13). Já o seguimento manual do sinal de controle utiliza o bloco “Condução” do mesmo modelo.

3.6.1 Projeto do controlador

Os valores de K_d e K_p foram definidos baseados na Equação (12). Nela há um sistema de segunda ordem, onde x_2 (igual a l , por definição) depende de x_1 (onde $x_2 = l$ e $x_1 = s$, segundo as definições adotadas). Portanto, pode-se interpretar a solução desta equação como uma resposta na distância e não no tempo, e, assim, o que ocorre é uma “distância de assentamento” ao invés de um tempo de assentamento (BERDUCAT *et al.*, 2002).

Ainda, baseado em Berducat *et al.* (2002), que utilizam uma distância de assentamento de 15 m, decidiu-se adotar para este projeto uma distância aproximada de 40 m. Justifica-se essa escolha pelo fato de que neste trabalho a aplicação do ângulo fornecido pela lei de controle é manual, e, portanto, as mudanças nesse ângulo devem ser mais lentas. Assim, visando a uma distância de assentamento de 40 m, decidiu-se pela alocação de ambos os polos da Equação (12) em 0,1, o que implica em $K_d = 0,2$ e $K_p = 0,01$.

3.6.2 Seguimento do sinal de controle

O seguimento da lei de controle ocorre de forma manual, já que não há a presença de um atuador, isto é, o trator deve ser conduzido por um motorista responsável por seguir as indicações de aplicação da lei de controle. Para executar isso, como mostra a Figura 11, elaborou-se uma tela para ser utilizada durante a condução que exibe apenas as informações relevantes para condução (o ângulo δ atual da roda, o de δ controle e a diferença entre estes).

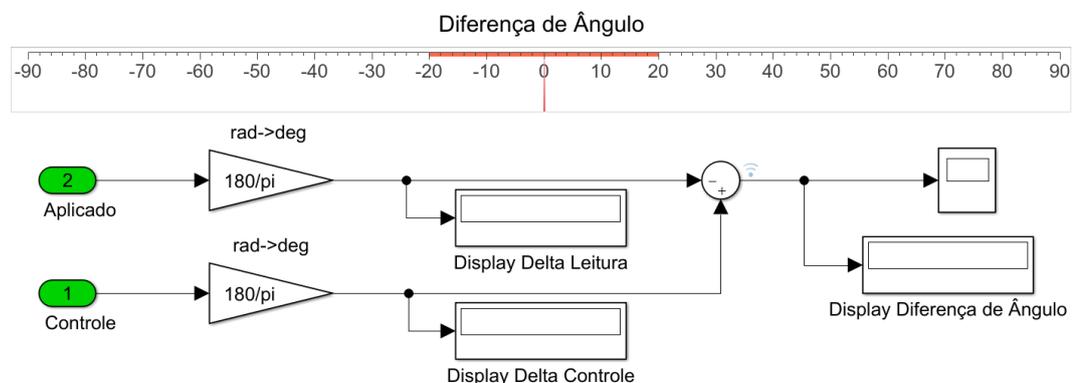


Figura 11: Tela exibida durante condução manual do veículo. Fonte: Autor.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados cinco experimentos realizados com a plataforma desenvolvida neste trabalho: os primeiros (denominados Teste I e Teste II) foram realizados com o objetivo de averiguar a convergência do veículo para o caminho de referência, enquanto que os demais analisam diferentes características do sistema, como o comportamento frente à variação da velocidade (Teste III), a distância do assentamento (Teste IV) e comportamento quando se inicia sobre o caminho de referência (Teste V).

Em todos os experimentos, utilizou-se o mesmo caminho, uma em linha reta entre os pontos $28^{\circ}35.4742'S, 52^{\circ}44.3859'O$ (início do caminho) e $28^{\circ}35.4057'S, 52^{\circ}44.5676'O$ (final do caminho), o qual pode ser visualizado na Figura 12.



Figura 12: Caminho utilizado para os experimentos (de A até B). Fonte: Autor.

Durante os testes, as variáveis de maior interesse eram armazenadas em um arquivo de texto a cada passo de execução do modelo. Posteriormente, por meio de um *script* escrito no MATLAB, esses dados eram visualizados através de gráfico e analisados por meio de dados estatísticos (média e desvio padrão).

4.1 VALIDAÇÃO DE ESTABILIDADE PARA AMBOS OS VEÍCULOS

Os testes I e II foram realizados com o veículo inicialmente em repouso e antes do ponto de início do caminho (ponto A). Além disso, o Teste I foi realizado com o trator MF 4292 (empregando o sensor IR) com velocidade média de $4,18 \text{ km/h}$, enquanto que o Teste II foi realizado com o trator MF 275 (empregando o *encoder*) e com velocidade média de $3,92 \text{ km/h}$. A Figura 13 mostra as trajetórias desenvolvidas pelos tratores durante os experimentos, além do caminho de referência adotado.

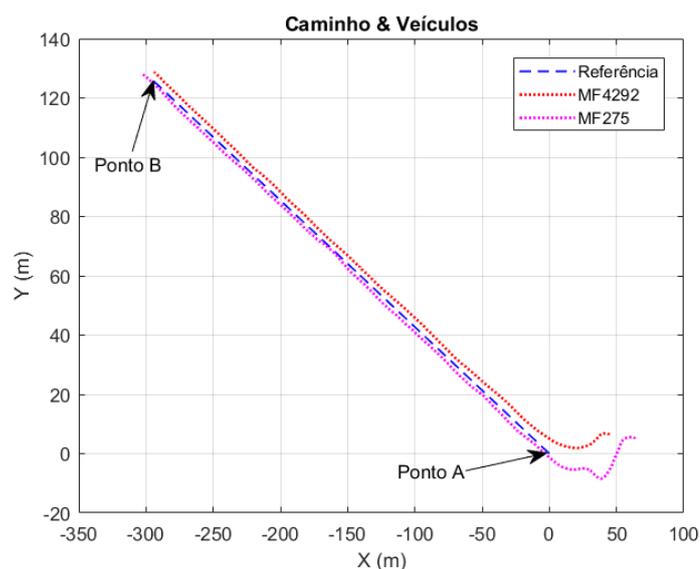


Figura 13: Referência e trajetória dos tratores no Teste I (MF 4292) e Teste II (MF 275). Fonte: Autor.

Assim, com base Figura 13, pode-se afirmar que ocorre a convergência do veículo para o caminho de referência, mas que há uma distância de *offset* ($l \neq 0$) entre a trajetória real e a referência. Também, através da Figura 13, é possível afirmar que algoritmo de controle toma ações para colocar o trator no caminho antes mesmo de passar pelo seu início (Ponto A).

O desvio lateral l , isto é, a distância que o veículo ficou do caminho de referência em ambos os experimentos pode ser verificado na Figura 14. Considerando o resultado em regime permanente, o Teste I apresenta um desvio lateral médio de $2,564 \text{ m}$ e um desvio padrão de $1,356 \text{ m}$, enquanto que no Teste II o desvio lateral médio é de $1,504 \text{ m}$ e o desvio padrão é $2,119 \text{ m}$. O valor médio nos dois casos (em regime permanente) é mostrado na Figura 14. Salienta-se que os tempos dos testes não necessitam serem os mesmos, uma vez que a distância total percorrida e a velocidade podem variar.

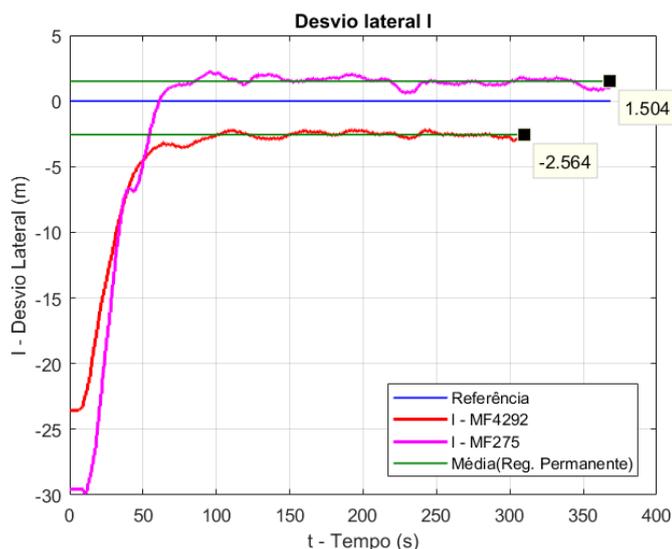


Figura 14: Desvio lateral ao longo do tempo nos teste I II. Fonte: Autor.

Na Figura 15 é exibida a diferença de orientação ($\tilde{\theta}$) ao longo do tempo. Observa-se que, quando comparado com outra variável de estado l , a média no regime permanente tanto no Teste I, quanto no Teste II fica mais próxima do valor de referência (isto é, zero), sendo de $0,230^\circ$ no Teste I e $-0,053^\circ$ no Teste II. O desvio padrão é de $1,356^\circ$ no Teste I e $2,119^\circ$ no Teste II. Portanto, como o valor médio é baixo verifica-se que não há uma grande tendência de variação do desvio lateral do veículo em relação ao caminho.

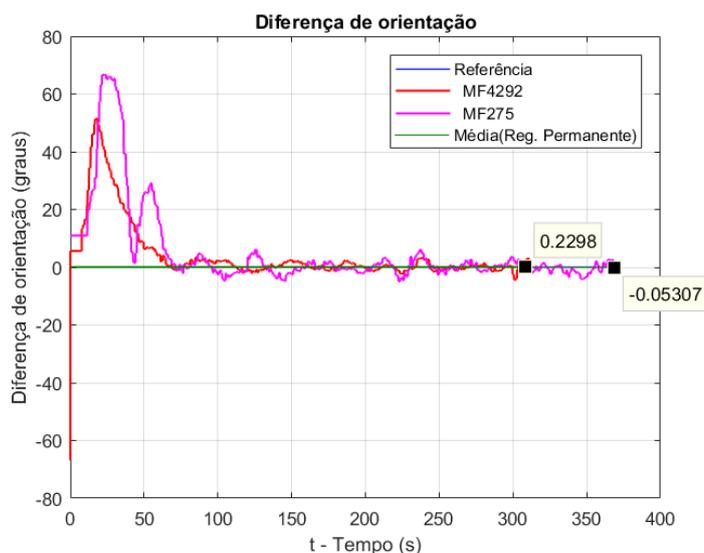


Figura 15: Diferença de orientação no Teste I e Teste II. Fonte: Autor.

Na Figura 16 é apresentado o gráfico do seguimento manual do sinal de controle nos experimentos no Teste I - Figura 16(a) - e no Teste II - Figura 16(b). Nela, a curva em azul

mostra o valor do ângulo fornecido pela lei de controle enquanto que a curva em vermelho indica o ângulo aplicado nas rodas pelo motorista segundo o sensor (IR no Teste I e *encoder* no Teste II). A média do erro do seguimento desse sinal em movimento no Teste I é de $0,077^\circ$ (com desvio padrão de $2,213^\circ$), enquanto que no Teste II é de $0,528^\circ$ (com desvio padrão de $2,798^\circ$). Além disso, a área destacada no círculo na Figura 16(b) mostra um erro intencional do motorista necessário para desviar de um obstáculo físico presente no momento do experimento.

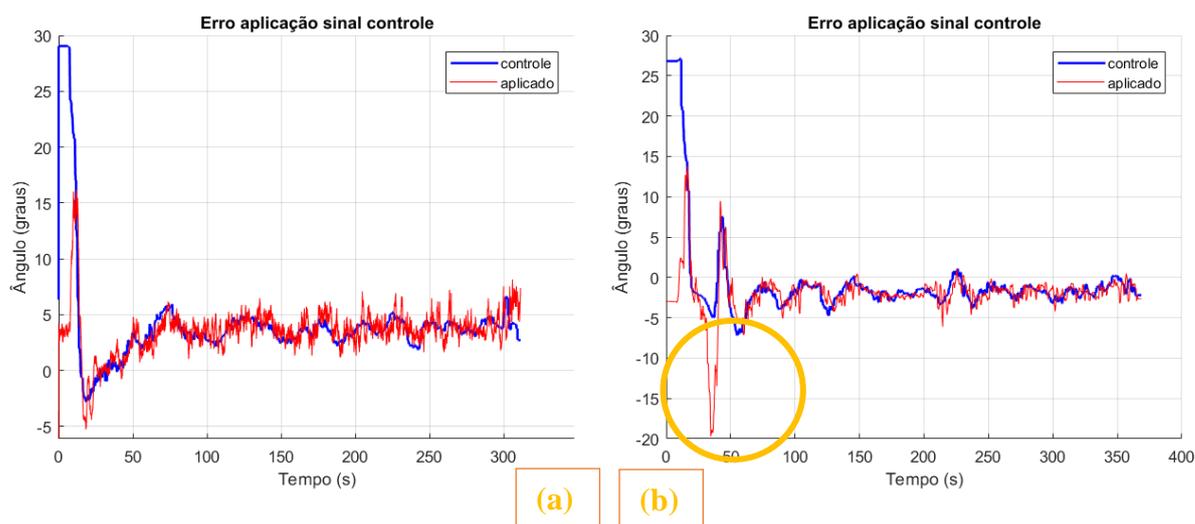


Figura 16: Erro no seguimento do sinal de controle no Teste I (a) e no Teste II (b). Fonte: Autor.

Assim, nota-se na Figura 16 que a diferença entre os sinais é maior no início do trajeto (na posição mais distante do caminho), e que posteriormente com a movimentação do veículo ela tende a reduzir (se não houver obstáculos). Além disso, percebe-se uma maior variação nos valores informados no Teste I (com o sensor IR) do que no Teste II (com o *encoder*). Ainda, como esperado, também há uma pequena diferença entre o sinal de controle e sua aplicação.

Verifica-se que existem diversas contribuições para a ocorrência de erros, em especial em l (Figura 14) e $\tilde{\theta}$ (Figura 15). O receptor GPS apresenta uma acurácia de até $2,5\text{ m}$, além de apresentar uma taxa de aquisição de 1 Hz , que é considerada de baixa quando comparada com outros trabalhos similares conforme comentado na Seção 3.3. Os efeitos de condições não modeladas, tais como: desníveis no terreno, deslizamentos nas rodas, além do efeito do rolamento do veículo também prejudicam a acurácia da posição do ponto de controle. Ainda, há a diferença entre o δ da lei de controle e o δ aplicado, gerada pela aplicação manual e por erros de medição, que distancia l e $\tilde{\theta}$ dos seus valores de referência.

4.2 MUDANÇA DE VELOCIDADE

Visando a observar a influência que a velocidade do veículo pode exercer sobre a resposta do sistema de controle, foi realizado outro experimento, no qual são mantidos os parâmetros dos testes anteriores com exceção da velocidade média do trator, a qual foi aumentada para $12,479 \text{ km/h}$. Utilizou-se o trator MF 4292 por ser o modelo com maior potência dentre os dois disponíveis. A Figura 17 exibe o caminho percorrido pelo veículo, juntamente com a referência adotada.

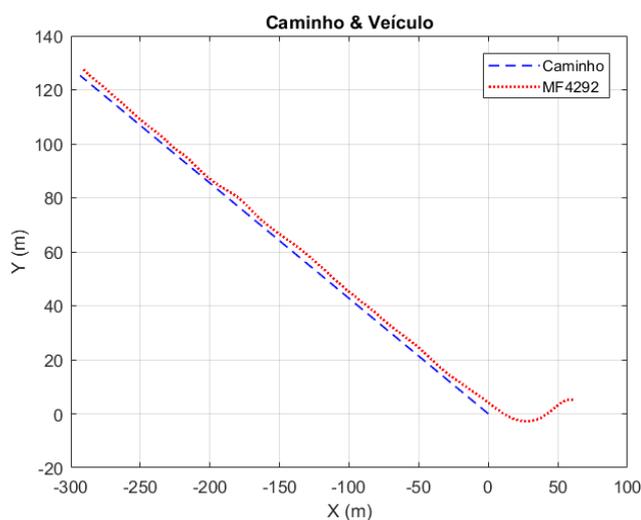


Figura 17: Caminho de referência e percurso do veículo no Teste III. Fonte: Autor.

Já, a Figura 18 mostra o desvio lateral l do sistema (a) e a diferença de orientação $\tilde{\theta}$ (b) ao longo do tempo. Nota-se que, em regime permanente, l apresenta uma média de $2,450 \text{ m}$ (com desvio padrão de $0,421 \text{ m}$), o que é menor do que o anterior. Também se percebe que a média de $\tilde{\theta}$ é de $0,295^\circ$ (com desvio padrão de $2,317^\circ$) em regime permanente, o que é maior do que o anterior. Portanto, observa-se que não houve grandes diferenças nesses resultados em relação ao Teste I (experimento equivalente com velocidade menor).

A Figura 19 mostra o seguimento do sinal de controle neste experimento. A diferença média encontrada entre o sinal gerado pela lei de controle e por aquele efetivamente aplicado foi de $0,837^\circ$ (desvio padrão de $4,306^\circ$), ou seja, maior do que aquelas encontradas em baixa velocidade (Seção 4.1), uma vez que se torna mais difícil para o tratorista acompanhar as mudanças nos valores de δ fornecidas pela lei de controle.

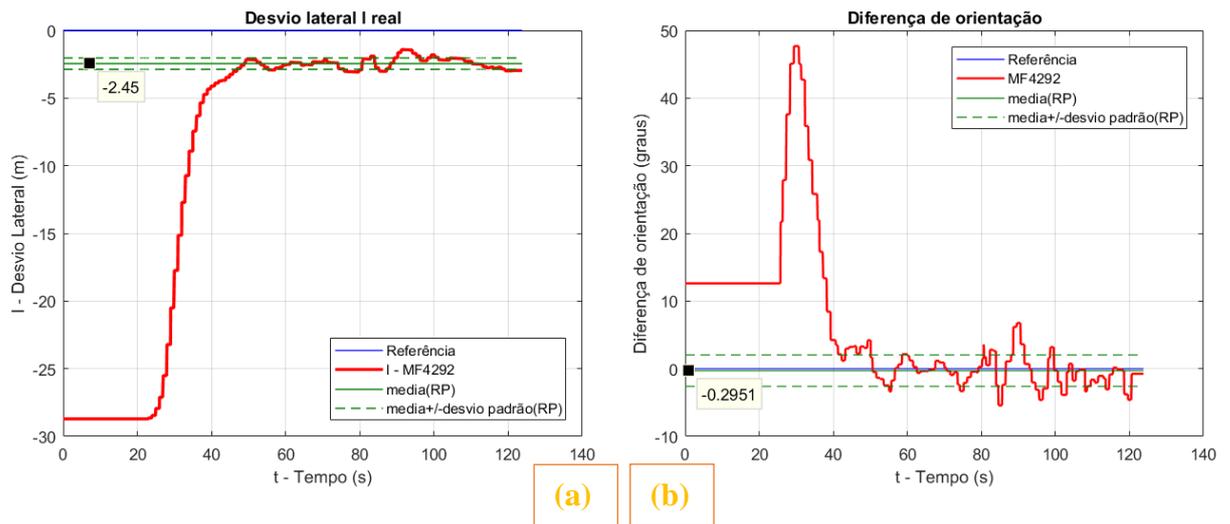


Figura 18: Estados do sistema (l e $\tilde{\theta}$) no Teste III. Fonte: Autor.

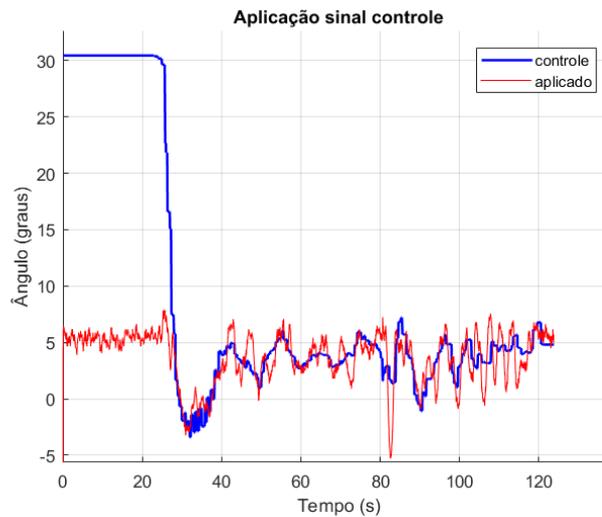


Figura 19: Sinal de controle (da lei de controle e aplicado) no Teste III. Fonte: Autor.

4.3 VERIFICAÇÃO DA DISTÂNCIA DE ASSENTAMENTO

Visando constatar a distância de assentamento do sistema, realizou-se o Teste IV. Nele, inicia-se com o veículo em uma coordenada $s > 0$, a qual é posteriormente subtraída da coordenada s em que ocorre o assentamento (início do regime permanente). O experimento foi realizado com o trator MF 275, velocidade média de 3,492 km/h e apresentou a trajetória mostrada na Figura 20.

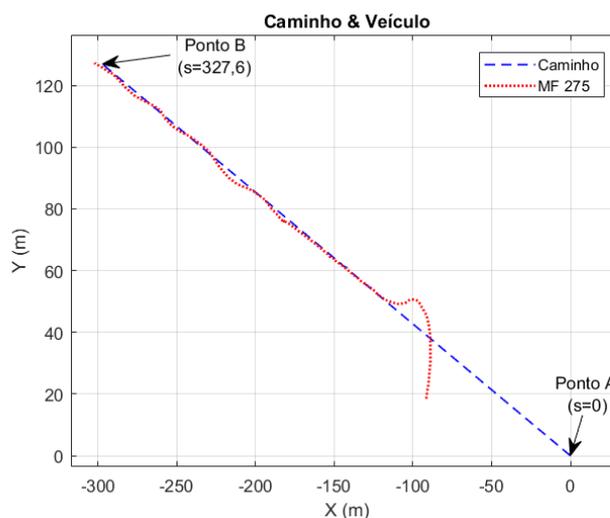


Figura 20: Referência e trajetória do trator no Teste IV. Fonte: Autor.

O desvio lateral l resultante do experimento pode ser visualizado na Figura 21. l apresenta média de $0,089\text{ m}$ em regime permanente e desvio padrão de $2,110\text{ m}$. Nota-se que l não converge para um valor constante (ainda considerando uma margem de 2%), porém, para que pudesse haver uma comparação entre o resultado experimental com o de projeto, adota-se a suposição de l ficará constante no valor igual à média de seus resultados. Assim, constata-se uma distância aproximada de $38,83\text{ m}$ (diferença entre a coordenada de início do regime permanente: $s = 130,2\text{ m}$ e a coordenada inicial do experimento: $s = 91,37\text{ m}$) através uma inspeção visual na Figura 21. Com isso verifica-se que essa distância é próxima à distância projetada no controlador (40 m).

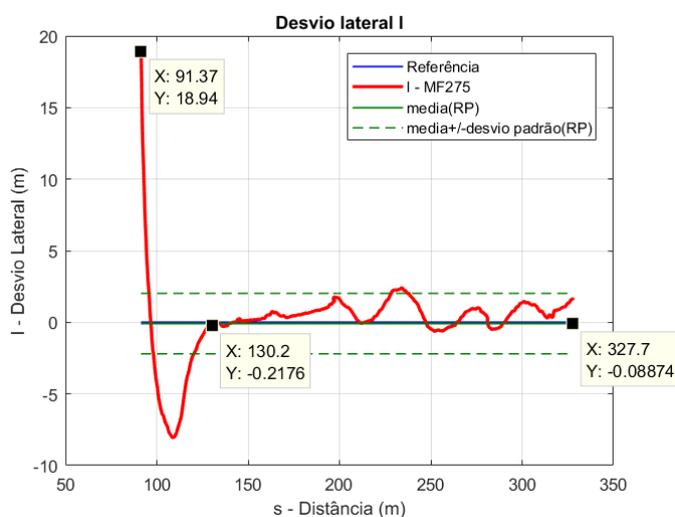


Figura 21: Desvio lateral l no Teste IV. Fonte: Autor.

A Figura 22 exibe a diferença de orientação $\tilde{\theta}$ (Figura 22 (a)) e o sinal de controle (Figura 22 (b)) do experimento. Na Figura 22 (a) é exibido também o valor médio de $\tilde{\theta}$ em regime permanente: $0,131^\circ$, o qual apresenta desvio padrão de $15,724^\circ$. Nota-se que a faixa onde $\tilde{\theta}$ permanece aproximadamente constante (de $s \cong 130$ a $s \cong 175$) corresponde também à faixa onde l se encontra mais próximo à zero. Já, na Figura 22 (b), constata-se que o sinal de controle foi seguido, já que o valor aplicado não apresenta grandes desvios em relação àquele estabelecido pela lei de controle.

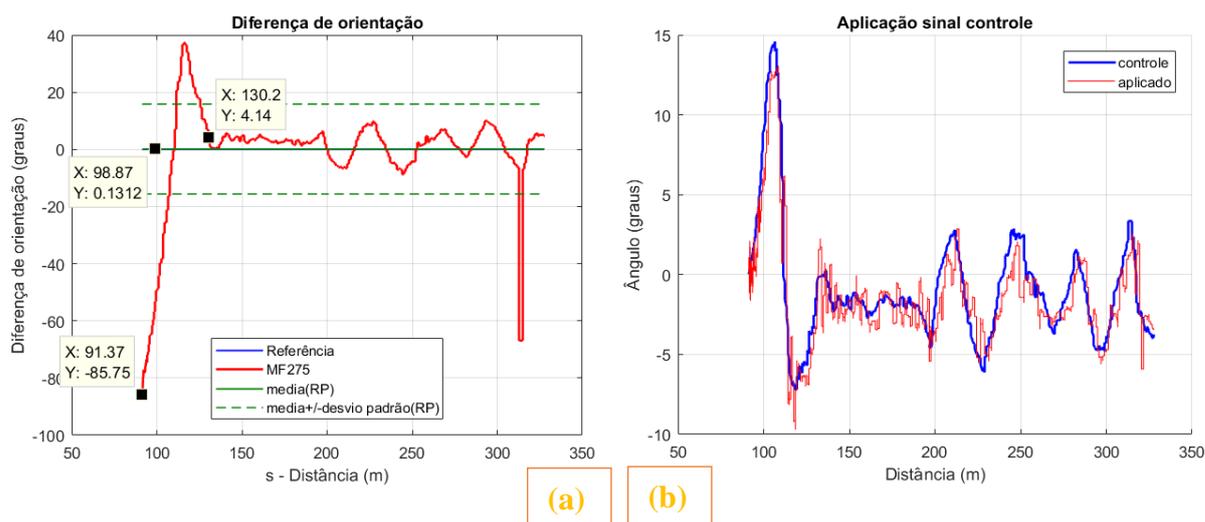


Figura 22: Diferença de orientação $\tilde{\theta}$ e sinal de controle no Teste IV. Fonte: Autor.

4.4 MANUTENÇÃO DO SEGUIMENTO DE CAMINHO

No Teste V buscou-se verificar o comportamento do sistema quando o veículo parte próximo ao caminho de referência. Nesse experimento, utilizou-se o trator MF 275 que foi conduzido com velocidade média de $3,336 \text{ km/h}$. O trajeto percorrido pelo trator, bem como a referência encontram-se expostos na Figura 23(a).

Já, a Figura 23(b) exibe o desvio lateral ao longo do percurso: inicia-se com o trator a $6,724 \text{ cm}$ do caminho de referência, porém essa distância não é mantida. Encontra-se $3,465 \text{ m}$ como desvio lateral máximo e média de $1,3 \text{ m}$ (com desvio padrão de $0,727 \text{ m}$) durante o percurso de $176,5 \text{ m}$ do experimento.

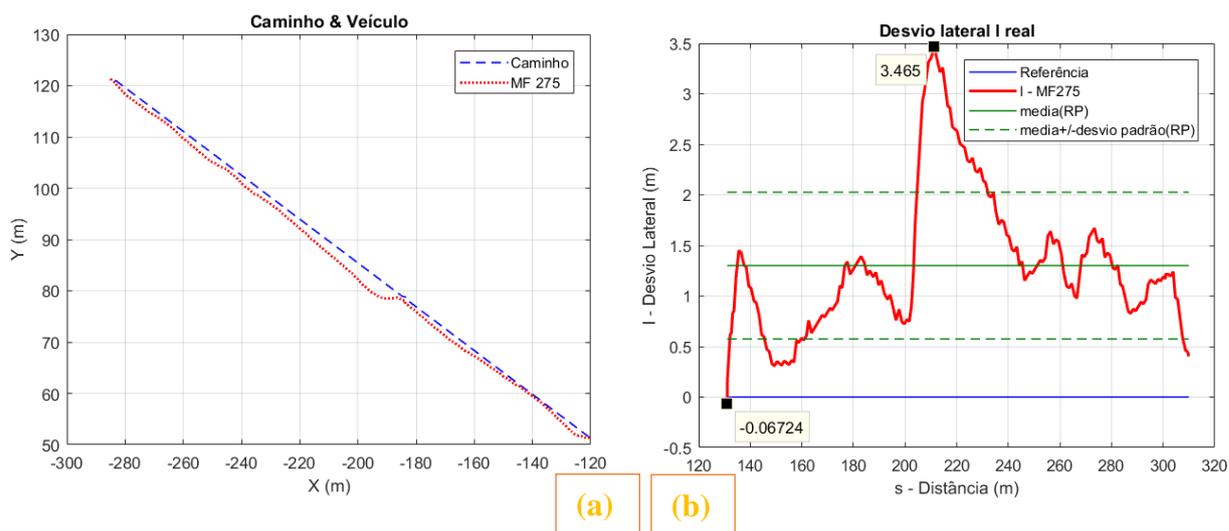


Figura 23: Referência & trajetória (a) e desvio lateral l (b) no Teste V. Fonte: Autor.

A Figura 24 apresenta a diferença de orientação entre o veículo e o caminho - Figura 24(a) - e o sinal de controle - Figura 24(b). A média encontrada da diferença de orientação ($\tilde{\theta}$) foi de $1,231^\circ$ (com desvio padrão de $4,693^\circ$); enquanto que a média do erro no seguimento do sinal de controle (diferença entre o ângulo fornecido pela lei de controle e o ângulo aplicado) encontrada foi de $0,105^\circ$ (com desvio padrão de $1,628^\circ$) e o máximo erro foi de $4,976^\circ$. Nota-se que, dentre os dados destas duas variáveis, pode-se dizer que o mais crítico é o valor inicial de $\tilde{\theta}$, uma vez que, por não apresentar um valor nulo (ou próximo à zero), demanda a aplicação de um sinal de controle que, seguindo a Equação (14), contribui para o aumento de l exibido na Figura 23 (b).

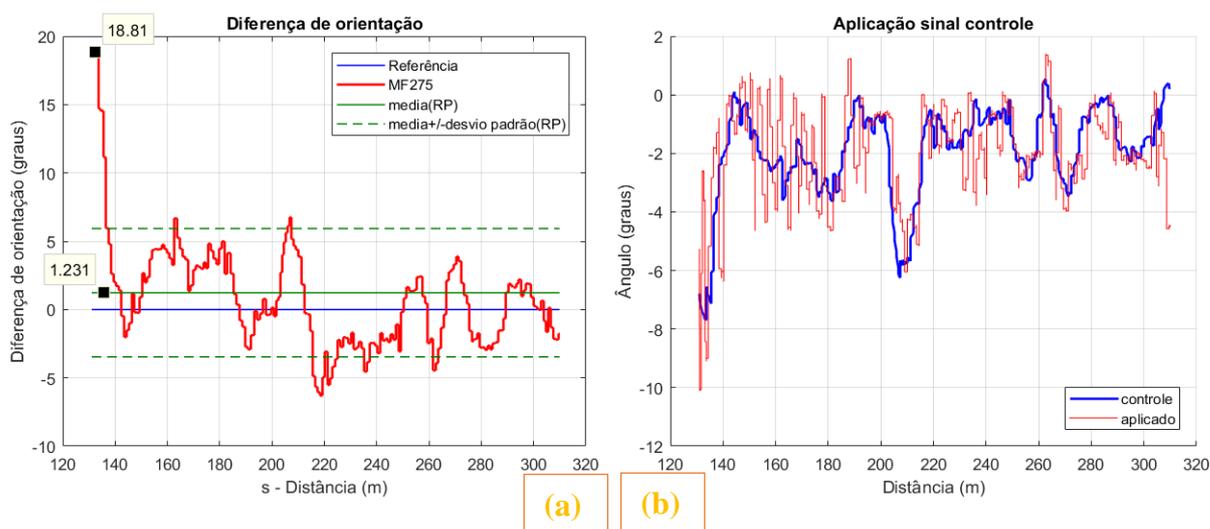


Figura 24: Diferença de orientação $\tilde{\theta}$ e sinal de controle no Teste V. Fonte: Autor. Trocar amarelo.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi proposta a realização do projeto, implementação e análise de estabilidade de uma plataforma de controle para garantir o seguimento de caminho de um veículo agrícola com base no posicionamento através do sistema GNSS. Para a realização dos experimentos, definiu-se um caminho (em linha reta), uma posição inicial e uma velocidade média, com a qual o operador conduzia o veículo de forma manual acompanhando o sinal de controle fornecido.

A plataforma desenvolvida demonstrou-se funcional nos dois conjuntos distintos utilizados, apresentando comunicação *online* entre o modelo no Simulink e os demais sensores (receptor GPS, sensor *laser* e *encoder*) além de exibir o resultado da lei de controle também de modo *online* para o operador do veículo.

Entretanto, a plataforma não se apresenta como alternativa viável para o uso no meio agrícola. Como mostraram os experimentos, apesar do veículo convergir para o caminho de referência, encontrou-se uma média de desvio lateral de até 2,5 m em regime permanente com os equipamentos utilizados. Enquanto isso, para que o sistema tenha aplicação na Agricultura de Precisão, demanda-se uma tolerância máxima de poucas unidades de centímetros de erro no posicionamento, o que define a inviabilidade da plataforma. De certa forma, esse resultado era esperado, dadas as simplificações utilizadas e o fato de que, seguindo a proposta de baixo custo do trabalho, não foram adquiridos equipamentos de melhor desempenho.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido pode ser considerado como introdutório na área, e, assim, diversas mudanças e ou melhorias são aplicáveis. Sugere-se a melhoria da estimativa da

posição e orientação do veículo, o que pode ser realizado através de uma fusão de sensores (receptor GNSS e sensores inercias) utilizando a técnica do filtro de Kalman. A utilização dos sensores inerciais também possibilitaria a compensação de posicionamento proveniente do ângulo de rolagem do veículo. Uma alternativa de maior acurácia, porém de maior custo, consiste na aquisição de receptores GNSS comerciais e de dispositivos que utilizam a tecnologia RTK ou DGPS para utilização no trabalho.

Além disso, aconselha-se a utilização de placa com código embarcado, devido às vibrações comumente encontradas em veículos agrícolas, o que pode acarretar danos ao disco rígido do notebook. Também poderia ser desenvolvido suporte a outras formas de caminho de referência usando os caminhos mais utilizados na agricultura, como arcos de círculos (utilizados para realizar o retorno), espirais (típicas em lavouras com pivôs de irrigação), dentre outros.

Outro ponto interessante seria a implantação de um sistema de direção automática, o qual poderia ser feito, por exemplo, através do acoplamento de um servo motor de corrente contínua na coluna da direção do trator, seguido da modelagem do sistema que relaciona a atuação do motor ao esterçamento das rodas e projeto de controlador apropriado. Nota-se que o desenvolvimento desse sistema seria o que causaria maior alívio ao operador dentre as opções citadas, além de que permitiria a utilização de um controle mais agressivo, gerando uma atuação mais rápida no sistema e possibilitando a utilização de uma distância de assentamento menor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. P.; CARONA, R.; GASPAR, J. **Control of unicycle type robots: tracking, path following and point stabilization.** In: IV JORNADA DE ENGENHARIA ELECTRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES E DE COMPUTADORES. 2008, Lisboa. **Proc. of...** p. 180-185. Disponível em: <<http://users.isr.ist.utl.pt/~jag/publications/08-JETC-RCarona-vcontrol.pdf>>. Acesso em 15 jan. 2018.

BARRETO, R. L. P. **Simulação de ângulo de deriva e dinâmica veicular lateral utilizando modelo de quatro rodas com restrições geométricas e cinemáticas.** 2015. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/135676/335023.pdf?sequence=1>>. Acesso em 01 jul. 2018.

BERDUCAT, M. *et al.* Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS. **Autonomous Robots**, v. 13

BERDUCAT, M. *et al.* **GPS-based control of a land vehicle.** 1999. Disponível em: <<http://www.irccyn.ec-nantes.fr/~martinet/publis/1999/iaarc99.pdf>>. Acesso em 17 jan. 2018.

BORGHI, E. *et al.* **Adoption and use of precision agriculture in Brazil: perception of growers and service dealership.** 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/309097946>>. Acesso em: 07 jul. 2018.

CAI, J. *et al.* Implementation and development of a trajectory tracking control system for intelligent vehicle. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**. Springer, 2018.

CARIOU, C *et al.* Automatic guidance of a farm tractor along curved paths, using a unique CP-DGPS. In: THE 2001 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS. 2001, Maui. **Proceedings of ...** Disponível em: <<http://www.irccyn.ec-nantes.fr/~martinet/publis/2001/iros01lionel.pdf>>. Acesso em 13 jan. 2018.

CORREIA, C. **Material de apoio:** apresentação sobre o sistema Galileo. 2003. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~hmiranda/st2/galileu.pdf>>. Acesso em 16 jan. 2018.

DING, L. *et al.* Robust stabilization of a wheeled mobile robot using model predictive control based on neuro-dynamics optimization. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 2016. Disponível em: <<http://cronfa.swan.ac.uk/Record/cronfa29909>>. Acesso em: 03 jul. 2018.

ELSHEIKH, M.; KARAIM, M.; NOURELDIN, A. **GNSS error sources**. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75493>>. Acesso em 01 jul. 2018.

EMBRAPA. **Agricultura de precisão**. 2013. Disponível em: <<https://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2>>. Acesso em 16 jan. 2018.

GLOBALSAT. **GPS mouse user's guide** .Disponível em: <https://webbuilder.asiannet.com/909/ftp/download/GMouse_Win_UsersGuide-V1.0.pdf>. Acesso em 11 jun. 2018.

GONG, X. **Automatic guided vehicle application:** precision agriculture. 2017. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação), Purdue University. Disponível em: <<https://scholarworks.iupui.edu/bitstream/handle/1805/12281/XiangnanGongThesis.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 07 jul. 2018.

GSA. **GNSS market report:** agriculture. 2017. Disponível em: <https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_market_report_2017_-_agriculture.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2018.

GSA. **What is GNSS?**. 2018. Disponível em: <<https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>>. Acesso em: 03 jul. 2018.

HANSEN, A. C.; MÁŠ, R. F.; ZHANG, Q. **Mechatronics and intelligent systems for off-road vehicles**. Londres: Springer, 2010.

LIU, Z., *et al.* **Unmanned surface vehicles: an overview of developments and challenges**. Montreal, 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/301831885>>. Acesso em 02 jul. 2018.

LU, J.; TSIOTRAS, P.; YOU, C. **Nonlinear driver parameter estimation and driver steering behavior analysis for ADAS using field test data**. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/318693609_Nonlinear_Driver_Parameter_Estimation_and_Driver_Steering_Behavior_Analysis_for_ADas_Using_Field_Test_Data?_sg=uy9-V7WMkKvVaFkQTaaarMZwi1QtqDPXKQuylyvDgDogJK8EEghugSQukLxxMstqHHPzdLtiMw>. Acesso em 28 jun. 2018.

MASSEY FERGUSON. **Especificações MF 4292 HD**. 2015. Disponível em: <<http://www.masseyferguson.com.br/assets/especificacaoProduto/Serie%204200%20MF%204292%20HD%20BAIXA%20FOP.pdf>>. Acesso em 02 jun. 2018.

MATHWORKS, **Real-time execution in external mode**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/sldrt/ug/simulink-external-mode.html>>. Acesso em 03 jun. 2018.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão**. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 31 p. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/agric_precisao.pdf>. Acesso em 16 jan. 2018.

OLIVEIRA, T. C. A.; **Estudos sobre o desempenho de sistemas de piloto automático em tratores**. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

OKSANEN, T. **Accuracy and performance experiences of four wheel steered autonomous agricultural tractor in sowing operation**. 2013. Disponível em: <https://users.aalto.fi/~ttoksane/pub/2013_FSR2013.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2018.

PLASKONKA, J. Different kinematic path following controllers for a wheeled mobile robot of (2,0) type. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 77, p. 481-498, mar. 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10846-013-9879-6.pdf>>. Acesso em 12 jan. 2018.

SAMSON, C. **Mobile robot control part 2: control of chained systems and application to path following and time-varying point-stabilization of wheeled vehicles**. RR-1993, INRIA. 1993. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00074678/document>>. Acesso em 13 jan. 2018.

SAMSON, C. Path following and time-varying feedback stabilization of a wheeled mobile robot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AUTOMATION AND COMPUTER VISION ICARV'92. 1992, Cingapura. **Proceedings of ...** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237127962_Path_Following_And_Time-Varying_Feedback_Stabilization_of_a_Wheeled_Mobile_Robot>. Acesso em 12 jan. 2018.

SHARP. **Sheet No.: E4-A00201EN**. 2018. Disponível em: <http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf>. Acesso em 04 jun. 2018.

SICK. **AFS/AFM60 SSI absolute encoders**. 2018. Disponível em: <https://sick-virginia.data.continuum.net/media/pdf/8/68/768/dataSheet_AFS60B-S4AA032768_1037640_en.pdf>. Acesso em 04 jun. 2018.

SOLEA, R. C. **Sliding mode control applied in trajectory-tracking of WMRs and autonomous vehicles**. 2009. Dissertação – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Disponível em: <<https://estudogeral.sib.uc.pt/jspui/bitstream/10316/10776/1/razvan-thesis-FI.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

TRACTOR DATA, **Massey Ferguson 275 – dimensions**. 2017. Disponível em: <http://www.tractordata.com/farm-tractors/000/7/7/771-massey-ferguson-275-dimensions.html>. Acesso em 04 jun. 2018.

APÊNDICE A – EQUACIONAMENTO SENSOR LASER

Com base na Figura 9, pode-se afirmar que:

$$tg(\delta) = \frac{d_s - (d_c - d_e)}{d_f} \quad (16)$$

$$d_b = d_e \cdot \cos(\delta) \quad (17)$$

Então, utilizando as equações (16) e (17), chega-se em:

$$d_f \cdot tg(\delta) = d_s - (d_c - d_e) \quad (18)$$

$$d_f \cdot \text{sen}(\delta) = d_s \cdot \cos(\delta) - \left(d_c - \frac{d_b}{\cos(\delta)} \right) \cos(\delta) \quad (19)$$

$$d_f \cdot \text{sen}(\delta) - d_b = (d_s - d_c) \cos(\delta) \quad (20)$$

$$(d_f \cdot \text{sen}(\delta) - d_b)^2 = ((d_s - d_c) \cos(\delta))^2 \quad (21)$$

$$d_f^2 \text{sen}^2(\delta) - 2d_f d_b \text{sen}(\delta) + d_b^2 = (d_s - d_c)^2 (1 - \text{sen}^2(\delta)) \quad (22)$$

$$[d_f^2 + (d_s - d_c)^2] \text{sen}^2(\delta) - 2d_f d_b \text{sen}(\delta) + [d_b^2 - (d_s - d_c)^2] = 0 \quad (23)$$

Logo, adotando a fórmula de Bhaskara:

$$\text{sen}(\delta) = \frac{2d_f d_b \pm \sqrt{4d_f^2 d_b^2 - 4[d_f^2 + (d_s - d_c)^2][d_b^2 - (d_s - d_c)^2]}}{2[d_f^2 + (d_s - d_c)^2]} \quad (24)$$

$$\text{sen}(\delta) = \frac{2d_f d_b \pm \sqrt{4d_f^2 d_b^2 - 4d_f^2 d_b^2 - 4[-d_f^2(d_s - d_c)^2 + d_b^2(d_s - d_c)^2 - (d_s - d_c)^4]}}{2[d_f^2 + (d_s - d_c)^2]} \quad (25)$$

$$\text{sen}(\delta) = \frac{2d_f d_b \pm 2(d_s - d_c) \sqrt{+d_f^2 - d_b^2 + (d_s - d_c)^2}}{2[d_f^2 + (d_s - d_c)^2]} \quad (26)$$

$$\text{sen}(\delta) = \frac{d_f d_b \pm (d_s - d_c) \sqrt{+d_f^2 - d_b^2 + (d_s - d_c)^2}}{d_f^2 + (d_s - d_c)^2} \quad (27)$$

$$\delta = \arcsen \left(\frac{d_f d_b \pm (d_s - d_c) \sqrt{+d_f^2 - d_b^2 + (d_s - d_c)^2}}{d_f^2 + (d_s - d_c)^2} \right) \quad (28)$$

Portanto, adotando o padrão onde $d_s > d_c \rightarrow \delta > 0$, têm-se a Equação (15), isto é:

$$\delta = \arcsen \left(\frac{d_f d_b + (d_s - d_c) \sqrt{+d_f^2 - d_b^2 + (d_s - d_c)^2}}{d_f^2 + (d_s - d_c)^2} \right) \quad (15)$$

ANEXO A - SISTEMAS ENCADEADOS

Segundo SAMSON (1993) o sistema a seguir pode ser chamado de encadeado:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= u_1, \\
 \dot{x}_2 &= u_1 x_3, \\
 \dot{x}_3 &= u_1 x_4, \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_{n-1} &= u_1 x_n, \\
 \dot{x}_n &= u_2,
 \end{aligned} \tag{29}$$

onde $[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ são as variáveis de estado e $[u_1 \ u_2]^T$ são as variáveis de controle.

Ainda SAMSON (1993) salienta que, apesar desse sistema ser não linear, ele apresenta uma estrutura linear implícita, a qual aparece quando se toma u_1 como uma função no tempo e não mais como uma variável de controle. Nesse caso, o sistema se torna um sistema linear variante no tempo com uma única entrada, e pode ser descrito por:

$$\dot{\tilde{x}}_1 = 0 \tag{30}$$

$$\dot{X}_2 = \begin{bmatrix} 0 & u_1(t) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & u_1(t) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & u_1(t) & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & u_1(t) \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} X_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_2 \tag{31}$$

$$\tilde{x}_1 = x_1 - \int_0^t u_1(\tau) d\tau, \quad (32)$$

onde $X_2^T = [x_2 \quad x_3 \quad \cdots \quad x_n]^T$.

Observa-se que, quando a entrada u_1 é tomada como uma função do tempo, o sistema não é mais controlável, devido a Equação (30). Entretanto, sobre certas condições na escolha de $u_1(t)$, a segunda parte do sistema, que envolve X_2 , ou seja, a Equação (31) permanece controlável. Um exemplo ocorre quando u_1 é constante e diferente de zero, onde o sistema torna-se variante no tempo e a segunda parte do sistema é controlável. Então, aplicando técnicas clássicas de controle linear, é possível encontrar uma realimentação $u_2(X_2)$ tal que estabilize exponencialmente a origem $X_2 = 0$. De fato, se $u_1(t)$ não é constante, mas apenas constante por partes, limitada, e estritamente positiva (ou negativa) é relativamente fácil encontrar realimentações estabilizadoras $u_2(X_2)$ para a segunda parte do sistema. (SAMSON, 1993).

Ainda, SAMSON (1993) afirma que, desde que $x_1(t)$ varie monotonicamente com o tempo, a diferenciação com respeito ao tempo pode ser substituída por uma diferenciação com respeito à x_1 . Sendo assim, o sistema pode ser reescrito de forma equivalente:

$$\begin{aligned} x_1' &= 1, \\ x_2' &= \text{sign}(u_1) x_3, \\ x_3' &= \text{sign}(u_1) x_4, \\ &\vdots \\ x_{n-1}' &= \text{sign}(u_1) x_n, \\ x_n' &= \text{sign}(u_1) u_3, \end{aligned} \quad (33)$$

onde

$$x_i' = \text{sign}(u_1) \frac{\partial x_i}{\partial x_1}, \quad (34)$$

$$u_3 = \frac{u_2}{u_1(t)}, \quad (35)$$

ANEXO B - DEDUÇÃO DA LEI DE CONTROLE

Uma vez que o modelo utilizado apresenta apenas três variáveis de estado (s , l e $\tilde{\theta}$), o sistema (29) pode ser escrito na forma:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= u_1, \\ \dot{x}_2 &= u_1 x_3, \\ \dot{x}_3 &= u_2,\end{aligned}\tag{36}$$

Da mesma forma, o sistema (33) passa a ser expresso por:

$$\begin{aligned}x'_1 &= 1, \\ x'_2 &= x_3, \\ x'_3 &= u_3.\end{aligned}\tag{10}$$

Partindo da hipótese de que a lei de controle esperada deve ser independente da velocidade do veículo, a variável x_1 , que conduz a evolução do sistema (10), deve ser homogênea na distância percorrida pelo trator. Uma escolha natural então é:

$$x_1 = s,\tag{37}$$

Como consequência, as variáveis x_2 e x_3 devem estar relacionadas com l e $\tilde{\theta}$ de alguma forma. Adotando uma escolha simples:

$$x_2 = l.\tag{38}$$

Então, para completar a conversão do sistema para a forma encadeada adota-se também:

$$u_1 \triangleq \dot{x}_1 = \frac{v \cos(\tilde{\theta})}{1 - l \text{curv}(s)}, \quad (39)$$

$$x_3 \triangleq \frac{\dot{x}_2}{u_1} = (1 - l \text{curv}(s)) \text{tg}(\tilde{\theta}), \quad (40)$$

$$u_2 \triangleq \dot{x}_3 = \frac{d}{dt} \left((1 - l \text{curv}(s)) \text{tg}(\tilde{\theta}) \right),$$

$$\begin{aligned} u_2 = & -\text{curv}(s) v \text{sen}(\tilde{\theta}) \text{tg}(\tilde{\theta}) - \frac{d \text{curv}(s)}{ds} \frac{v \cos(\tilde{\theta})}{1 - l \text{curv}(s)} \text{tg}(\tilde{\theta}) l \\ & + v \frac{(1 - l \text{curv}(s))}{\cos^2(\tilde{\theta})} \left(\frac{\text{tg}(\tilde{\theta})}{d} - \text{curv}(s) \frac{\cos(\tilde{\theta})}{1 - l \text{curv}(s)} \right). \end{aligned} \quad (41)$$

Observa-se que essas transformações são invertíveis desde que $l \neq 1/\text{curv}(s)$ (ponto de singularidade do modelo cinemático), $v \neq 0$, e $\tilde{\theta} \neq \pi/2$. Considerando um ponto de vista prático, uma vez que o veículo for devidamente inicializado, essas condições são respeitadas. (CARIOU *et al.*, 2001)

Segundo Cariou *et al.*, (2001), como o sistema (10) é linear, pode-se adotar a seguinte lei de controle para a entrada u_3 :

$$u_3 = -K_d x_3 - K_p x_2. \quad (42)$$

Logo, substituindo a Equação (11) no sistema (10) obtêm-se:

$$x_2'' + K_d x_2' + K_p x_2 = 0 \quad (43)$$

O que demonstra que x_2 e x_3 , e por consequência l e $\tilde{\theta}$, convergem para zero. (CARIOU *et al.*, 2001).Então,

$$\begin{aligned} \delta(l, \tilde{\theta}) = & \arctg \left(\frac{d \cos^3(\tilde{\theta})}{(1 - l \text{curv}(s))^2} \left[\frac{d \text{curv}(s)}{ds} l \text{tg}(\tilde{\theta}) \right. \right. \\ & + \text{curv}(s)(1 - l \text{curv}(s)) \text{tg}(\tilde{\theta}) + \frac{\text{curv}(s)(1 - l \text{curv}(s))}{\cos^2(\tilde{\theta})} \\ & \left. \left. - K_d(1 - l \text{curv}(s)) \text{tg}(\tilde{\theta}) - K_p l \right] \right). \end{aligned} \quad (44)$$