

UNIVERSIDADE DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

***CONTROLE DA VELOCIDADE E DA DIREÇÃO ENTRE DOIS VEÍCULOS
AGRÍCOLAS***

RODRIGO FERNANDO GALZERANO BALDO

CAMPINAS
Estado de São Paulo - Brasil
Janeiro de 2011

UNIVERSIDADE DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

***CONTROLE DA VELOCIDADE E DA DIREÇÃO ENTRE DOIS VEÍCULOS
AGRÍCOLAS***

Tese de Doutorado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de Doutor
em Engenharia Agrícola, na área de
concentração em Máquinas Agrícolas.

RODRIGO FERNANDO GALZERANO BALDO
ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO S. GRAZIANO MAGALHÃES

CAMPINAS
Estado de São Paulo - Brasil
Janeiro 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B193c Baldo, Rodrigo Fernando Galzerano
Controle da velocidade e da direção entre dois
veículos agrícolas / Rodrigo Fernando Galzerano Baldo.
--Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Paulo Sergio Graziano Magalhães.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Lógica Fuzzy. 2. Perdas durante a colheita. 3.
Automoveis - Velocidade - Controle automatico. 4.
Cana-de-açúcar - Colheita. I. Magalhães, Paulo Sergio
Graziano. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Speed and steering control between two agricultural vehicles

Palavras-chave em Inglês: Fuzzy logic, Losses during harvest, Automobiles - Speed -
Automatic control, Sugarcane

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

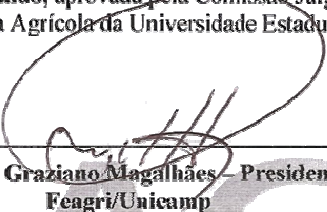
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Ricardo Inamassu, Jose Paulo Molin, Flávio Vasconcelos da
Silva, Nelson Luis Cappelli

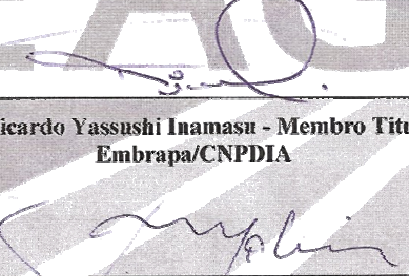
Data da defesa: 24/01/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

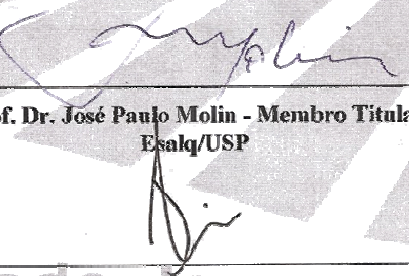
Este exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado defendida por **Rodrigo Fernando Galzerano Baldo**, aprovada pela Comissão Julgadora em 24 de janeiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Dr. Ricardo Yassushi Inamasu - Membro Titular
Embrapa/CNPDIA



Prof. Dr. José Paulo Molin - Membro Titular
Esalq/USP



Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva - Membro Titular
FEQ/Unicamp



Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli - Membro Titular
Feagri/Unicamp

CONTROLE DA VELOCIDADE E DA DIREÇÃO ENTRE DOIS VEÍCULOS AGRÍCOLAS

RESUMO

Um dos problemas encontrados na colheita mecanizada da cana-de-açúcar é a falta de sincronismo entre a colhedora e o transbordo. Este problema gera perdas tanto de matéria prima como de eficiência operacional. A primeira delas ocorre quando as máquinas ficam desalinhadas e parte dos rebolos de cana-de-açúcar é lançada fora do transbordo. A perda operacional ocorre quando as máquinas se desalinham e são obrigadas a realizar manobras para voltarem à posição de trabalho, estas manobras demandam tempo e por isso representa redução da eficiência da colheita. A presente pesquisa tem por objetivo desenvolver um sistema capaz de identificar e controlar a velocidade e o paralelismo entre a colhedora de cana-de-açúcar picada e o veículo de transbordo. Com a hipótese de que é possível conseguir sincronismo entre a colhedora e o veículo de transbordo por meio de controladores baseado em lógica fuzzy, sensores e GPS. Como sistema de controle utilizou-se a lógica fuzzy que foi modelada no “*toolbox fuzzy*” do MATLAB e simulado no *MATLAB-Simulink*, apresentando erro máximo de deslocamento entre as máquinas de 0,2 m que corresponde a 0,12% e erro de paralelismo de 5,13% com um offset de 1,5 m. Dessa simulação obteve-se a equação fuzzy e as constantes proporcionais, derivativas e integrativas do controlador que foram utilizados no sistema de controle de velocidade de um trator escravo baseado na velocidade de um mestre. O primeiro trator foi instrumentado com GPS, encoder, transmissor de radiofrequência e acionamento mecânico de aceleração. Já o segundo foi instrumentado com GPS, encoder e transmissor. Os resultados foram satisfatórios uma vez que a velocidade do trator escravo acompanhou a velocidade do mestre com o erro variando de 0,10% a 2,04% em um deslocamento total médio de 115 m. Para controlar a direção do trator utilizou-se o piloto automático modificando as informações enviadas pelo receptor de GPS-RTK de modo que o sistema trabalhe como escravo de outro veículo chamado de mestre. Para avaliar o tempo de resposta de acomodação do controle de direção, o sistema foi submetido a variações do offset que apresentou respostas entre 7,4 s a 7,9 s. Tanto o sistema de controle de velocidade como o de direção foram testados separadamente em campo.

SPEED AND STEERING CONTROL BETWEEN TWO AGRICULTURAL VEHICLES

ABSTRACT

One problems of the mechanical harvest of sugar cane is the lack of synchronization between the harvester and field wagon. This problem can causes crop losses as well as reducing operational capacity. The first occurs when the machines are misaligned and part of the sugar cane is thrown out of the wagon. The operational capacity reduce occurring when the machines become misaligned and it is required maneuver to return to working position, these maneuvers take time and therefore represents a reduction of the harvest efficiency. This research aims to develop a system capable of identifying and controlling the speed and parallelism between the sugar cane harvester and the wagon. With the hypothesis that it is possible to synchronize the harvester and the wagon based on logic fuzzy controllers, sensors and GPS. As a control system was used the logic fuzzy that was modeled on the "fuzzy toolbox" of MATLAB Simulink and simulated in MATLAB, with maximum displacement error between the machines of 0.2 m which corresponds to 0.12% and a parallelism error of 5.13% with an offset of 1.5 m. In this simulation, we got the equation and the fuzzy constant as proportional, integrative and derivative that were used in the system to control a slave tractor speed based on the master speed. The first tractor was equipped with GPS, encoder, RF transmitter and mechanical drive acceleration. The second was equipped with GPS, encoder and transmitter. The results were satisfactory since the slave tractor speed followed the master tractor speed with the ranging error from 0.10% to 2.04% in a total displacement of 115 m. To control the direction of the tractor was used the autopilot modifying the information sent by RTK so that the system works as a slave of another vehicle called a master. To evaluate the response time the system was subjected to variations of the offset, the responses was between 7.4 s to 7.9 s. Both the control system speed and steering were tested separately in the field.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de um controlador fuzzy, Mandani (1974).	8
Figura 2 - Funções de pertinência para as variáveis de entrada “diferença de velocidade” e “Erro da diferença”	12
Figura 3 - Funções de pertinência para variável de saída “atuador de aceleração”	13
Figura 4 - Funções de pertinência para variável de entrada “Diferença de direção” e “Erro da diferença”	14
Figura 5 - Funções de pertinência para variável de saída “atuador de aceleração”	15
Figura 6 - Diagrama de bloco completo da simulação do sistema de controle velocidade e direção de dois veículos	16
Figura 7 – Simulação da variação do sinal de velocidade do veículo mestre	16
Figura 8 - Diagrama de bloco do controlador de velocidade do veículo escravo.....	17
Figura 9 – Simulação da trajetória realizada pelo veículo mestre.....	17
Figura 10 - Diagrama de bloco do controlador de direção para o veículo escravo.	18
Figura 11 - Painel de display que apresenta as respostas do sistema de controle.	18
Figura 12 - Diagrama de bloco dos sensores que corrigem a posição relativa dos veículos.	19
Figura 13 - Sistema de controle de direção	20
Figura 14 - Teste dinâmico com dois receptores de GPS.	21
Figura 15 – Encoder instalado na roda do trator para medir o deslocamento	22
Figura 16 - Calibragem do encoder	23
Figura 17 - Tipos de antenas dos módulos XBee	24
Figura 18 - Sistema de controle de aceleração instalado no motor do trator do transbordo.	25
Figura 19 – Tela do programa instalado no trator mestre	27
Figura 20 – Tela do programa instalado no trator escravo	28
Figura 21 - Linha AB criada pelo operador do piloto automático	30
Figura 22 - Caminho dos veículos para os testes com os sensores.	32
Figura 23 - Sensor de ultrassom, Lv-MaxSonar (MaxBotix).....	32
Figura 24 – Instalação do sensor Lv-Maxsonar (MaxBotix).	33
Figura 25 - Sensor sonar TSPC (Senix, Bristol, USA).....	34
Figura 26 - Sensor Laser (IFM)	34
Figura 27 - Van utilizada como mestre no controle de direção.....	35
Figura 28 - Trator John Dere utilizado como veículo escravo.....	36
Figura 29 - Piloto automático Trimble EZ-Steer (Trimble Navigation, California, USA).....	37
Figura 30 - Ez - Guide Plus (Trimble Navigation, California, USA)	37
Figura 31 - Estação de base RTK.....	38
Figura 32 - Diferença de hardware do sistema comercial para o sistema	39
Figura 33 - Ângulo AB em relação ao norte.....	40

Figura 34 - Ângulo de deslocamento em relação a reta AB	41
Figura 35 - Cálculo da distância do ponto atual ao ponto inicial.....	42
Figura 36 - Cálculo do ponto atual a reta AB.....	43
Figura 37 - Cálculo da nova Latitude e Longitude	44
Figura 38 – Tela programa desenvolvido em Visual Basic.NET	45
Figura 39 - Montagem do teste de avaliação	47
Figura 40 - Superfície gerada pelo Toolbox fuzzy do MATLAB para o controle da velocidade	48
Figura 41 - Superfície gerada pelo Toolbox fuzzy do MATLAB para o controle de paralelismo.....	49
Figura 42 - Resposta de velocidade com os sensores de correção de posicionamento desligados.....	50
Figura 43 - Resposta de velocidade com os sensores de correção de posicionamento ligados	51
Figura 44 - Resposta do controle de direção da simulação	52
Figura 45 – Gráfico da resposta da velocidade do trator versus os pulso do motor de passo.....	54
Figura 46 - Gráfico da planta da velocidade do trator.....	55
Figura 47 - Gráfico de velocidade pelo tempo do trator mestre e escravo simulando a variação da velocidade do mestre. a) variação de velocidade de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; b) variação de velocidade de $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; c) variação de velocidade de $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; d) variação de velocidade de $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; e) variação de velocidade de $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; f) variação de velocidade de $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$; g) variação de velocidade de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; h) variação de velocidade de $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$	57
Figura 48 - Gráfico de velocidade pelo tempo do trator mestre e escravo variando a velocidade do mestre de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$	59
Figura 49 - Gráfico das velocidades médias do trator mestre e do trator escravo, variando a velocidade do mestre. a) variação de velocidade de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; b) variação de velocidade de $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; c) variação de velocidade de $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; d) variação de velocidade de $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; e) variação de velocidade de $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; f) variação de velocidade de $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$; g) variação de velocidade de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; h) variação de velocidade de $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$	61
Figura 50 – Teste da acurácia do sensor Lv-MaxSonar (MaxBotix).	72
Figura 51 – Teste da acurácia do sensor sonar TSPC (Senix, Bristol, USA).	74
Figura 52 - Teste da acurácia sensor Laser (IFM)	75
Figura 53 – Teste com o sistema de controle quando o offset muda de 2,00 m para 2,40 m	77
Figura 54 - Teste com o sistema de controle quando o offset muda de 2,00 m para 2,60 m.....	78
Figura 55 - Teste com o sistema de controle quando o offset muda de 2,00 m para 2,80 m.....	79
Figura 56 - Teste com o sistema de controle quando o offset muda de 2,00 m para 3,00 m.....	80
Figura 57 - Resposta do sistema de controle em trajetórias curvas.....	81

Figura 58 - Trajetória realizada pelo veículo mestre e escravo na universidade de Kentucky.....	82
Figura 59 - Resposta das medidas do sensor no decorrer do percurso	82
Figura 60 - Próximas etapas de implementação do sistema completo.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regras de analogia entre controle fuzzy e controladores convencionais	9
Tabela 2 - Tabela de regras de inferências para a velocidade	13
Tabela 3 - Tabela de regras de inferências para o controle de direção	15
Tabela 4 - Resultados dos ensaios com dois receptores de GPS.	53
Tabela 5 - Análise estatística para a variação de velocidade onde o trator mestre é simulado	58
Tabela 6 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,11 a 1,25 m.s ⁻¹	63
Tabela 7 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,25 a 1,39 m.s ⁻¹	64
Tabela 8 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,39 a 1,53 m.s ⁻¹	65
Tabela 9 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,53 a 1,39 m.s ⁻¹	66
Tabela 10 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,39 a 1,25 m.s ⁻¹	67
Tabela 11 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,25 a 1,11 m.s ⁻¹	68
Tabela 12 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,11 a 1,53 m.s ⁻¹	69
Tabela 13 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,53 a 1,11 m.s ⁻¹	70
Tabela 14 - Erro acumulado no deslocamento total dos tratores em metro	71
Tabela 15 - Estatística do sensor Lv_MaxSonar	73
Tabela 16 - Estatística do sensor TSPC	74
Tabela 17 - Estatística do sensor Laser	76
Tabela 18 - Estatística descritiva das cinco repetições para a variação de offset de 0,4 m	77
Tabela 19 - Estatística descritiva das cinco repetições para a variação de offset de 0,6 m	79
Tabela 20 - Estatística descritiva das cinco repetições para a variação de offset de 0,8 m	80
Tabela 21 - Estatística descritiva da diferença de distância medida pelo sensor e o offset	83

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Perda de matéria prima em colheita mecanizada	3
2.2 Monitoramento das perdas e da colheita de cana-de-açúcar	4
2.4 Fuzzy	6
2.4.1 - Teoria dos conjuntos fuzzy.....	6
2.4.2 - Controlador fuzzy	6
2.4.3 - Estrutura do controle fuzzy.....	7
2.4.4 - Projeto e sintonia de controladores fuzzy.....	9
2.4 Veículos autônomos e automáticos.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 Modelagem e simulação do controle de velocidade e direção entre dois veículos	12
3.1.1 Modelagem do controlador fuzzy de velocidade.....	12
3.1.2 Modelagem do controlador fuzzy de direção.....	14
3.1.3 Blocos da simulação fuzzy realizada no Simulink	15
3.2 Sistema de controle de velocidade de um veículo agrícola.....	20
3.2.1 Descrição e funcionamento do sistema.....	20
3.2.2 Periféricos.....	21
3.2.3 Programa	26
3.2.4 Avaliação do sistema	29
3.3. Controle de direção de um trator	29
3.3.1 Descrição e funcionamento do sistema.....	29
3.3.2 Avaliação do sensor.....	30
3.3.3 Controle de direção usando sensor de distância	35
4. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	48
4.1 Modelagem e simulação do controle de velocidade e direção entre dois veículos	48
4.1.1 Modelagem.....	48
4.1.2 Simulação.....	49

4.2 Sistema de controle de velocidade de um veículo agrícola.....	53
4.2.1 <i>Teste dinâmico de dois GPS</i>	53
4.2.2 <i>Avaliação do sistema</i>	53
4.3 Controle de direção de um trator	72
4.3.1 <i>Avaliação do sensor</i>	72
4.3.2 <i>Controle de direção utilizando sensor laser</i>	76
5. CONCLUSÃO	84
6. Projetos futuro.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

1. INTRODUÇÃO

Dentro do ciclo operacional da cana-de-açúcar, a etapa da colheita pode ser considerada como uma das mais importantes, dela depende a qualidade do produto entregue as usinas. A previsão do total de cana que será moída na safra 2010/11 é de 651.514 mil toneladas, com incremento de 7,8% em relação à safra 2009/10, o que significa que haverá em torno de 47.000 mil toneladas a mais para moagem nesta safra. A área total de produção de cana-de-açúcar estimada em todos estados produtores é de 8.167 mil hectares. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o primeiro país do mundo a implantar, em larga escala comercial, um combustível renovável alternativo ao petróleo (CONAB, 2010). Apesar disso, o país ainda apresenta índices de mecanização da colheita da cana-de-açúcar inferiores, a alguns países produtores, como Estados Unidos e Austrália, onde esse patamar é de 100%. Contudo observamos que embora a colheita mecanizada de cana-de-açúcar tenha expandido muito desde a sua implementação no início dos anos 70, ela ainda apresenta erros que geram perdas na colheita.

No processo produtivo para obtenção dos produtos da cana-de-açúcar (etanol, açúcar e seus derivados), os custos envolvidos nas atividades de colheita que envolve o corte, carregamento e transporte (CCT), representam grande parte do custo final do produto. Uma das maneiras de reduzi-los é implementando novas tecnologias na mecanização agrícola utilizando uma combinação de mecânica, eletrônica e agricultura de precisão.

De acordo Fernandes et al., (1978) a adoção do sistema mecanizado de colheita de cana picada introduziu certos inconvenientes, tais como, aumento dos índices de impurezas na carga, que implicam na redução da qualidade tecnológica da matéria-prima fornecida para moagem e perdas de cana no campo. As perdas no campo estão presentes em varias das operações realizadas pela colhedora como: corte de base, picagem, separação e limpeza, e transferência para o veículo de transbordo.

A falta de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo gera perdas tanto de matéria prima quanto operacional. A primeira delas ocorre quando as máquinas ficam desalinhadas e parte dos rebolos de cana-de-açúcar são lançados fora do transbordo. A perda operacional é decorrente das manobras necessárias para que o transbordo volte, novamente, ao lado da colhedora a cada vez que os veículos se desalinham, representa redução da eficiência de campo. Magalhães et al. (2008) avaliaram as perdas de matéria-prima

provenientes da falta de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo, segundo os autores esta perda corresponde a 0,96% do total de cana colhida.

A perspectiva de aumento significativo na demanda de etanol combustível requer, sem dúvida, o incremento da produção de matéria-prima em quantidade e qualidade, de forma sustentável. Para atender essa demanda, especialistas têm apresentado a necessidade de expansão da área cultivada de cana-de-açúcar para cerca de 14 milhões de hectares em 2030, esta expansão irá requerer alterações expressivas em todo o sistema produtivo (MAGALHÃES e BRAUNBECK, 2010). Por esses motivos o setor agrícola está buscando melhores tecnologias para o campo investindo em equipamentos que proporcionam menor perda de matéria prima, maior eficiência operacional e consequentemente uma maior lucratividade.

O presente trabalho tem por premissa que é possível reduzir as perdas de matéria prima e melhorar a eficiência de campo das colhedoras de cana-de-açúcar se o sincronismo entre colhedora e transbordo for mantido automaticamente. Desta forma a hipótese é que por meio de controlador baseado em lógica fuzzy, sensores e GPS é possível conseguir o sincronismo entre a colhedora e o veículo de transbordo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perda de matéria prima em colheita mecanizada

A maioria dos trabalhos científicos publicados desde a implementação da colheita mecanizada de cana-de-açúcar picada tem como objetivo apenas avaliar as perdas na colheita, tanto em relação ao seu desempenho operacional, quanto em relação às perdas de matéria prima em função de seus dispositivos e do tipo de colheita (crua ou queimada). Alguns autores procuraram apresentar soluções para reduzir as perdas (DICK e JAMES, 1992, NEVES, 2003), geralmente decorrentes de algum dispositivo da colhedora como corte de base, rolo picador, extrator primário.

Rozeff e Crawford (1980) utilizaram uma colhedora Class 1400 para comparar as perdas de uma colheita de cana sem queimar e queimada. As perdas em cana sem queimar atingiram 27,3% da produtividade inicial, comparado a 17,1% em cana queimada. Em todas as categorias - canas, rebolos, cana agregada ao ponteiro e tocos - as perdas em cana sem queimar foram maiores que em cana queimada.

Testes em campo realizado na Austrália em meados dos anos 80 mostraram que as perdas de cana pelos extratores das colhedoras variaram na faixa de 2 a 7 t.ha⁻¹ em colheita de cana sem queimar e 1 a 5 t.ha⁻¹ na cana queimada (DICK, 1986 e DICK, RIDGE 1988).

Scandaliaris et al. (1983) verificaram as perdas e as impurezas na matéria-prima causada pela colheita tanto manual quanto mecânica. Eles concluíram que na colheita de cana picada queimada as perdas no campo (100%) se dividiram em cana agregada ao ponteiro (12%), tocos (18%), rebolos (32%) e colmos (38%). Na cana sem queimar os resultados foram semelhantes com a diferença para maiores perdas de rebolos (38%), seguidas por colmos (34%).

Moraes (1992) verificou que as perdas no campo, durante a colheita mecanizada da cana, foram da ordem de 5%, sendo que se verificou correspondência do aumento das perdas de pedaços de cana com o acréscimo da rotação do extrator primário.

Neves (2003) destaca que as perdas de cana-de-açúcar durante a colheita mecânica podem ser divididas em duas componentes, perdas visíveis e invisíveis. As perdas são denominadas visíveis quando podem ser detectadas no campo após a colheita constituindo principalmente de canas inteiras, rebolos e tocos resultantes da altura do corte basal. Estas perdas podem ser facilmente determinadas por coleta manual. As perdas na forma de caldo,

serragem e estilhaços de cana, que ocorrem devido à ação de mecanismos rotativos que cortam, picam e limpam a cana durante o processamento interno nas colhedoras, são definidas como perdas invisíveis.

Magalhães et al. (2008) avaliaram as perdas de matéria-prima provenientes da falta de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo, segundo os autores esta perda corresponde a 0,96% do total de cana colhida em uma área. Na tentativa de minimizar estas perdas os autores desenvolveram um sistema de alerta para a colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Este sistema era composto por um par de sensores de ultrassom que eram instalados na parte superior do elevador da colhedora e captavam a presença da carreta do transbordo. Esta informação era enviada via rádio frequência ao operador do transbordo que visualizava a posição relativa das máquinas por meio de uma interface de LED. Neste projeto as decisões de avanço e atraso do transbordo eram executadas pelo próprio operador. Segundo os autores, com o sistema de sincronismo ligado, as perdas de rebolo de cana reduziram em 8,8% ou 60 kg ha⁻¹ por colhedora por dia.

2.2 Monitoramento das perdas e da colheita de cana-de-açúcar

Para reduzir estas perdas e melhorar a eficiência das colhedoras, alguns trabalhos de pesquisa têm sido conduzidos com o intuito de instrumentar e monitorar as colhedoras de cana-de-açúcar. Um monitor de perdas de rebolo de cana-de-açúcar eletrônico (operando os sinais elétricos fornecidos por um sensor piezelétrico) foi desenvolvido por Dick e James (1992) e Dick e Hilton (1992), que fornece ao operador uma contínua indicação de níveis relativos de perda de cana por unidade de área colhida. Isto torna possível ao operador fazer ajustes operacionais para redução das perdas. Neves et al. (2004) instalaram em uma colhedora um monitor de perdas de cana composto de sensor piezelétrico de impacto, instalado na carenagem do extrator primário da colhedora e um mostrador digital, que apresenta a contagem de impactos captados pelo sensor. Os resultados mostraram que a eficiência de limpeza do extrator primário, as perdas de cana-de-açúcar em geral e a velocidade do ventilador, estão diretamente relacionados.

A preocupação com a redução das perdas e melhora da eficiência das colhedoras também é uma preocupação dos fabricantes. A fabricante de colhedoras de cana-de-açúcar John Deere instalou em suas colhedoras dispositivo para o controle automático de altura de

corte basal. Este dispositivo foi avaliado por Salvi (2007) analisando a altura de corte e as impurezas na matéria prima para a colhedora de cana picada operando com e sem o dispositivo e com dois operadores distintos. O uso do dispositivo auxiliou na manutenção da altura de corte, principalmente para operadores com menor habilidade/experiência. Não houve diferença quanto a impurezas enviadas com a matéria prima utilizando ou não o dispositivo e constatou-se que a operação não está sob controle.

Esta preocupação com a instrumentação e monitoramento da colhedora também está presente nos gerentes agrícolas das usinas, como pode ser observado no trabalho apresentado por Menegatti et al. (2005). Os autores descrevem neste trabalho o sistema implementado na Usina Cerradinho para monitoramento e controle de veículos, transbordo e rendimento das carregadoras de cana utilizadas na colheita manual. Para implementação do sistema foi necessário a instalação de diversos sensores e instrumentos em todos os equipamentos utilizados durante a colheita e o transporte da cana até o hilo da usina. A Usina São João de Araras também implementou um sistema de instrumentação e controle a distância de suas colhedoras com o auxílio de uma empresa especializada, mas não divulgou os resultados obtidos.

Magalhães e Cerri (2007) desenvolveram um monitor de produtividade de cana-de-açúcar para colhedoras autopropelidas. O sistema é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo. Para determinar o peso da matéria-prima colhida células de carga foram instaladas no elevador da colhedora. Estes dados, juntamente com as informações obtidas por um GPS instalado na colhedora, permitem a elaboração de um mapa digital que representa a superfície de produção para a área colhida.

A evolução tecnológica das colhedoras de cana-de-açúcar não foi significativa nos últimos anos, mantendo desde sua implementação os mesmos conceitos nos vários sistemas de processamento de cana e principalmente os mesmos componentes mecânicos, eletrônicos e hidráulicos, diferentemente do que ocorreu com as colhedoras de grãos, (BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2010). A colhedora não evoluiu muito na tentativa de minimizar as perdas causadas na colheita. Isto justifica o investimento em novas tecnologias e aprimoramentos que modernizem estas máquinas tornando-as mais eficientes e produtivas em operação no campo.

2.4 Fuzzy

2.4.1 - Teoria dos conjuntos fuzzy

No dicionário Webster's, a palavra fuzzy é traduzida como algo vago ou indistinto, o antônimo de preciso e exato.

Na teoria dos conjuntos fuzzy desenvolvida por Zadeh (1965) não há conjuntos que apresente limites bem definidos. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou é “completamente verdadeiro” ou é “completamente falso”. Entretanto, na lógica fuzzy, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

Horiuchi e Kishimoto (2002) definiram os conjuntos fuzzy como uma ferramenta matemática capaz de tratar informações qualitativas e expressões linguísticas. A lógica fuzzy pode ser definida como uma ferramenta que reproduz um modelo do raciocínio humano (FERREIRA e PARANHOS, 2004).

Os sistemas baseados em regras fuzzy, por sua natureza multidisciplinar, têm várias denominações, como: sistema de inferência fuzzy, sistema especialista fuzzy, modelo fuzzy, controlador lógico fuzzy ou simplesmente sistema fuzzy (JANG e GULLEY, 1993). Uma vantagem deste sistema é que têm habilidade para explicitar linguisticamente relações que ou são muito complexas ou não são suficientemente bem entendidas para serem descritas por modelos matemáticos precisos (SUDKAMP e HAMMMEL, 1996).

2.4.2 - Controlador fuzzy

O controlador fuzzy possibilita um tratamento das implicações lógicas seguindo regras naturais de raciocínio, analisando condições e estipulando consequências (SHAW e SIMÕES, 1999; TSOUKALAS e UHRIG, 1997). Seus fundamentos advêm da teoria dos conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*), que permite a manipulação de expressões verbais abstratas (pequeno, próximo, muito rápido, etc.).

De acordo com Pinheiro (2000) as teorias de controle clássico e moderno apresentam limitações tanto em processos de alta complexidade como em não linearidade. Já nos projetos que utilizam os controladores fuzzy não é necessário conhecer o modelo matemático do processo a ser controlado (DRIANKOV et al., 1996).

Segundo Pereira Filho (1999) A principal ideia dos algoritmos baseados na lógica fuzzy é imitar o raciocínio humano para controlar processos de difícil modelagem. O controle fuzzy

utiliza-se de regras lógicas no algoritmo de controle com a intenção de descrever numa rotina a experiência humana, intuição e heurística para controlar um processo (LEITE, 2007).

Para Pereira Filho (1999) as principais vantagens no uso dos controladores fuzzy estão na não necessidade de um modelo matemático do processo, o controlador permite implementar o conhecimento e a experiência de um especialista humano e possibilita controlar processos não lineares. Já as desvantagens para o autor são a não padronização no processo de aquisição do conhecimento humano e de estabelecimento das regras e a dificuldade no ajuste das funções de pertinência e estabilidade do sistema, pois em geral o modelo é desconhecido.

Para Pinheiro (2000) os controladores fuzzy têm-se mostrado mais eficiente que os controladores clássicos em aplicações onde não se dispõe de informações detalhadas do sistema. Contudo, se o modelo matemático do sistema existir, este pode ser usado para simulação e para testes da estratégia de controle (PEREIRA FILHO, 1999).

Segundo Huamaní (2003) o objetivo geral dos sistemas fuzzy é combinar de forma efetiva, tanto a informação numérica como a linguística, para obter sistemas eficientes e aplicáveis em diversas áreas do conhecimento, como a economia, computação, engenharia e medicina.

Conforme afirmações de Leite (2007) os controladores fuzzy possuem desempenho superior aos controladores convencionais, devido à natureza heurística, fornecendo tratamento de não linearidades, quando sintonizados de forma adequada.

2.4.3 - Estrutura do controle fuzzy

A Figura 1 apresenta a estrutura que constitui um controlador fuzzy, conforme proposição de MANDANI (1974).

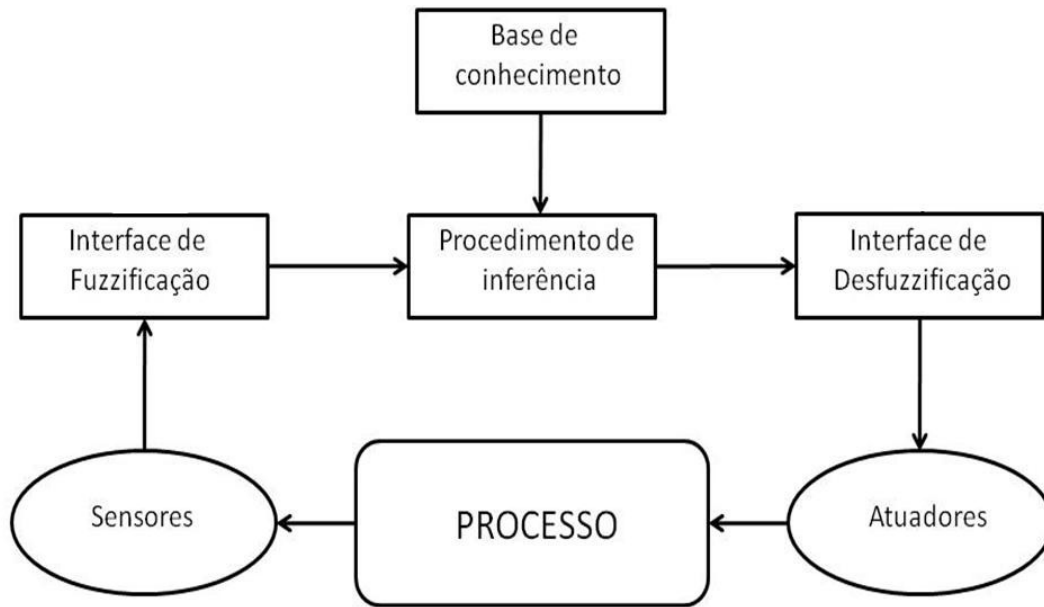


Figura 1 - Estrutura de um controlador fuzzy, MANDANI (1974).

- *Interface de fuzzificação*: é o mapeamento do domínio de entradas precisas (valores numéricos reais obtidos dos sensores) para valores de entradas fuzzy, definidos pelas funções de pertinência;
- *Base de conhecimento*: consiste da base de regras, em geral construída com o auxílio de especialistas, que caracteriza a estratégia de controle e suas metas;
- *Base de dados*: armazena as definições dos parâmetros das funções de pertinência e os fatores de escala a serem utilizados no controlador;
- *Procedimento de inferência*: processa os dados nebulosos de entrada junto com as regras de modo a inferir as ações de controle fuzzy;
- *Interface de defuzzificação*: consiste na conversão da variável fuzzy produzida pela máquina de inferência em uma variável numérica que atuará no processo de forma a regulá-lo;

O controlador clássico proporcional-integral-derivativo (PID) pode ser representado por uma função linear do erro, da variação do erro e da segunda variação do erro já os controladores fuzzy são não lineares, conforme demonstrado por JAGER (1995). Dependendo das variáveis consideradas na premissa das regras fuzzy, eles podem ser análogos aos controladores P, PI, PD e PID convencionais, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Regras de analogia entre controle fuzzy e controladores convencionais

Regra Fuzzy	P	I	D
Se o erro é __ então a ação de controle é __	X		
Se o erro é __ então a variação na ação de controle é __		X	
Se o erro é __ e a variação do erro é __ então a ação de controle é __	X		X
Se o erro é __ e a variação do erro é __ então a variação na ação de controle é __	X	X	
Se o erro é __ e a variação do erro é __ e segunda variação do erro é __ então a variação na ação de controle é __	X	X	X

Um controle com estrutura fuzzy-PI é um controle prático que possui capacidade de remover o offset da resposta em processos. Este tipo de controlador gera uma saída de controle incremental a partir do erro e da totalização do erro no tempo, sendo considerado um controle de velocidade. O controle fuzzy-PD gera saídas de controle a partir das entradas de erro e da variação do erro, sendo considerado controle de posição. O controlador fuzzy-PID produz uma saída incremental a partir do erro, variação do erro e aceleração do erro (LI e GATLAND, 1996).

Pinheiro (2000) verificou que para ações lineares os controladores fuzzy não justificam melhorias de desempenho comparado aos controladores clássicos. No entanto, em sistemas dinâmicos que apresentam variações devido a alterações de parâmetros ou não linearidades, a utilização de controladores fuzzy que contenham comportamentos não lineares pode produzir melhores resultados que os controladores lineares.

2.4.4 - Projeto e sintonia de controladores fuzzy

Yager e Filev (1994) e Jager (1995) recomendam para simplificação e unificação do projeto de controladores fuzzy o uso de universos de discurso normalizados, tanto das variáveis de entrada quanto de saída.

Shaw e Simões (1999) consideram que a saída do sistema torna-se mais suave com o aumento da quantidade de variáveis linguísticas. Assim, a transição de um estado para o outro se torna menos abrupta. No entanto, essa maior quantidade aumenta a possibilidade do modelo tornar-se instável.

De acordo com alguns autores (JAGER, 1995; LEITE, 2007) o método de defuzzificação mais utilizado é o centróide. Neste método calcula-se o centro da área composta

pela união de todas as contribuições de regras, e os graus de pertinência são utilizados como pesos para o cálculo de uma média ponderada. Porém, outros métodos de defuzzificação também são referenciados, tais como “critério dos máximos”, “média dos máximos” e “bissetor da área”.

Segundo Cox (1995) a preferência pelo método centróide deve-se principalmente à sua propriedade em fornecer saídas fuzzy que provocam ações suaves de mudanças para os próximos passos dos sistemas de controle.

Uma das desvantagens do controlador fuzzy é que não existe um método padrão para a sua sintonia. Pinheiro (2000) defende que a sintonia pode ser realizada com modificações nas funções de pertinência, nos fatores de escala das variáveis e até mesmo por alterações nas regras. Também são utilizados procedimentos por meio de analogias com outros sistemas ou tentativa e erro, sendo este o método mais usual. Alguns resultados bem sucedidos de sintonia são obtidos da combinação de conhecimentos sobre o sistema a ser controlado e do uso de analogias entre os controladores fuzzy e os controladores PID clássicos (PEREIRA FILHO, 1999).

Segundo Serra (2005) existe uma ampla aceitação na comunidade acadêmica e na indústria em aplicações de identificação e controle de sistemas dinâmicos. A aceitação se atribui principalmente ao desenvolvimento da teoria dos conjuntos fuzzy, às inúmeras possibilidades práticas e ao grande sucesso comercial das aplicações.

2.4 Veículos autônomos e automáticos

Para Stombaugh et al., (1998) os veículos autônomos e pilotos automáticos tentam aliviar o operador de muitos, se não todas, as tarefas envolvidas na colheita mecanizada. Existem vários benefícios dos pilotos automáticos na agricultura, um dos principais deles é a redução da fadiga dos operadores das máquinas, também é possível verificar o aumento do volume e da qualidade de matéria prima colhida, enquanto que os custos de produção são reduzidos e as condições de trabalho melhoradas.

O avanço das tecnologias embarcadas e consequentemente o avanço da agricultura de precisão (AP) vem contribuindo para o crescimento do potencial de veículos autônomos e pilotos automáticos na agricultura (REID et al., 2000). Porém, desenvolver um veículo que possa navegar autonomamente em ambientes agrícolas é um desafio e uma tarefa difícil para

qualquer veículo agrícola (HAGRAS et al., 2001). Este tipo de sistema envolve bastante tecnologia, bem como alguns sensores mais avançados da engenharia (RAMALINGAM et al., 2000). Sistemas como piloto automático, acelerador eletrônico, controle automático de temperatura e transmissões eletrônicas estão se tornando comuns em máquinas agrícolas (FOSTER et al., 2005). Há um crescente interesse na adoção de pilotos automáticos e isso se dá pelo fato de que este tipo de sistema diminui o estresse do operador e aumenta o número de horas trabalhadas, possibilitando ainda uma maior confiabilidade no trabalho noturno (BERGLUND e BUICK, 2005).

Pawlikowski (1999) desenvolveu um sistema de controle de velocidade e deslocamento utilizando lógica fuzzy. Para este sistema o autor utilizou as funções de pertinências em forma de pirâmide como processo de “fuzzificação” e utilizou o método centróide para a resposta ou “desfuzzificação”. Este controle foi simulado no programa MATLAB® (MatWorks, Company, Massachusetts, USA) e segundo o autor as respostas linguísticas do sistema corresponderam ao esperado para cada situação proposta na simulação. Ramalingam et al. (2000) desenvolveram um piloto automático para um trator utilizando como sensor de posição um DGPS, um potenciômetro como sensor de ângulo de rodas e uma válvula hidráulica como atuador, o sistema apresentou um erro máximo de direção de 0,6 m a uma velocidade de $2,22 \text{ m.s}^{-1}$.

Kodagoda et al. (2002) compararam um sistema de controle, baseado em lógica fuzzy, de velocidade e direção para veículos com um sistema de controle clássico linear PID. Para validar os testes os autores implementaram os sistemas em um carro de golfe onde, segundo os autores, o sistema fuzzy obteve uma melhor resposta em relação ao PID convencional principalmente na acurácia durante o percurso, no erro em regime e na robustez. Os autores ainda ressaltam que a lógica fuzzy é ideal para sistemas complexos e que possui parâmetros variáveis. Kise et al. (2005) utilizaram duas câmeras como sensores de visão para guiar um trator agrícola, os autores utilizaram um controlador clássico para controlar a direção do trator e obtiveram um erro de 0,05 m a uma velocidade de $3,0 \text{ m.s}^{-1}$. Os autores afirmam que poderiam melhorar a acurácia do sistema utilizando um controlador PID fuzzy. Já Subramanian et al. (2006) desenvolveram um sistema de piloto automático para um trator utilizando um radar laser como sensor de proximidade e um encoder para identificar a posição das rodas. Um controlador PID convencional foi desenvolvido e implementado para controlar o caminho percorrido pelo trator. Segundo o autor o máximo erro de direção foi de 0,06 m.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Modelagem e simulação do controle de velocidade e direção entre dois veículos

3.1.1 Modelagem do controlador fuzzy de velocidade

O controlador fuzzy de velocidade projetado possui duas entradas e uma saída, a primeira entrada é a diferença de velocidade das máquinas (veículo mestre – veículo escravo), a segunda entrada é a diferença do erro de velocidade (diferença de velocidade atual – diferença de velocidade passada), já a saída do sistema é uma porcentagem do atuador da aceleração do veículo.

As funções de pertinência das variáveis de entrada, onde a primeira entrada é representada pela diferença de velocidade entre o veículo mestre, considerado como referência, e a velocidade do veículo escravo, e a segunda entrada que é o erro desta diferença, estão representadas pela Figura 2. As entradas variam de $-0,69 \text{ m.s}^{-1}$ a $0,69 \text{ m.s}^{-1}$ ($-2,5$ a $2,5 \text{ km.h}^{-1}$), essa faixa de velocidade foi escolhida, pois representa a máxima e a mínima diferença de velocidade possível entre os veículos mestre e escravo, considerando que a mínima velocidade do veículo onde o sistema de controle é acionado é de $0,97 \text{ m.s}^{-1}$ ($3,5 \text{ km.h}^{-1}$) e a máxima é de $1,67 \text{ m.s}^{-1}$ ($6,0 \text{ km.h}^{-1}$).

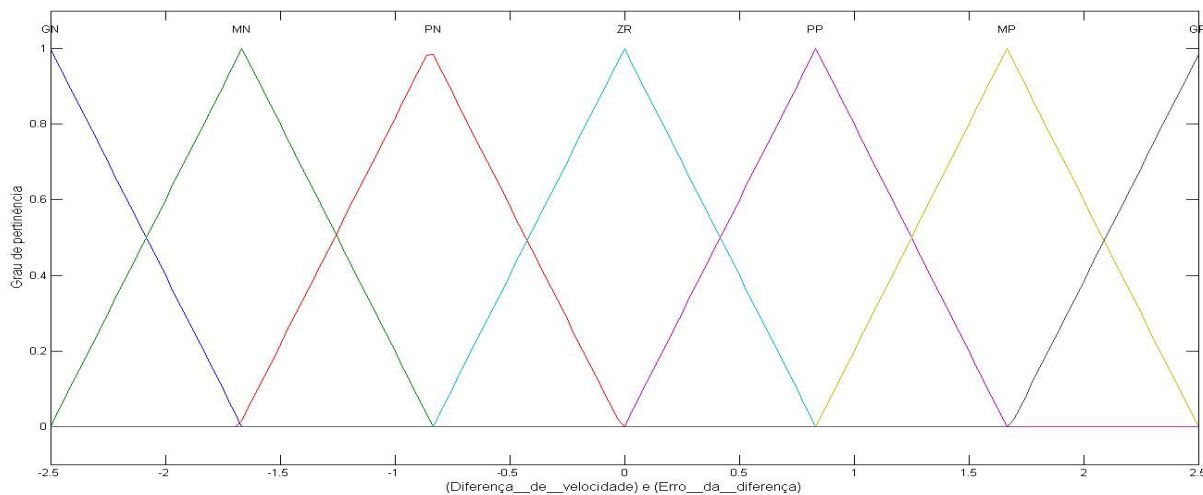


Figura 2 - Funções de pertinência para as variáveis de entrada “diferença de velocidade” e “Erro da diferença”

Já a função de pertinência da variável de saída (atuador da aceleração) está representada pela Figura 3. Essa saída varia de -1 a +1, onde -1 representa a máxima desaceleração possível e +1 a máxima aceleração possível.

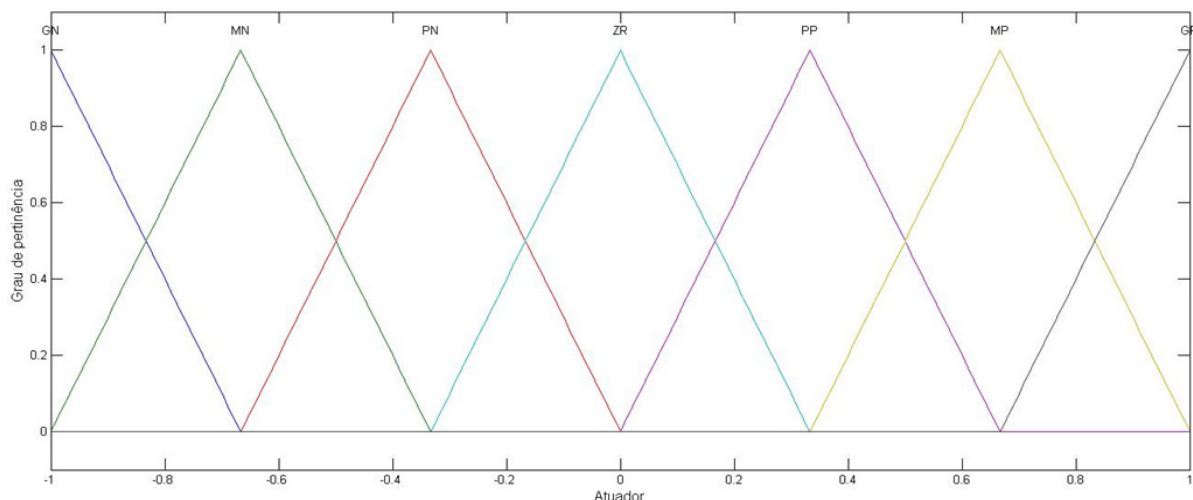


Figura 3 - Funções de pertinência para variável de saída “atuador de aceleração”

A definição do conjunto de regras de inferências das relações entre os valores de entrada e saída do sistema velocidade basearam-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela de regras de inferências para a velocidade

Diferença de velocidade Erro da diferença	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
GN	GN	GN	GN	GN	ZR	ZR	ZR
MN	GN	GN	GN	MN	ZR	ZR	ZR
PN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP	PP
ZR	MN	MN	PN	ZR	PP	MP	MP
PP	PN	PN	ZR	PP	MP	GP	GP
MP	ZR	ZR	ZR	MP	GP	GP	GP
GP	ZR	ZR	ZR	GP	GP	GP	GP

- GN – Grande Negativo MN – Médio Negativo PN – Pequeno Negativo
- ZR – Zero
- PP – Pequeno positivo MP – Médio Positivo GP – Grande Positivo

A

Tabela 2 pode-se notar que se a entrada “Diferença de velocidade” é “PP” (pouco positiva) e a outra entrada “diferença do erro” também é “PP” o valor da saída “Porcentagem do atuador de velocidade” será “MP” (médio positivo). Por meio dessa tabela gerou-se 49 regras de

inferências. O método de defuzzificação utilizado foi o centróide, devido principalmente à sua propriedade em fornecer saídas fuzzy que provocam ações suaves de controle.

3.1.2 Modelagem do controlador fuzzy de direção

O controlador fuzzy de direção projetado segue os mesmos princípios do controlador de velocidade. O sistema possui duas entradas e uma saída, a primeira entrada é a diferença entre o posicionamento paralelo das máquinas em relação a distância desejada (distância entre as máquinas – offset), a segunda entrada é a diferença do erro de posicionamento (diferença de posição atual – diferença de posição passada), a saída do sistema é uma porcentagem do atuador de direção do trato.

As funções de pertinência das variáveis de entrada estão representadas pela Figura 4. Onde as entradas variam agora de -1,5 a 1,5 m. Esse intervalo foi escolhido, pois na simulação a distância desejada entre as máquina é de 1,5 m, portando o offset é de 1,5 m. Quando a distância entre os veículos for de 1,5 m a entrada será zero, que é a diferença entre o offset e a distância medida. Se a distância entre os veículos for a mínima possível que é 0,0 m ou a máxima aceitável, que é 3,0 m, a entrada será -1,5 m ou 1,5 m respectivamente .

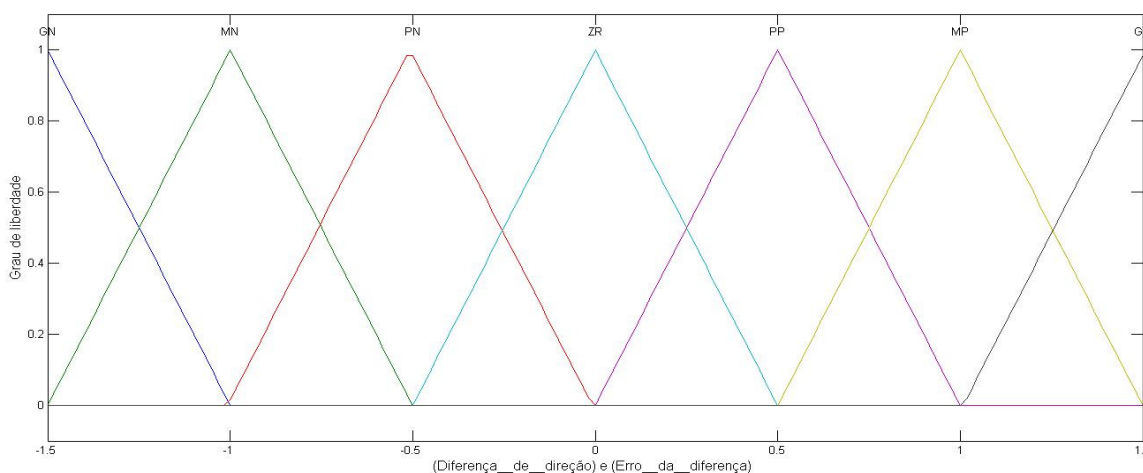


Figura 4 - Funções de pertinência para variável de entrada “Diferença de direção” e “Erro da diferença”

A Figura 5 representa as funções para a variável de saída da direção que vai de -1 a +1, onde -1 significa girar o volante totalmente para a esquerda e +1 girar o volante totalmente para a direita, os valores intermediários representam uma relação linear proporcional entre as duas posições.

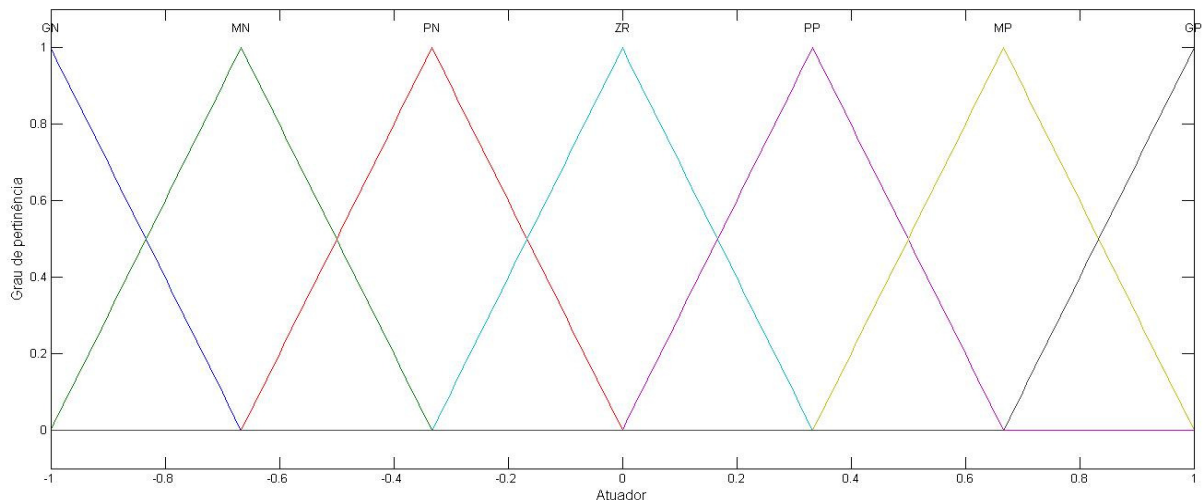


Figura 5 - Funções de pertinência para variável de saída “atuador de aceleração”

A definição do conjunto de regras das relações entre os valores de entrada e saída do sistema basearam-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Tabela de regras de inferências para o controle de direção

Diferença de direção Erro da diferença	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
GN	GN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR
MN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP
PN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP	MP
ZR	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
PP	MN	PN	ZR	PP	MP	GP	GP
MP	PN	ZR	PP	MP	GP	GP	GP
GP	ZR	PP	MP	GP	GP	GP	GP

- GN – Grande Negativo MN – Médio Negativo PN – Pequeno Negativo
- ZR – Zero
- PP – Pequeno positivo MP – Médio Positivo GP – Grande Positivo

Por meio da Tabela 3 gerou-se as 49 regras de inferência para o sistema de controle de direção, o método de defuzzificação utilizado foi o da centróide. Após a obtenção da superfície fuzzy gerada pelo *Toobox* do MATLAB utilizou-se o software TableCurve3D.

3.1.3 Blocos da simulação fuzzy realizada no Simulink

Para simular o sistema de controle apresentado utilizou-se a ferramenta *Simulink* do *MATLAB*. A Figura 6 apresenta os seis blocos que dividem esta simulação, além da chave

“Manual switch” que é responsável por ligar ou desligar o bloco “Sensores” que simulam o funcionamento de sensores para corrigir erros de velocidades.

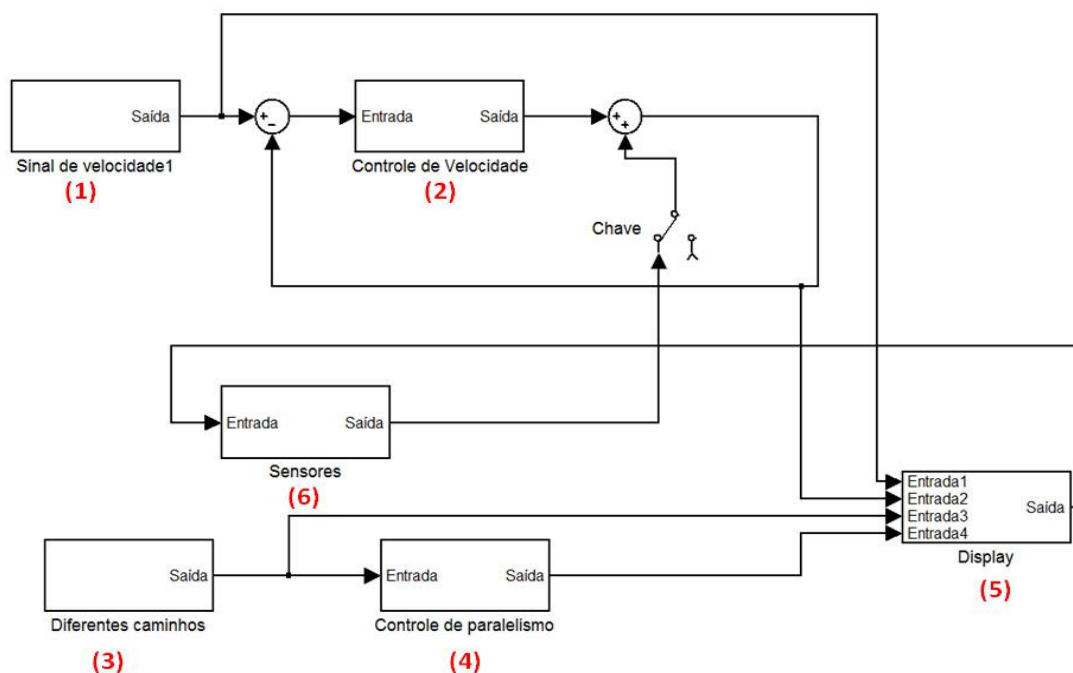


Figura 6 - Diagrama de bloco completo da simulação do sistema de controle velocidade e direção de dois veículos

O bloco 1 da Figura 6 “Sinal de velocidade” é o responsável por simular a variação da velocidade do veículo mestre que será comparada com a velocidade do veículo escravo. A Figura 7 mostra o sinal de velocidade gerada no bloco.

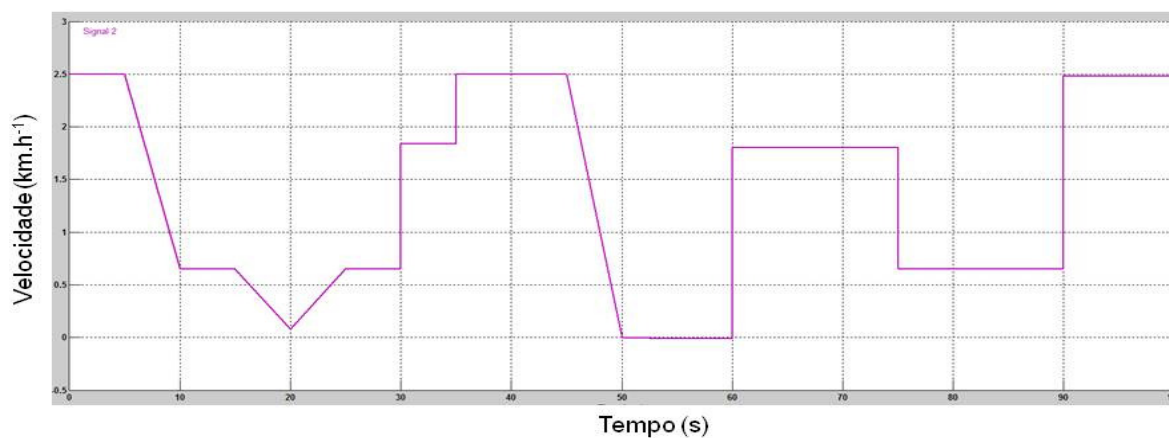


Figura 7 – Simulação da variação do sinal de velocidade do veículo mestre

O bloco 2 da Figura 6 “Controle de velocidade” é onde estão armazenados todos os parâmetros do sistema de controle de velocidade. Neste bloco ajustou-se as constantes do

Fuzzy-PID (proporcional – integral - derivativo), inseriu-se a lógica fuzzy modelada no *MATLAB*, (item 3.4.1) e aplicou-se o controle de velocidade do veículo escravo, (Figura 8). A função de transferência da velocidade usada na simulação foi obtida experimentalmente como apresentado Equação 6.

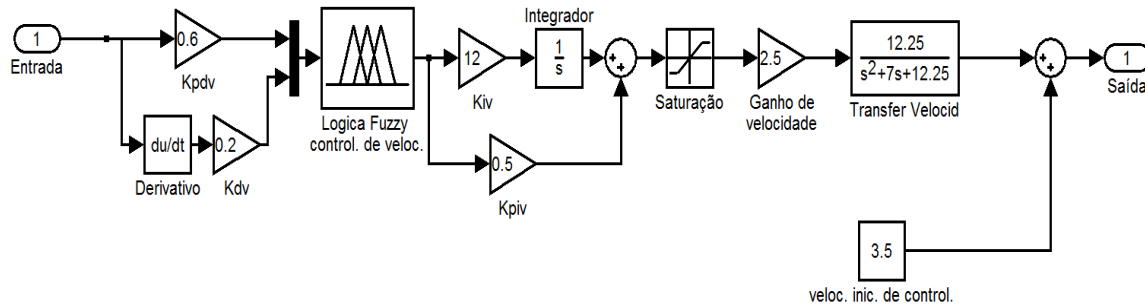


Figura 8 - Diagrama de bloco do controlador de velocidade do veículo escravo

O bloco 3 da Figura 6 “Diferentes caminhos” representa a trajetória aleatória de uma colhedora que deverá ser acompanhada pelo trator do transbordo. A Figura 9 apresenta a trajetória gerada para a simulação.

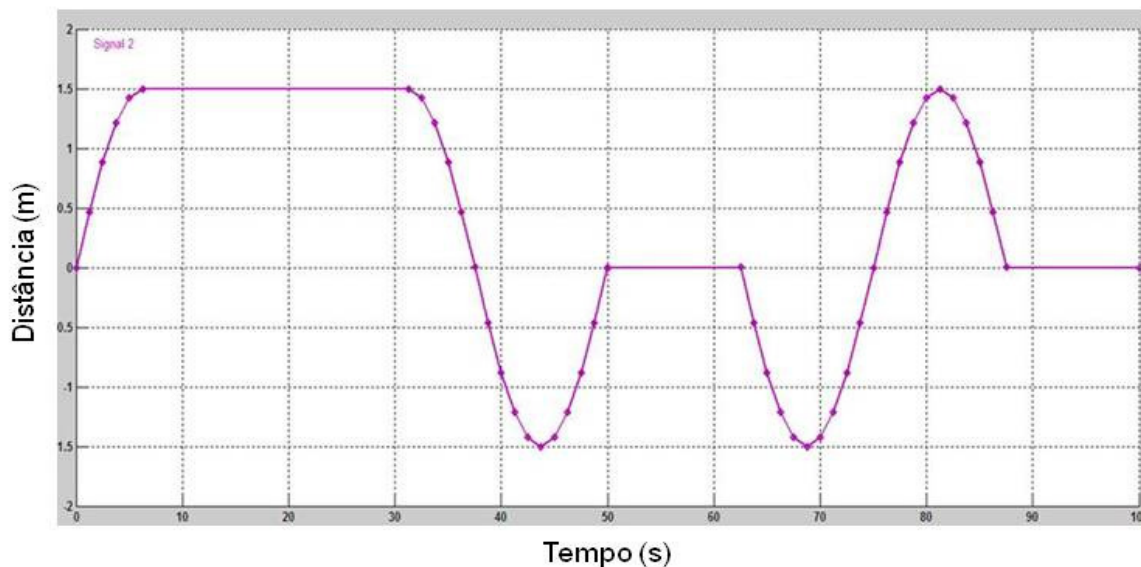


Figura 9 – Simulação da trajetória realizada pelo veículo mestre.

O bloco 4 da Figura 6 “Controle de paralelismo” (Figura 10) é onde estão armazenados todos os parâmetros do sistema de controle da direção do trator. Neste bloco ajustou-se as constantes do PID, inseriu-se a lógica fuzzy desenvolvida no *MATLAB*, item 3.4.2 e aplicou-se o controle sobre a direção do veículo escravo. A função de transferência da direção utilizada

foi proposta por Ramalingam et al. (2000) que se basearam no modelo da bicicleta, segundo os autores é o modelo mais comum para descrever o comportamento de um veículo dinâmico.

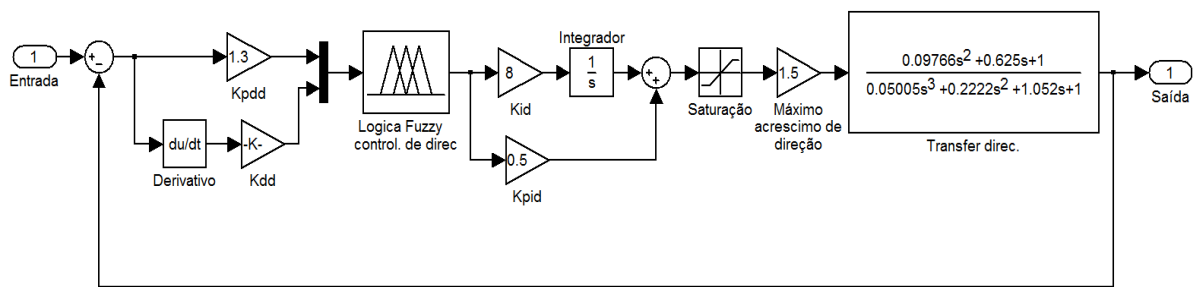


Figura 10 - Diagrama de bloco do controlador de direção para o veículo escravo.

A Figura 11 apresenta o bloco 5 da Figura 6 “Painel de display” que foi desenvolvida para a visualização das respostas do sistema de controle. Neste bloco é possível visualizar no osciloscópio virtual do MatLab o deslocamento das máquinas, a resposta de velocidade e a resposta de direção. Também é possível acompanhar a resposta numérica do sistema por meio de seis displays digitais que indicam: deslocamento total do veículo mestre, deslocamento total do escravo, diferença de deslocamento no final do percurso, máxima diferença de sincronismo, máxima diferença de paralelismo e máxima diferença de velocidade durante o percurso. Além disso, é possível acompanhar o deslocamento das máquinas na forma de um gráfico 2D.

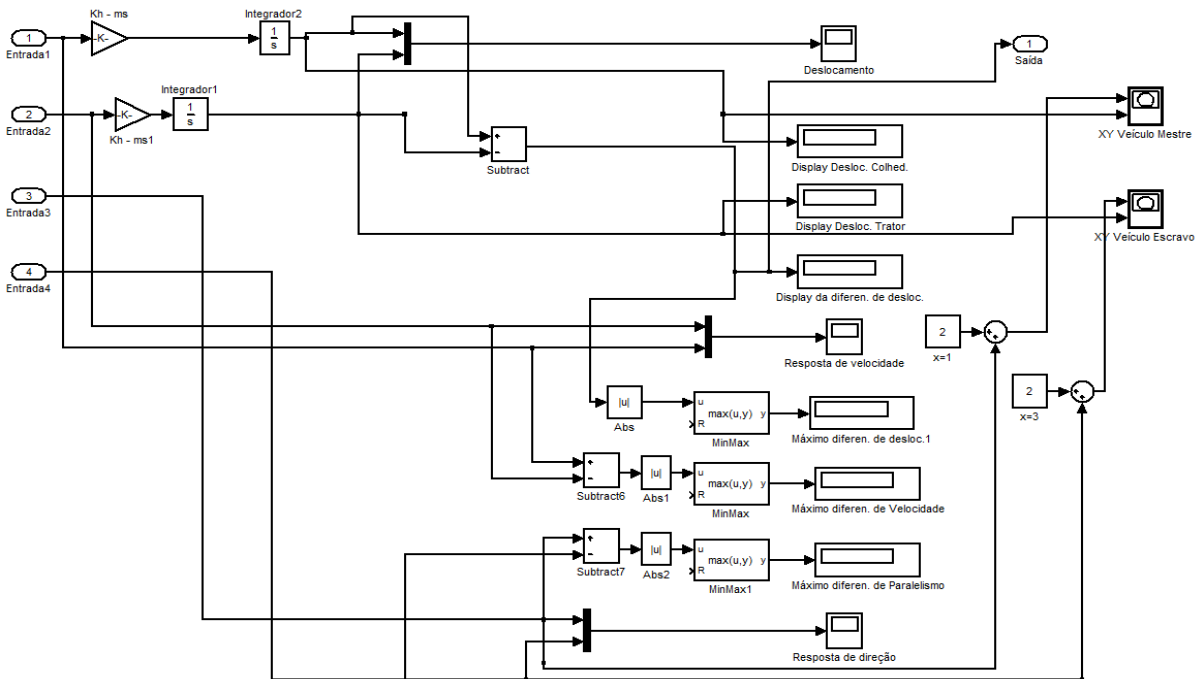


Figura 11 - Painel de display que apresenta as respostas do sistema de controle.

A Figura 12 apresenta o bloco 6 da Figura 6 que representa cinco sensores que ficaram instalados na lateral do veículo escravo para identificar a posição relativa de sincronismo das máquinas. Quando, por exemplo, o sensor 1 é acionado indica que o veículo escravo está muito a frente do mestre e a velocidade do escravo é decrementada de $0,056 \text{ m.s}^{-1}$ ($0,2 \text{ km.h}^{-1}$). Caso o sensor 4 for acionado indica que o veículo mestre está a frente do escravo e neste caso a velocidade é aumentada em $0,028 \text{ m.s}^{-1}$ ($0,1 \text{ km.h}^{-1}$). Para simular esta situação criou-se o bloco “Sensores” que ao identificar que uma máquina está se deslocando mais do que a outra, envia um acréscimo ou decréscimo na velocidade do trator.

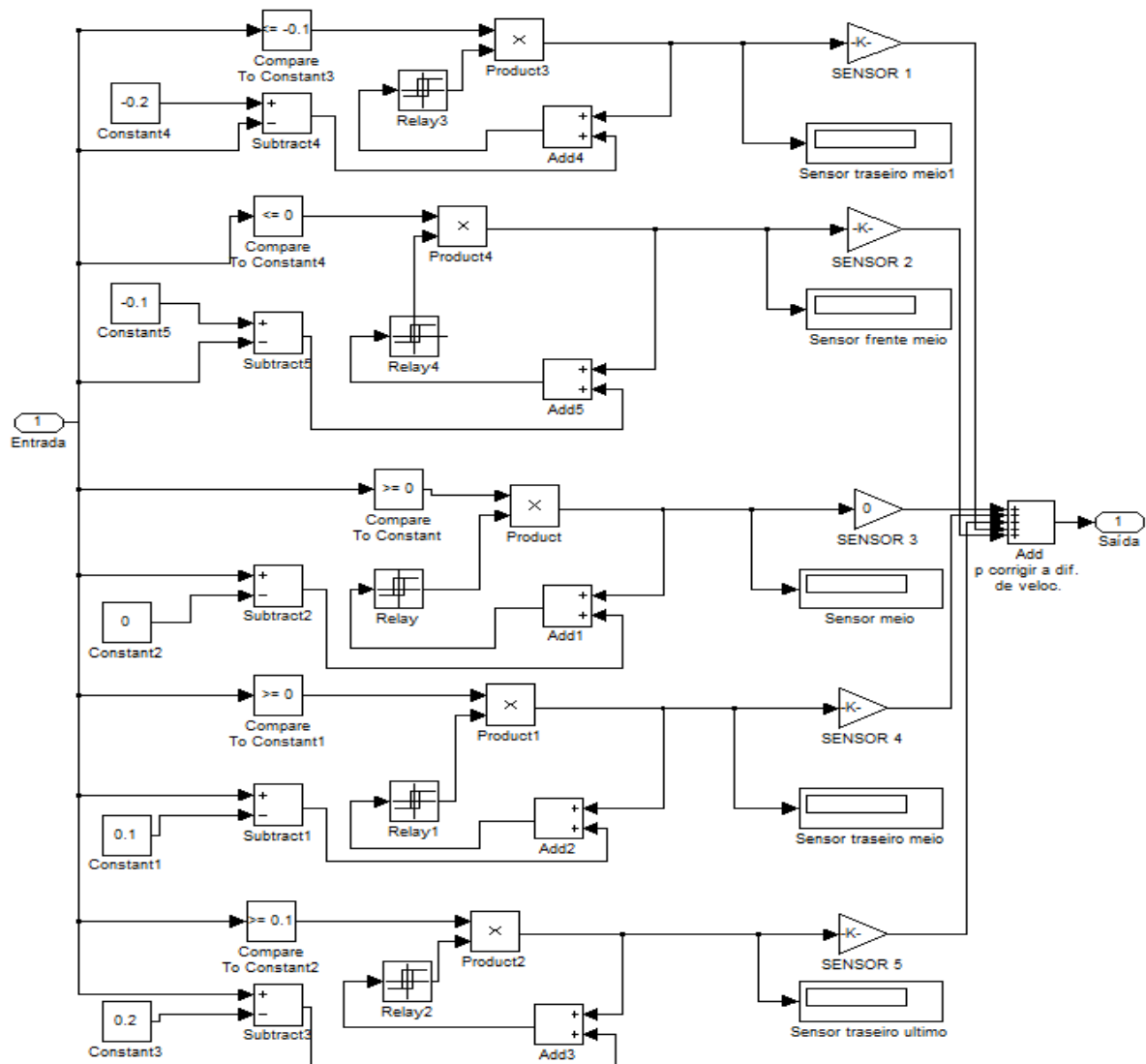


Figura 12 - Diagrama de bloco dos sensores que corrigem a posição relativa dos veículos.

3.2 Sistema de controle de velocidade de um veículo agrícola

3.2.1 Descrição e funcionamento do sistema

Como apresentado na Figura 13 o trator mestre foi instrumentado com notebook, transmissor de rádio frequência, encoder e GPS. O programa mestre instalado no notebook é responsável por ler a velocidade do trator mestre enviada pelo GPS, ler e armazenar os pulsos do encoder, instalados na roda e envia as informações de velocidade ao escravo.

O trator escravo, por sua vez foi instrumentado com notebook, transmissor de rádio frequência, encoder, atuador de velocidade e GPS. O programa escravo é responsável por ler a velocidade do trator escravo enviada pelo GPS, ler e armazenar os pulsos do encoder, receber a velocidade do trator mestre enviada por rádio frequência, comparar as velocidades e executar a atuação do sistema acionando o atuador de velocidade que é responsável pela aceleração do trator escravo.

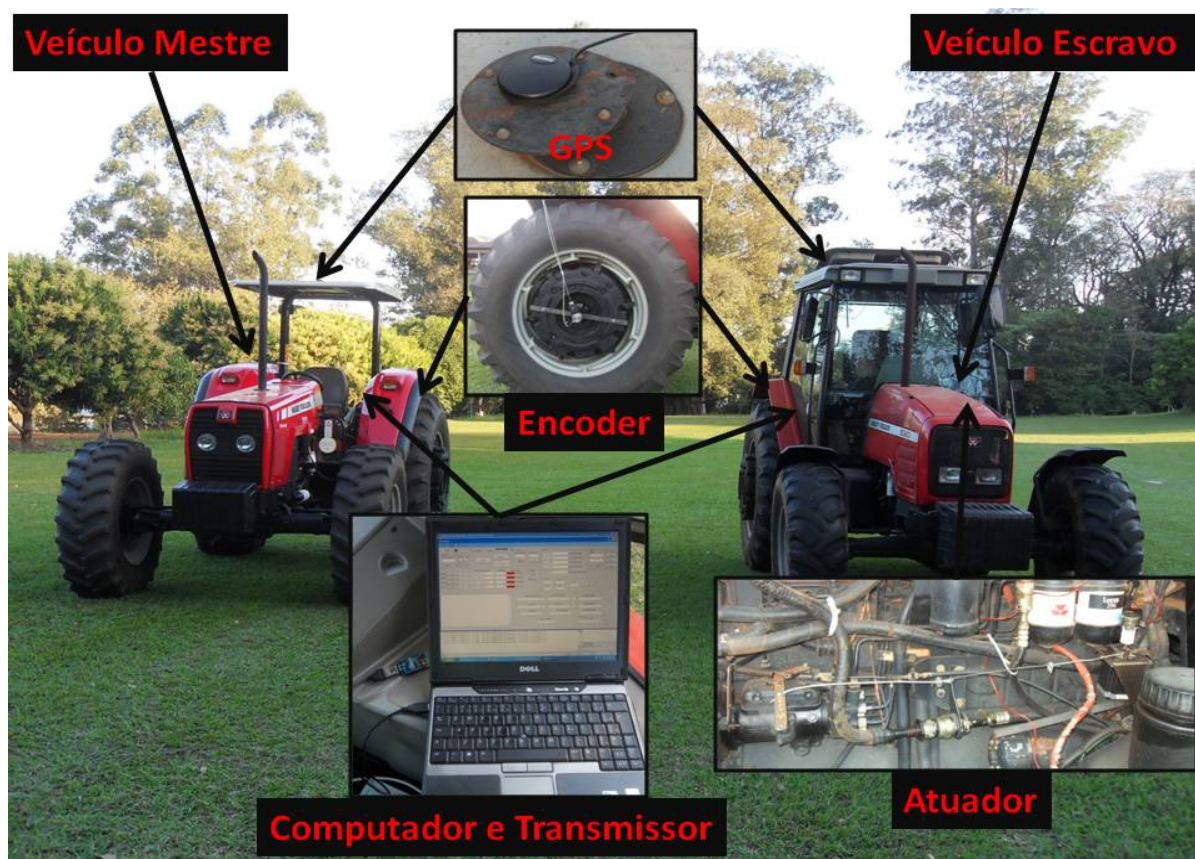


Figura 13 - Sistema de controle de direção

3.2.2 Periféricos

3.2.2.1 GPS

Dois receptores de GPS de baixo custo, da marca Garmin® série 18PC, foram utilizado para comparar as velocidades dos tratores. Um GPS foi instalado na parte superior da cabine do trator mestre e o outro no trator escravo.

Especificações Técnicas:

- Entrada série assíncrona com níveis de voltagem TTL ou RS-232, polaridade RS-232
- Taxa de transferência: 300 /600 /1200 /2400 /4800 /9600 /19200 /38400
- Seleccionável entre NMEA 0183 v2.00 , NMEA 0183 v3.00
- Alimentação 5V $\pm$ 10%
- Corrente de entrada de 57mA @ 5V
- Sensibilidade: -165 dBW mínima
- Saída PPS(18 LVC): 1 Hz impulso

Para avaliar se dois GPS de mesma marca e modelos possuem medidas de velocidades iguais no decorrer de um percurso, instalaram-se dois receptores em um trator e separou-se a uma distância de 1,0 m conforme ilustrado na Figura 14.



Figura 14 - Teste dinâmico com dois receptores de GPS.

Os testes foram realizados em um percurso de 600 m e com quatro diferentes velocidades fixas ($1,31 \text{ m.s}^{-1}$, $1,61 \text{ m.s}^{-1}$, $1,97 \text{ m.s}^{-1}$). Os dados de velocidade e hora eram

captados e armazenados em um notebook com o auxílio do programa *Hyperterminal* que é um aplicativo de comunicações do sistema operacional Windows.

Os resultados coletados foram analisados por meio da análise de variância (ANOVA) a qual divide a variabilidade entre Grupos e dentro de Grupos, e compara as duas. Quanto maior for a primeira comparada à segunda, maior é a evidência de que existe variabilidade entre grupos,. Com este teste pode-se verificar se os GPS podem ser utilizados para comparar velocidades.

3.2.2.2 Encoders

Dois encoders da marca HOHNER da série 58 foram instalados nas rodas dos tratores para comparar o deslocamento entre as máquinas (Figura 15). Os encoders proporcionam uma acurácia maior do que o GPS, com isso pode-se determinar melhor os erros decorrentes da falta de sincronismo entre os tratores.



Figura 15 – Encoder instalado na roda do trator para medir o deslocamento

As principais características destes encoders são:

- Alimentação de 5 a 28 Vdc
- Rotação máxima de 6000 rpm
- 240 pulsos por giro

Os pulsos contados pelo encoders eram armazenados a uma frequência de 1 Hz, que era a mesma frequência de leitura dos GPS utilizados. Para verificar a distância que corresponde a um pulso do encoder deslocou-se o trator de modo que a roda girasse dez voltas. Após isso mediu-se a distância percorrida pela trator (Figura 16). Dessa forma calculou-se que cada volta completa do encoder correspondia a 4,875 m, como uma volta completa do encoder são 240 pulsos cada pulso corresponde a 0,02 m. Este método foi aplicado para os dois encoders.

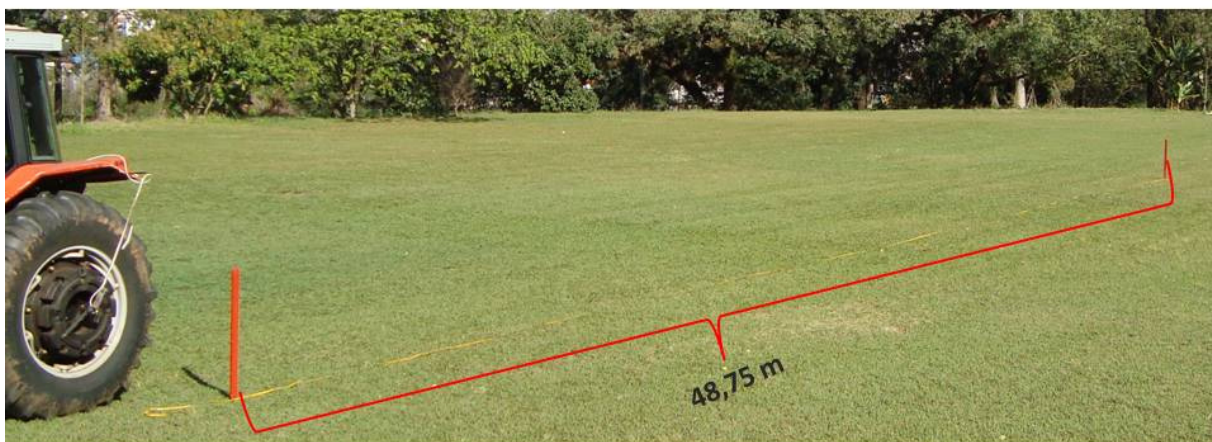


Figura 16 - Calibragem do encoder

3.2.2.3 Transmissor e receptor

A transferência de dados entre o trator mestre e escravo foi realizado através de transmissor e receptor de radiofrequência. Dentre as Redes WPAN (*Wireless Personal Area Network*) existentes, a mais recente e promissora é a que usa o padrão ZigBee IEEE 802.15.4. A ZigBee Alliance é quem desenvolve o padrão ZigBee junto ao IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), através da associação de várias empresas, que trabalham em conjunto para proporcionar e desenvolver tecnologias para criar um padrão de baixo consumo de energia, baixo custo, segurança, confiabilidade, e com funcionamento em rede sem fios baseado em norma aberta global.

O ZigBee permite comunicações robustas e opera na frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), sendo na Europa de 868 MHz (1 canal), 915 MHz (10 canais) nos Estados Unidos e 2,4 GHz (16 canais) em outras partes do mundo, e não requerem licença para funcionamento. As Redes ZigBee oferecem uma excelente imunidade contra interferências, e a capacidade de hospedar milhares de dispositivos numa Rede, com taxas de transferências de

dados variando entre 20kbps a 250kbps. O Protocolo ZigBee é destinado a aplicações industriais, portanto, o fator velocidade não é crítico numa implementação ZigBee.

Os módulos RF padrão ZigBee foram criados para economizar ao máximo energia. Com isso, é possível criar dispositivos sensores remotos alimentados com pilhas ou baterias comuns, que durarão meses ou mesmo anos sem precisarem ser substituídas. Isso porque, os módulos ZigBee quando não estão transmitindo/recebendo dados, entram num estado de dormência ou em "Sleep", consumindo o mínimo de energia.

Há várias empresas membros na ZigBee Alliance, e cada uma disponibiliza no mercado o seu produto baseado na pilha de protocolo ZigBee. Para o presente projeto foi escolhido o XBee fabricado pela MaxStream. Nos módulos XBee há três opções de antenas: tipo *Chicote* (antena de ~2,5 cm de comprimento) - *Conector* (para antena externa), e tipo *Chip* a mais compacta, Figura 17 .

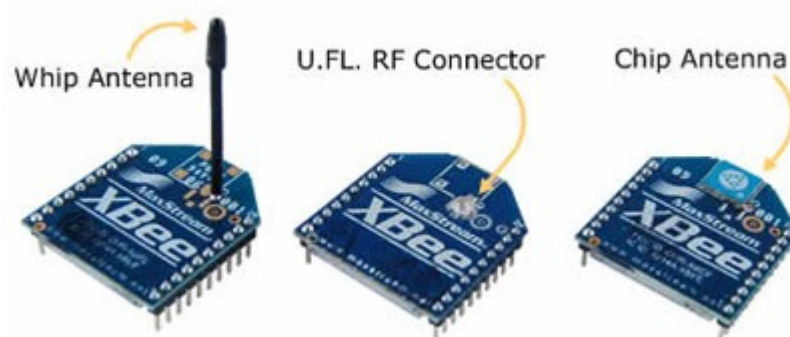


Figura 17 - Tipos de antenas dos módulos XBee

Segue abaixo algumas características do módulo XBee:

Especificações técnicas:

- Rendimento da Potência de saída: 1 mW (0 dBm);
- Alcance em ambientes internos/zonas urbanas: 30m;
- Alcance de RF em linha visível para ambientes externos: 100m;
- Sensibilidade do receptor: -92 dBm;
- Frequência de operação: ISM 2.4 GHz;
- Taxa de dados de RF: 250.000 bps;
- Taxa de dados da Interface (Data Rate): 115.200 bps;
- Tensão de alimentação: 2.8 à 3.4v;

- Corrente de transmissão (típico): 45 mA @ 3.3 V;
- Corrente de Recepção (típico): 50 mA @ 3.3 V;
- Corrente de Power-down Sleep: <10 μ A;
- Dimensões: (2.438cm x 2.761cm);
- Peso: 0.10 oz (3g);
- Temperatura de operação: -40 to 85° C (industrial);
- Opções de antena: Conector U.FL RF, Chip ou Chicote (whip);

3.2.2.4 Atuador de velocidade

Um motor de passo marca Tekkno, modelo TAK57H8604 funcionou como o atuador de velocidade do trator. Para executar esta função corretamente, o motor é ligado em paralelo ao cabo do acelerador do trator, Figura 18. Quando o sistema está ligado o motor de passo é energizado e passa a executar a função do acelerador, obedecendo ao controle automático de velocidade. Se o sistema automático estiver desligado não haverá energia no motor de passo e a aceleração do trator se dará somente pelo operador. Além disso, um potenciômetro foi instalado para funcionar como um sensor de retroalimentação ao sistema de controle verificando qual a posição atual do motor de passo.

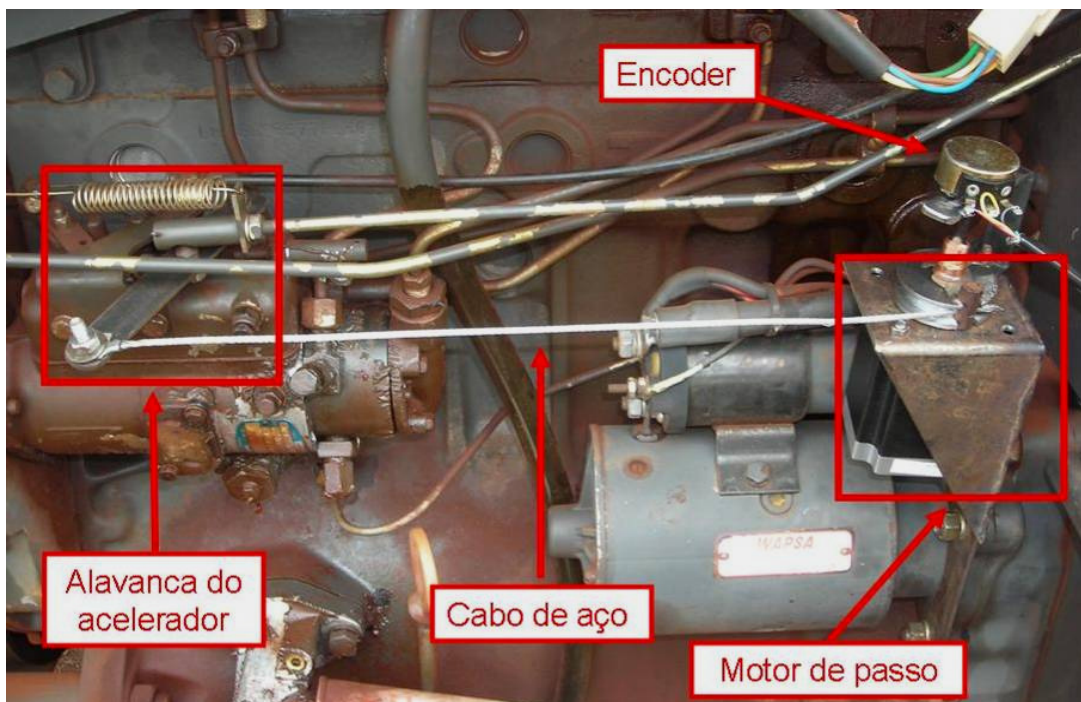


Figura 18 - Sistema de controle de aceleração instalado no motor do trator do transbordo.

O motor de passo é controlado por meio de um drive de acionamento que contém um microcontrolador PIC. Este microcontrolador é responsável por ler uma string de acionamento, que é enviada pelo programa instalado no notebook do trator escravo e acionar o motor de passo conforme requisitado. Além disso, o microcontrolador lê o encoder da roda do trator e o potenciômetro do motor de passo e essas informações são enviadas ao programa escravo.

Para determinar a equação de calibração da velocidade do trator em relação a posição do motor de passo incrementou-se a velocidade pulso por pulso começando de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ até chegar a $1,7 \text{ m.h}^{-1}$. A velocidade do trator e o pulso atual do motor de passo foram armazenados no computador e analisadas posteriormente.

3.2.2.5 Determinação da função de transferência da velocidade do trator

Para determinar a função de transferência da velocidade do trator variou-se sua velocidade de deslocamento utilizando uma função degrau de velocidade. Esta função degrau foi aplicada no programa escravo que envia um sinal de acionamento para o motor de passo, esse por sua vez, atuava na alavanca do trator. Dessa forma a função de transferência obtida é a relação da posição do motor de passo para a velocidade do trator. A função degrau de velocidade foi aplicado ao trator com três repetições.

3.2.3 Programa

Para o controle de velocidade foram desenvolvidos dois programas em *Visual Basic* utilizando a *Microsoft Visual Studio 2008*, um para o trator mestre e outro para o escravo.

3.2.3.1 Programa mestre

A Figura 19 apresenta a tela do programa gerenciador instalado no notebook do trator mestre.

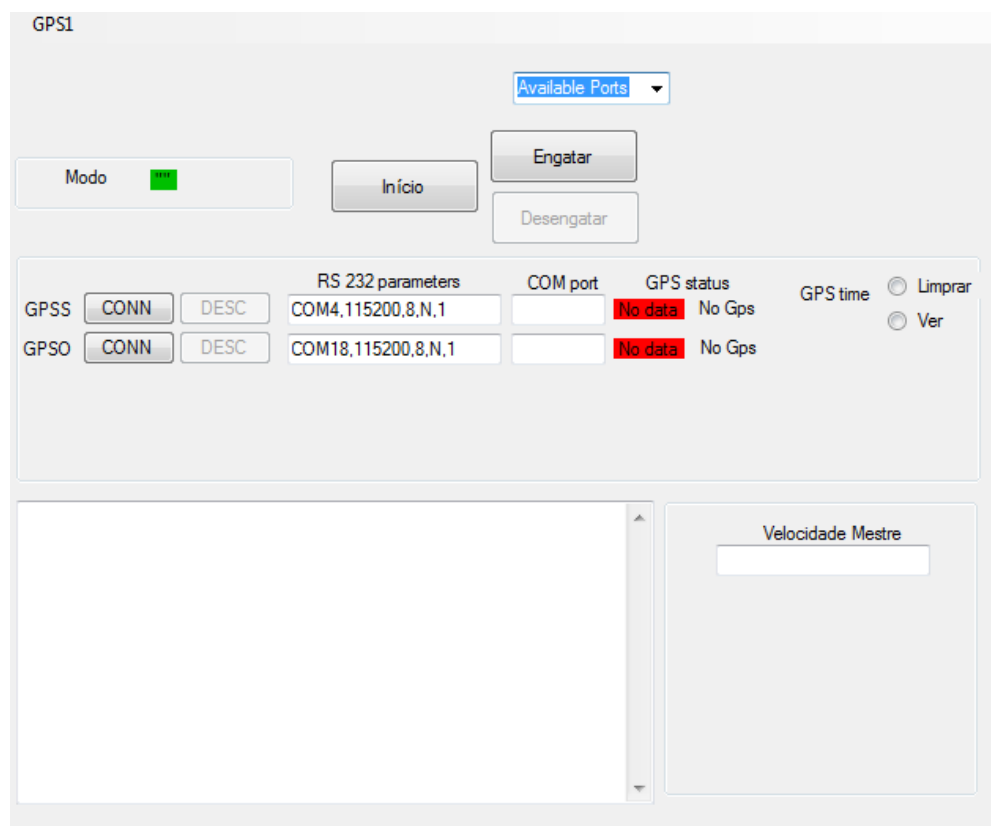


Figura 19 – Tela do programa instalado no trator mestre

Quando o botão “Engatar” é acionado o programa mestre começa a receber a string NMEA do receptor de GPS filtrando as informações de modo a captar somente a velocidade do trator, quando o botão “Início” é acionado o programa começa armazenar a informação de pulso por volta do encoder e enviar uma nova string para o trator escravo contendo a velocidade do trator mestre.

3.2.3.2 Programa escravo

A Figura 20 apresenta a tela do programa instalado no notebook do trator escravo.

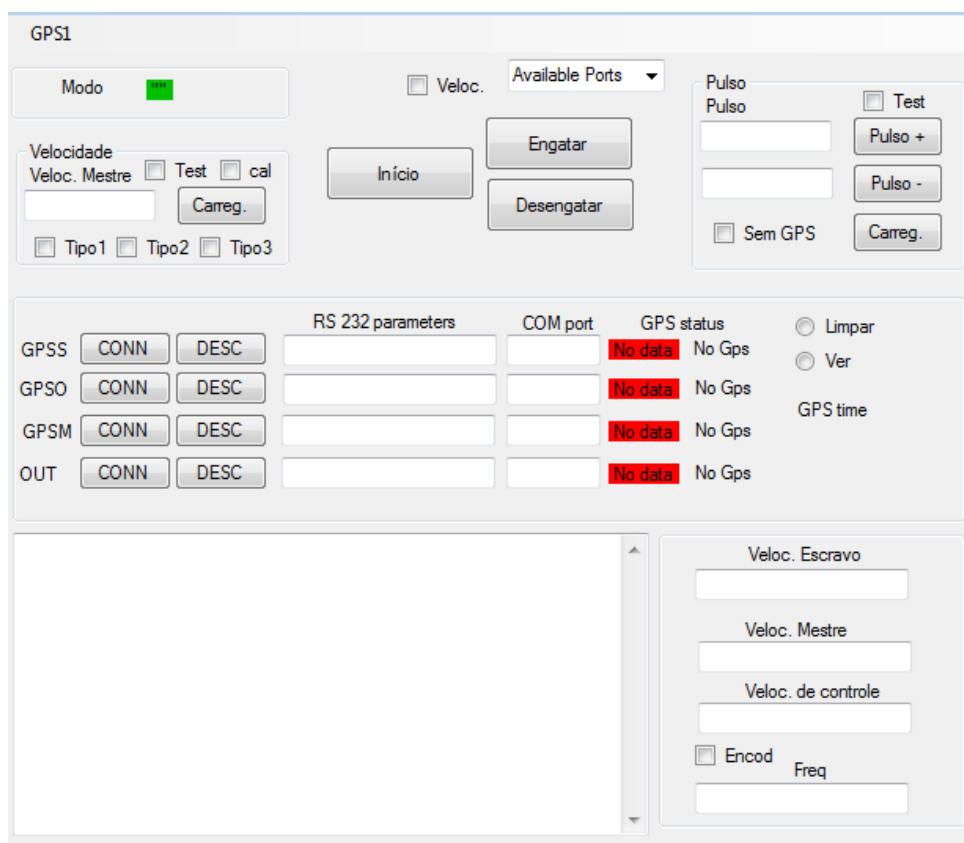


Figura 20 – Tela do programa instalado no trator escravo

Quando o botão “Engatar” é acionado o programa escravo começa a receber a string NMEA do receptor de GPS filtrando as informações de modo a captar somente a velocidade do trator. Quando o botão “Início” é acionado o sistema fica pronto para ser controlado, aguardando o recebimento da velocidade do trator mestre. Ao receber a velocidade mestre o programa energiza motor de passo, lê a posição do motor pelo potenciômetro e a partir deste momento a velocidade do trator passa a ser controlada pelo sistema desenvolvido utilizando a equação fuzzy modelada e testada no MATLAB.

A equação fuzzy gera um sinal de saída que varia de totalmente desacelerado a totalmente acelerado. Com esse sinal de saída, mais a posição atual do motor de passo e a equação de calibração da velocidade do trator com o motor de passo tem-se a posição de deslocamento do atuador para atingir a velocidade desejada no trator escravo.

3.2.4 Avaliação do sistema

Após determinar a curva de velocidade em relação ao motor de passo pode-se avaliar o sistema. Primeiramente realizaram-se testes somente com o trator escravo utilizando a opção teste do programa. A velocidade do trator mestre era simulada aplicando-se uma função degrau de $0,14 \text{ m.s}^{-1}$ ($0,5 \text{ km.h}^{-1}$) na faixa de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ ($4,0 \text{ km.h}^{-1}$) até $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ ($5,5 \text{ km.h}^{-1}$), ou aplicando-se um degrau de $0,42 \text{ m.s}^{-1}$ ($1,5 \text{ km.h}^{-1}$). As mesmas variações foram realizadas decrescendo as velocidades. Cada teste era repetido cinco vezes. Com esse teste pôde-se verificar a resposta do sistema a uma excitação em degrau.

No segundo teste realizado utilizaram-se os dois tratores, o mestre e o escravo. Os tratores foram emparelhados e quando o botão Iniciar do trator mestre era acionado iniciavam-se os testes. A velocidade era incrementada de $\pm 0,14 \text{ m.s}^{-1}$ ($\pm 0,5 \text{ km.h}^{-1}$) ou de $\pm 0,42 \text{ m.s}^{-1}$ ($\pm 1,5 \text{ km.h}^{-1}$) na faixa de operação de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ ($4,0 \text{ km.h}^{-1}$) até $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ ($5,5 \text{ km.h}^{-1}$). Cada teste era repetido cinco vezes. Com esse teste pôde-se verificar a resposta do sistema em uma situação real de trabalho.

Os testes com o sistema de controle de velocidade foram realizados na ESALQ, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" localizada na cidade de Piracicaba, SP.

3.3. Controle de direção de um trator

3.3.1 Descrição e funcionamento do sistema

O sistema de piloto automático comercial utilizado neste trabalho funciona criando um ponto A pelo operador, depois o mesmo se desloca para um ponto final e cria o ponto B. Assim o sistema gera a linha AB que será a linha referência para do controlador do piloto automático. Este sistema é capaz de trabalhar paralelamente a esta linha com um espaçamento determinado pelo operador, Figura 21.

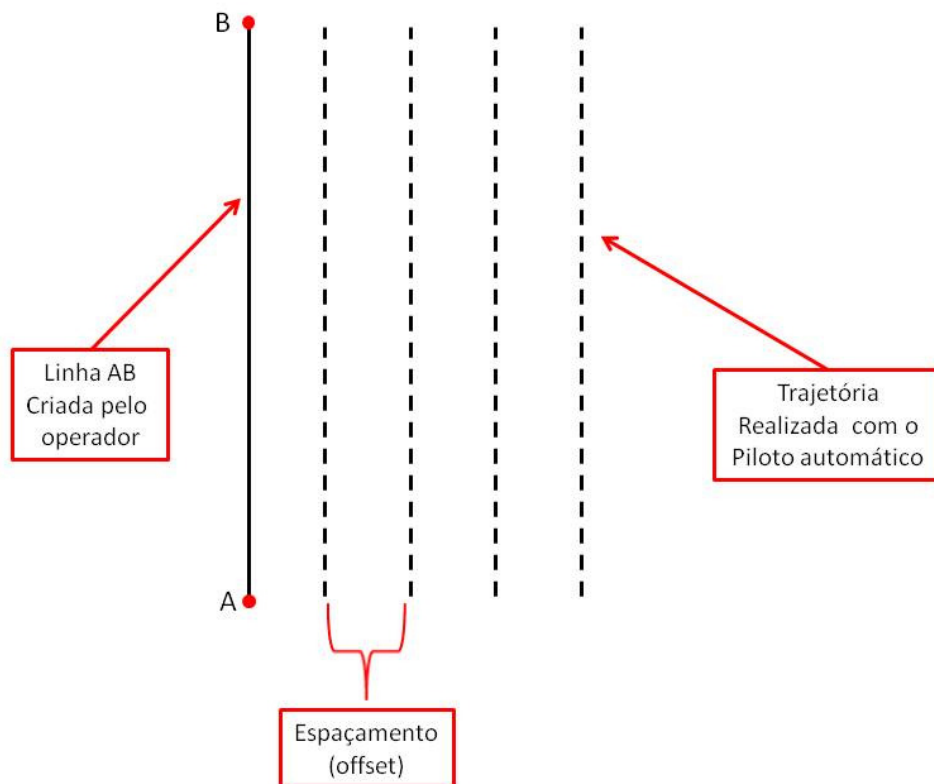


Figura 21 - Linha AB criada pelo operador do piloto automático

No sistema de controle proposto neste trabalho o piloto automático passa a receber as informações de posição do veículo mestre, modificando as coordenadas enviadas pelo GPS RTK. Para isso o sistema de controle capta os valores de posicionamento enviados pelo RTK, cria uma nova posição baseado na diferença entre o valor de paralelismo desejado e o medido pelo sensor instalado na lateral do veículo escravo, e envia essa nova coordenada ao piloto automático do veículo escravo. Desta forma, o posicionamento do veículo escravo dependerá da posição do outro veículo mestre, copiando assim seus movimentos. O algoritmo desenvolvido utiliza cálculos em coordenadas polares para fazer o deslocamento do ponto.

3.3.2 Avaliação do sensor

Para controlar um veículo baseado no movimento de outro é preciso sensoriamento capaz de identificar o posicionamento relativo entre as máquinas. Por este motivo, realizaram-se testes com três diferentes sensores buscando o que melhor se adapta a esta situação. Testou-se dois tipos de sensores ultrassônicos e um sensor laser.

Os sensores laser utilizam uma luz para detectar a distancia de um objeto. O princípio básico de funcionamento deste sensor está em emitir uma luz e monitorar o tempo de seu retorno. Para diferenciar a luz refletida da luz ambiente, a luz emitida pelo sensor é modulada, enviando pulsos de luz em uma determinada frequência. Assim, a luz recebida passa por um filtro, de maneira que o sensor só será atuado se a luz recebida estiver na mesma faixa de frequência da luz emitida. Já os sensores ultrassônicos emitem pulsos cíclicos de som em alta frequência que, quando refletidos por um objeto, retornam ao receptor que calcula o tempo da viagem do som.

Os testes foram realizados na universidade de Kentucky, EUA em 2009 utilizando dois veículos, uma Van utilizada com anteparo do sensor e um quadriciclo instrumentado com o sensor a ser testado. Além disso, cada veículo era equipado com GPS RTK e computadores onde a variável posição (fornecida pelos RTK) e a distância (fornecida pelo sensor) eram armazenadas. A acurácia dos sensores foi calculada pela diferença da distância entre os dois veículos medida pelos RTK e pelo sensor. Cada veículo tinha um determinado caminho para seguir, onde o quadriciclo seguia uma linha reta e a van seguia uma trajetória com curvas (Figura 22). Os testes foram reproduzidos 10 vezes para cada sensor.

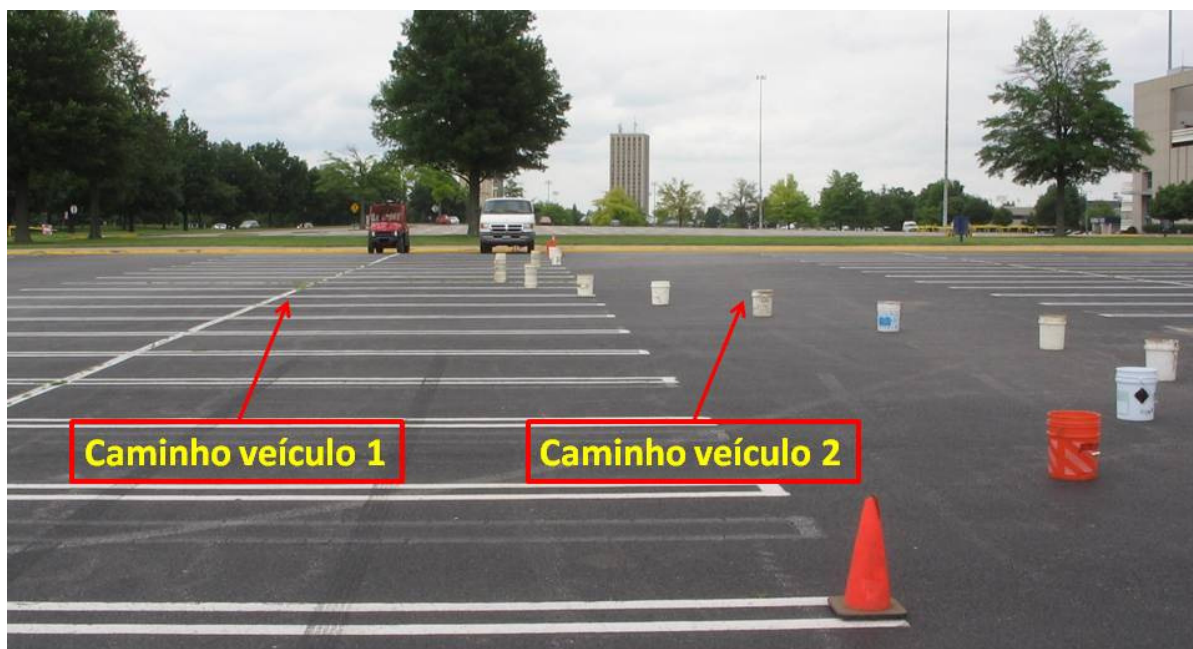


Figura 22 - Caminho dos veículos para os testes com os sensores.

3.3.2.1 *Lv-MaxSonar*

O primeiro sensor testado neste trabalho foi o Lv-MaxSonar (MaxBotix INC, Brainerd, USA) modelo WR1, (Figura 23).



Figura 23 - Sensor de ultrassom, Lv-MaxSonar (MaxBotix).

As principais características deste sensor são:

- Range: 0,3 a 6,5 m
- Saída de dados: serial (0 – Vcc)

- Resolução: 25 mm
- Alimentação: 3,0 a 5,5 V
- Preço médio: US\$ 110,00

A Figura 24 apresenta a instalação do sensor Lv-MaxSonar no quadriciclo. Onde os receptores de RTK são responsáveis pelas medidas do posicionamento de cada veículo. Todos os sensores foram instalados da mesma maneira.

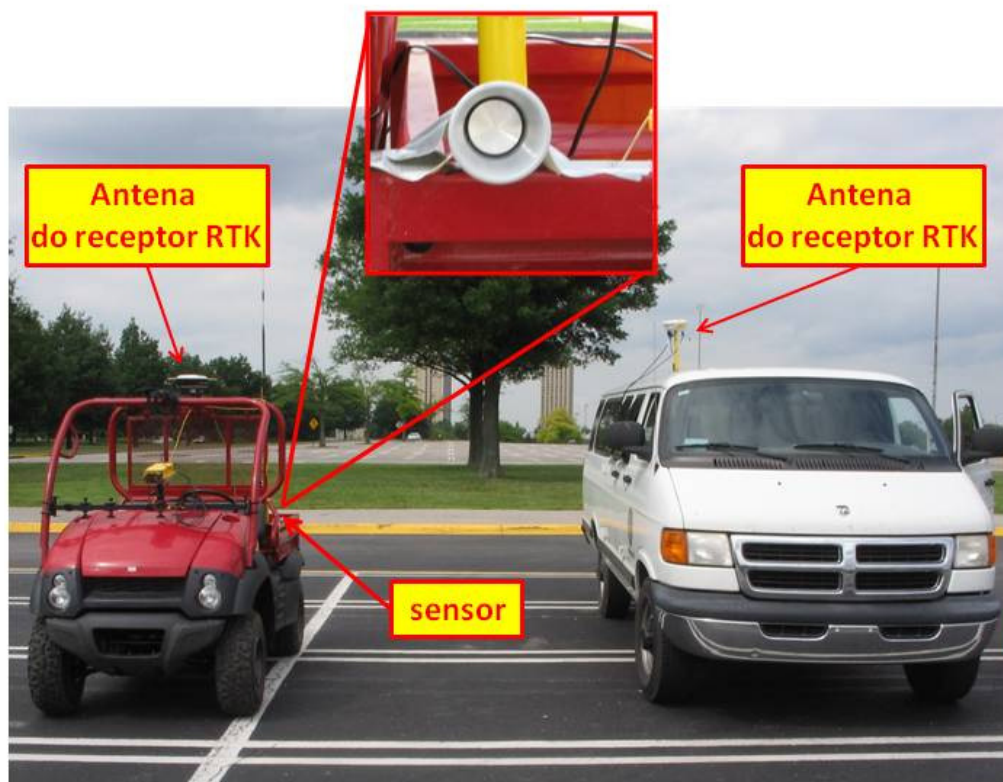


Figura 24 – Instalação do sensor Lv-Maxsonar (MaxBotix).

3.3.2.2 Sonar TSPC

O segundo sensor testado foi o Tspc (Senix, Bristol, USA) modelo 30S1-232, Figura 25.



Figura 25 - Sensor sonar TSPC (Senix, Bristol, USA)

As principais características deste sensor são:

- Range: 0,0102 a 4,5 m
- Saída de dados: RS-232
- Resolução: 102 mm
- Alimentação: 12 V
- Preço médio: US\$ 600,00

3.3.2.2 Laser O1D100

O último sensor testado foi o laser O1D100 (IFM, Exton, USA) modelo O1DLF, Figura 26.



Figura 26 - Sensor Laser (IFM)

As principais características deste sensor são:

- Range: 0,2 a 10,0 m
- Saída de dados: Analógica
- Resolução: 100 mm
- Alimentação: 12 - 30 V
- Preço médio: US\$ 350,00

3.3.3 Controle de direção usando sensor de distância

3.3.3.1 Instrumentação do sistema

Mestre

O veículo utilizado como mestre foi uma Van instrumentada com receptor de GPS RTK da marca Trimble (Trimble Navigation, Califórnia, USA) modelo 5800 e um notebook para armazenar as posições instantâneas do veículo (Figura 27).



Figura 27 - Van utilizada como mestre no controle de direção

Escravo

Como veículo escravo para os testes com o sistema de controle de direção substituiu-se o quadriciclo, utilizado nos testes com o sensor, por um trator John Deere modelo 7220 (Figura 28).



Figura 28 - Trator John Dere utilizado como veículo escravo

O trator foi instrumentado com receptor de GPS RTK da marca Trimble (Trimble Navigation, Califórnia, USA) modelo AgGPS 214 e um notebook responsável por armazenar o posicionamento do trator e executar o programa gerenciador desenvolvido neste trabalho. Além disso, foi instalado o piloto automático Trimble EZ-Steer (Trimble Navigation, Califórnia, USA) (Figura 29).

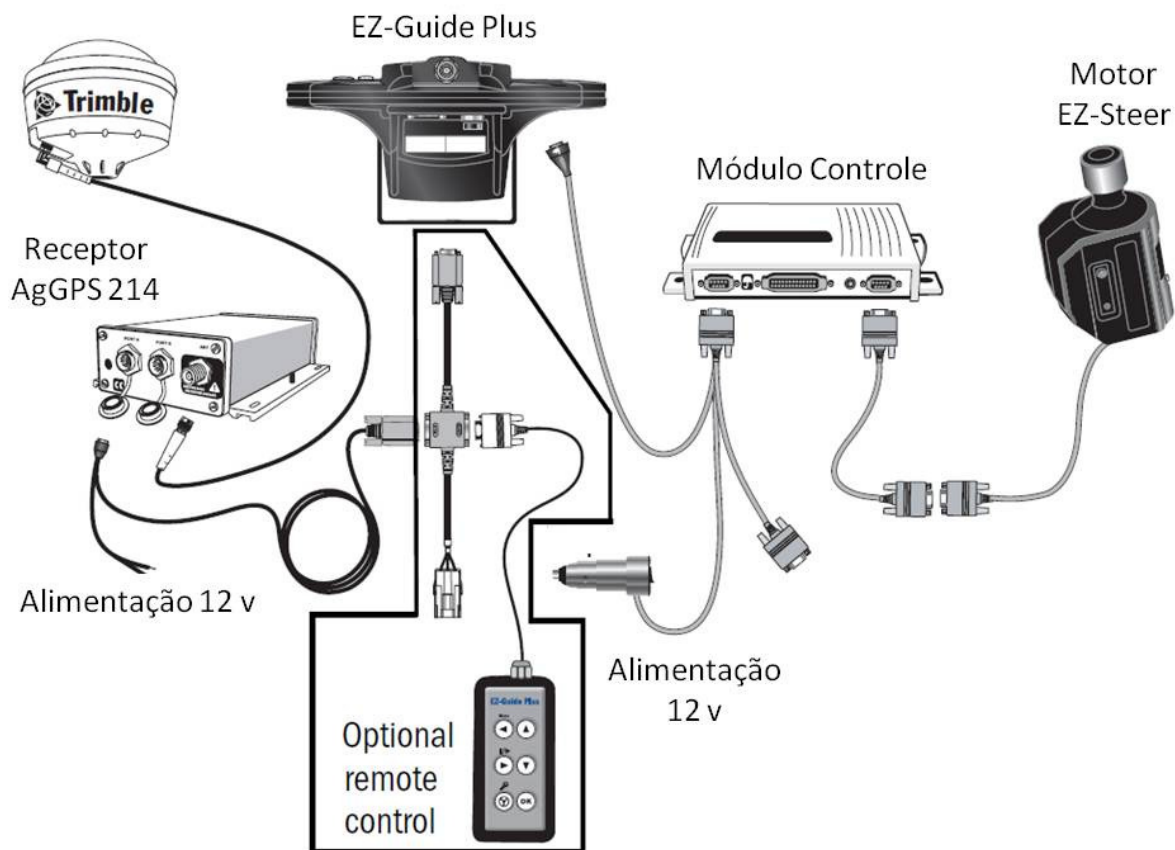


Figura 29 - Piloto automático Trimble EZ-Steer (Trimble Navigation, California, USA)

Utilizou-se o EZ-Guide Plus (Trimble Navigation, California, USA) como sistema de orientação que deve ser ligado ao piloto automático (Figura 30).



Figura 30 - Ez - Guide Plus (Trimble Navigation, California, USA)

Estação de base RTK

A estação de base RTK é responsável pela correção no posicionamento do GPS móvel. Como mostra a Figura 31 esta estação é formada por: uma antena de receptor RTK; um receptor RTK, que neste trabalho foi o da marca Trimble (Trimble Navigation, Califórnia, USA) modelo AgGPS 214; um rádio transmissor da Trimble (Trimble Navigation, Califórnia, USA) modelo Trimmark3; e uma antena de comunicação responsável pelo envio da correção aos GPS RTK móveis.

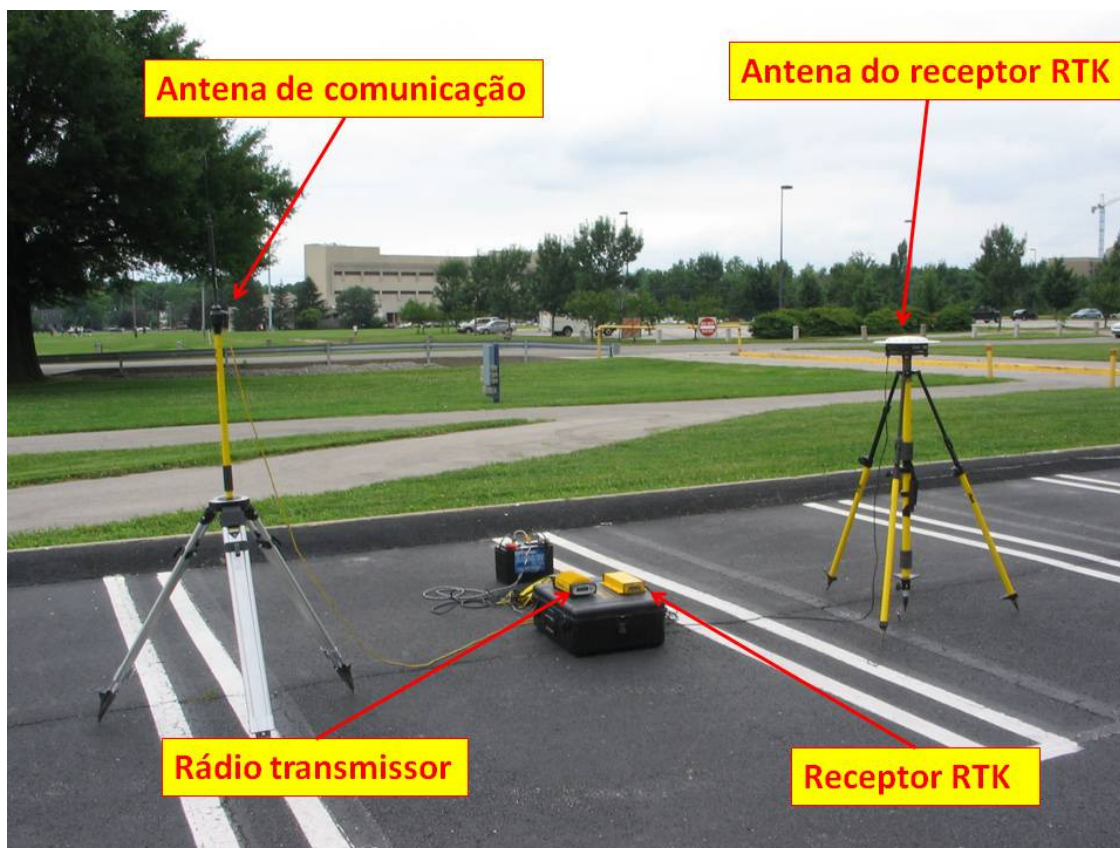


Figura 31 - Estação de base RTK

3.3.3.2 Programa gerenciador

Para que o piloto automático instalado no trator trabalhe de forma a copiar os movimentos da Van, desenvolveu-se um programa gerenciador em Visual Basic .NET que foi instalado em um notebook e montado junto ao piloto automático da Trimble. A Figura 32 apresenta a diferença na montagem do sistema de piloto automático comercial e o sistema desenvolvido neste trabalho.

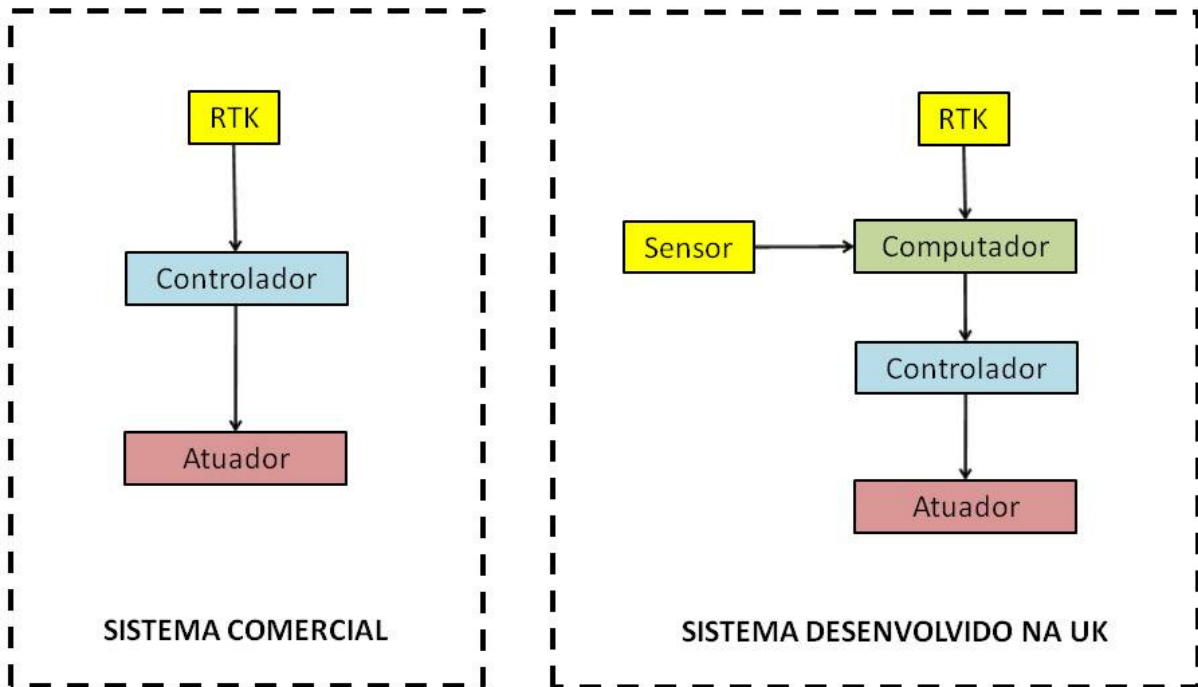


Figura 32 - Diferença de hardware do sistema comercial para o sistema

O programa desenvolvido capta a informação de posicionamento enviada pelo receptor RTK, recebe a leitura do sensor laser da distância do trator escravo em relação a máquina mestre e compara com a distância de paralelismo desejada entre as máquinas (offset). Com essas informações, uma nova posição era criada e enviada ao controlador do piloto automático. Desta forma é possível deslocar a máquina escrava conforme os movimentos de uma máquina mestre.

Cálculos do programa

O programa calcula a nova posição do trator da seguinte maneira:

1. Primeiro recebe o sinal NMEA do receptor RTK
2. Armazena o ponto A e o ponto B que é criado pelo operador do trator no momento em que começa a utilizar o piloto automático.
3. O programa calcula o ângulo da linha AB em relação ao norte, (Figura 33), utilizando a Equação 1

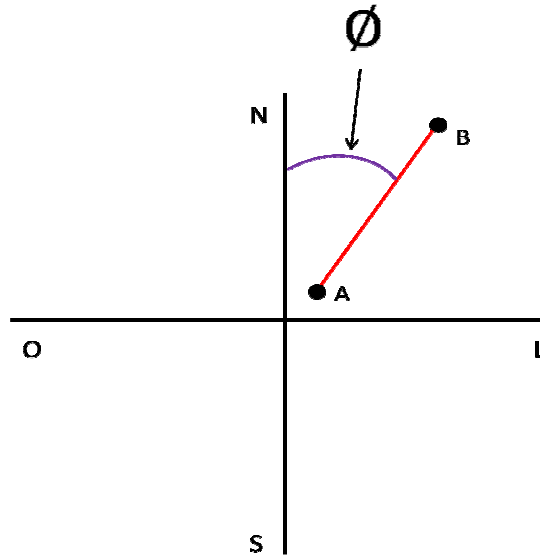


Figura 33 - Ângulo AB em relação ao norte

$$\varnothing = \text{Atan2}(\cos(\text{latA}) * \sin(\text{latB}) - \sin(\text{latA}) * \cos(\text{latB}) * \cos(\text{longB} - \text{longA}), \sin(\text{longB} - \text{longA}) * \cos(\text{latB})) \quad (1)$$

Onde:

- $\varnothing$ = Ângulo entre a reta AB e o norte
 - latA = Latitude do ponto A
 - latB = Latitude do ponto B
 - longA = Longitude do ponto A
 - longB = Longitude do ponto B
4. Ao iniciar o percurso o programa armazena a latitude e longitude inicial do deslocamento e calcula o ângulo da posição atual do veículo em relação ao norte, (Figura 34), utilizando a Equação 2.

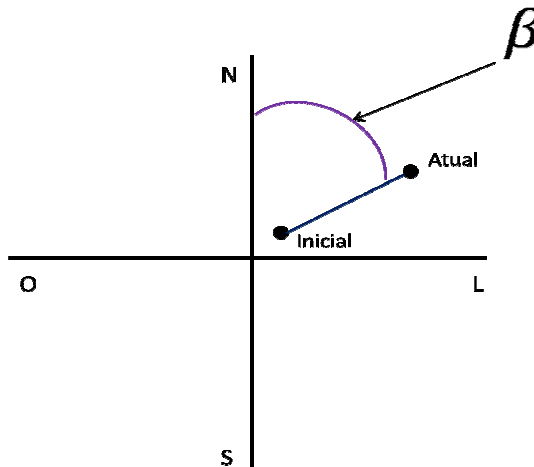


Figura 34 - Ângulo de deslocamento em relação a reta AB

$\beta =$

$$\text{Atan2}(\cos(\text{latinic}) * \sin(\text{latatual}) - \sin(\text{latinic}) * \cos(\text{latatual}) * \cos(\text{longatual} - \text{longinic}), \sin(\text{longatual} - \text{longinic}) * \cos(\text{latatual})) \quad (2)$$

Onde:

- β = Ângulo entre a reta atual e o norte
- latinic = Latitude do ponto inicial
- latatual = Latitude do ponto atual
- longinic = Longitude do ponto inicial
- longatual = Longitude do ponto atual

5. O programa calcula a distância do ponto atual ao ponto inicial (D), Figura 35 utilizando a Equação 3.

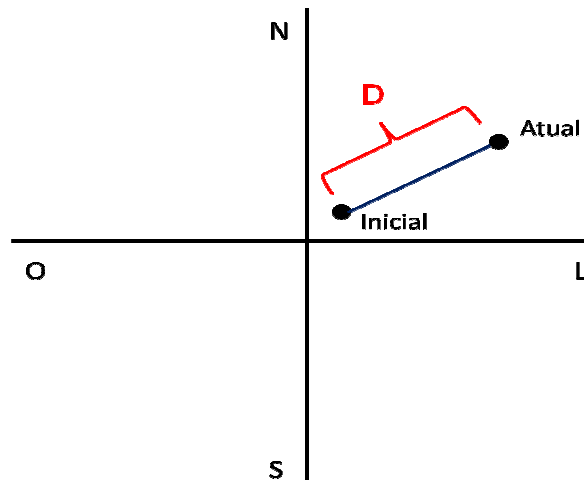


Figura 35 - Cálculo da distância do ponto atual ao ponto inicial

$$D = R * \cos^{-1}(\cos(longinicial - longatual) * \cos(latinicial) * \cos(latatual) + \sin(latinicial) * \sin(latatual)) \quad (3)$$

Onde:

- $R = 6371 \text{ km}$ que é o valor aproximado do raio da terra
- $latinicial$ = Latitude do ponto inicial
- $latatual$ = Latitude do ponto atual
- $longinicial$ = Longitude do ponto inicial
- $longatual$ = Longitude do ponto atual

6. O programa também calcula a distância do ponto atual a reta AB (D_{pr}), (Figura 36), utilizando a Equação 4. Esta distância é utilizada nos cálculos de deslocamento do ponto.

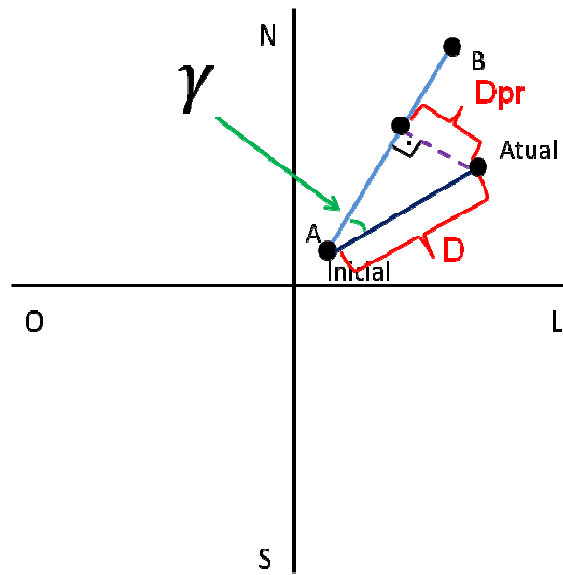


Figura 36 - Calculo do ponto atual a reta AB

$$D_{pr} = D * \sin (\gamma) \quad (4)$$

Onde:

- $\gamma = \beta - \phi$
- D_{pr} = distância do ponto atual a linha A-B

7. Por último o programa calcula a nova latitude e longitude, (Figura 37), utilizando as Equações 10 e 11.

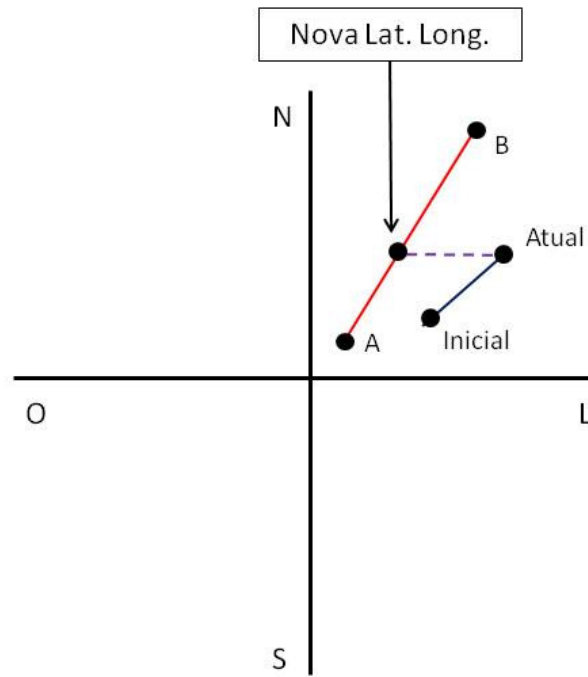


Figura 37 - Cálculo da nova Latitude e Longitude

$$Latnova = \text{asin} \left(\sin(latatual) * \cos\left(\frac{S}{R}\right) + \cos(latatual) * \sin\left(\frac{S}{R}\right) * \cos(\alpha) \right) \quad (10)$$

$$Longnova = longatual + \text{Atan2} \left(\cos\left(\frac{S}{R}\right) - \sin(latatual) * \sin(Latnova), \sin(\alpha) * \sin SR * \cos latatual \right) \quad (11)$$

Onde:

- $R = 6371 \text{ km}$ que é o valor aproximado do raio da terra
- S = Distância que o ponto deve ser deslocado
- $latatual$ = Latitude do ponto atual
- $longatual$ = Longitude do ponto atual
- α = O ângulo de direção que o ponto deve ser deslocado em relação ao norte
- $Latnova$ = Nova latitude deslocada
- $Longnova$ = Nova longitude deslocada

8. Após o cálculo da posição do trator o programa recria a “string” GPFGA (*Global Positioning System Fix Data*) e GPVTG (*Track Made Good and Ground Speed*), normalmente enviadas pelo RTK, e envia ao controlador do piloto automático.

Além dos cálculos, o programa utiliza regras de linguagem para definir quanto o ponto deve ser deslocado. Para isso o programa baseia-se na distância medida entre as máquinas, na distância do ponto a reta AB (Dpr) e nos valores de atuações passadas. Se a distância medida pelo sensor for igual ao offset, a nova posição será espelhada sobre a linha AB e desta forma o piloto automático manterá o trator na linha. Caso a medida do sensor seja diferente do offset a nova posição será deslocada da linha AB com valor igual à diferença entre o valor medido e o offset, fazendo com que o piloto automático traga o trator novamente à linha AB e dessa forma a diferença da leitura do sensor em relação à posição desejada é descontada.

Este ciclo se repete constantemente a uma frequência de 5 Hz, que é a frequência de funcionamento do GPS RTK.

A Figura 38 apresenta a tela final do programa que foi desenvolvido em Visual Basic.NET

The screenshot shows a Windows application window titled 'Form1' with a menu bar containing 'GPS1' and 'ABline'. The interface is divided into several sections:

- Top Left:** A 'Mode' indicator with a green square, a 'Start' button, and 'Engage'/'Disengage' buttons.
- Top Right:** An 'Available Ports' dropdown menu, a 'Sensor' checkbox, and input fields for 'Sensor Input (m)' and 'Off set (m)' with a 'Load' button.
- Middle Left:** A 'Heading' checkbox and two sets of 'CONN'/'DESC' buttons for 'GPSIn' and 'GPSout'.
- Middle Center:** 'RS 232 parameters' and 'COM port' dropdowns, and 'GPS status' and 'GPS time' labels with 'Clear' and 'view' buttons. The status shows 'No Gps' in red.
- Middle Right:** An 'AB line' section with 'Load A' and 'Load B' buttons, and input fields for 'A Lat (dec deg)', 'A Lon (dec deg)', 'B Lat (dec deg)', 'B Lon (dec deg)', and 'AB Bearing (dec deg)'.
- Bottom:** A large text area on the left and a 'GPS data' section on the right with input fields for 'Lat (GPS format)', 'Lon (GPS format)', 'Lat new', 'Lon new', 'Heading', 'New Heading', and 'dist ate ABlin'.

Figura 38 – Tela programa desenvolvido em Visual Basic.NET

A seguir estão descritas as principais funções do programa e as opções que o usuário pode escolher para a configuração e início do programa.

Primeiramente, o usuário deve clicar em “GPS1” que abrirá uma janela para que seja dado um nome ao arquivo onde será armazenada a distância instantânea medida pelo sensor, a latitude e longitude atual e a nova latitude e longitude.

Em seguida o usuário deverá conectar o GPS de entrada, que vem do RTK e o novo sinal de GPS de saída, que vai para o controlador. Para isso deve-se clicar no botão “CONN” do GPSin e do GPSout.

O próximo passo é criar os pontos A e B exigido pelo piloto automático da Trimble, para isso o usuário deve executar a tarefa conforme recomendado pelo fabricante, porém quando chegar ao ponto A deve-se clicar no botão “Load A” do programa desenvolvido e ao chegar ao ponto B deve-se clicar no “Load B”. Com isso as latitudes e longitudes do ponto A e do ponto B são armazenadas pelo programa e serão usadas nos cálculos dos novos pontos.

Quando o botão “Engage” for acionado a latitude e longitude enviada ao programa será reenviada ao controlador, sem haver modificações. Porém quando o botão “Start” é acionado o programa começa a enviar a nova latitude e longitude que são criadas baseando-se na distância de paralelismo desejado entre as máquinas que está no campo “Offset (m)”.

3.3.3.3 Avaliação do sistema

Para avaliar o sistema desenvolvido fixou-se o sensor laser no trator (veículo escravo) e utilizou-se a Van como veículo mestre, Figura 39.

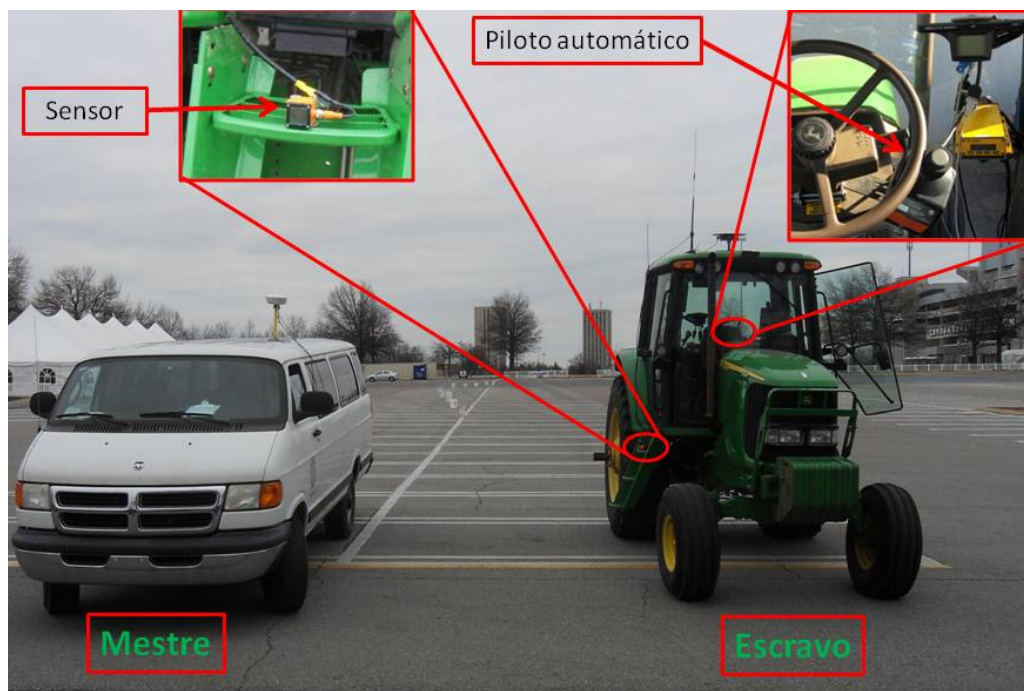


Figura 39 - Montagem do teste de avaliação

Para realizar os testes primeiramente alinhavam-se os dois veículos. Depois disso, o veículo mestre (Van) realizava um percurso em linha reta enquanto que o offset do programa instalado no veículo escravo (trator) era mudado uma vez no decorrer do percurso, fazendo com que o trator se afastasse da Van e fosse para a nova distância determinada pelo offset. Desta forma foi possível avaliar o tempo que o veículo escravo demorava a chegar ao novo offset e qual era o erro de posicionamento em regime. No primeiro teste variou-se o offset de 2,00 m para 2,40 m; no segundo de 2,00 m para 2,60 m; no terceiro variou-se de 2,00 m para 2,80 m e no último de 2,00 m para 3,00 m. Os testes foram realizados no estacionamento da Universidade de Kentucky, USA e eram repetidos cinco vezes a uma velocidade média de $1,25 \text{ m.s}^{-1}$.

Também realizou-se testes para verificar se o trator escravo acompanhava o mestre em um percurso curvilíneo. Para isso a Van realizava um percurso em curva onde o escravo o acompanhava. As posições dos veículos enviadas pelos RTK foram armazenadas e plotadas em um gráfico.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Modelagem e simulação do controle de velocidade e direção entre dois veículos

4.1.1 Modelagem

A Figura 40 apresenta a superfície gerada pelo *Toolbox* fuzzy do MATLAB. Esta superfície foi gerada a partir das funções de pertinências e das regras de inferências.

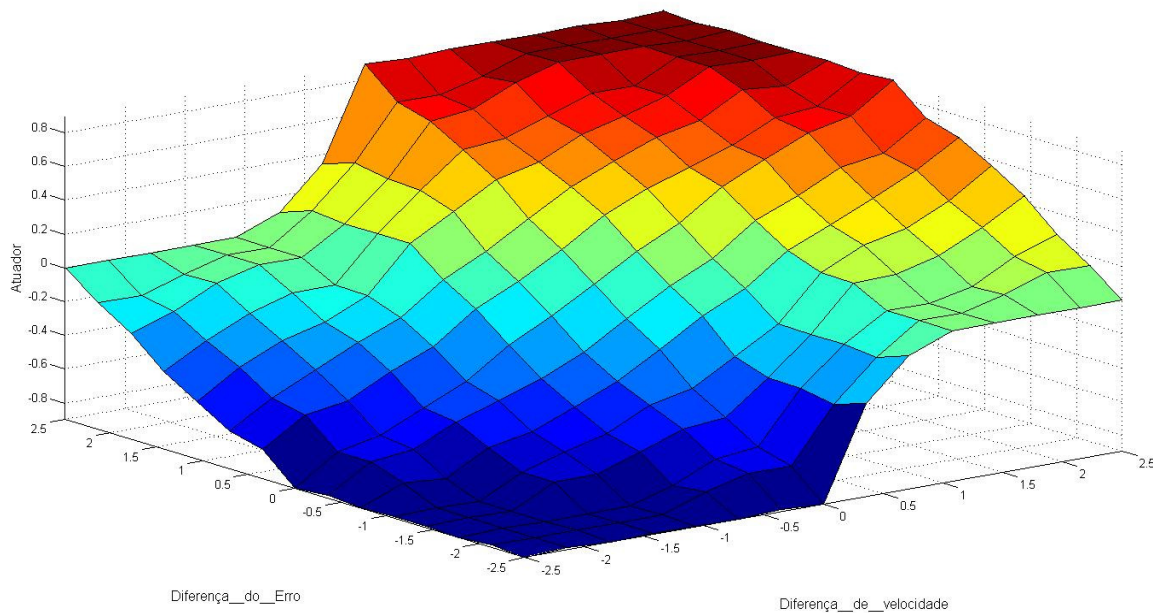


Figura 40 - Superfície gerada pelo Toobox fuzzy do MATLAB para o controle da velocidade

Após a obtenção da superfície fuzzy extraiu-se a função que corresponde a esta superfície, Equação 5. Esta equação foi utilizada na eletrônica embarcada do controlador real de velocidade.

$$z = a + b * x + c * y + d * x^2 + e * y^2 + f * x * y + g * x^3 + h * y^3 + i * x * y^2 + j * x^2 * y \quad (5)$$

Onde:

z = Saída (porcentagem de atuação)

x = Entrada (Diferença de velocidade)

y = Entrada (Erro da diferença de velocidade)

a = 0,0011432141

b = 0,42037041

c = 0,33250313

d = -0,00018886229

e = -0,00011913619

f = $8,902027 \cdot 10^{-6}$

g = -0,020729893

h = -0,014440968

i = -0,015795165

j = -0,018630659

Figura 41 apresenta a superfície gerada pelo *Toolbox fuzzy* do MATLAB. Esta superfície é gerada a partir das funções de pertinências e das regras de inferências.

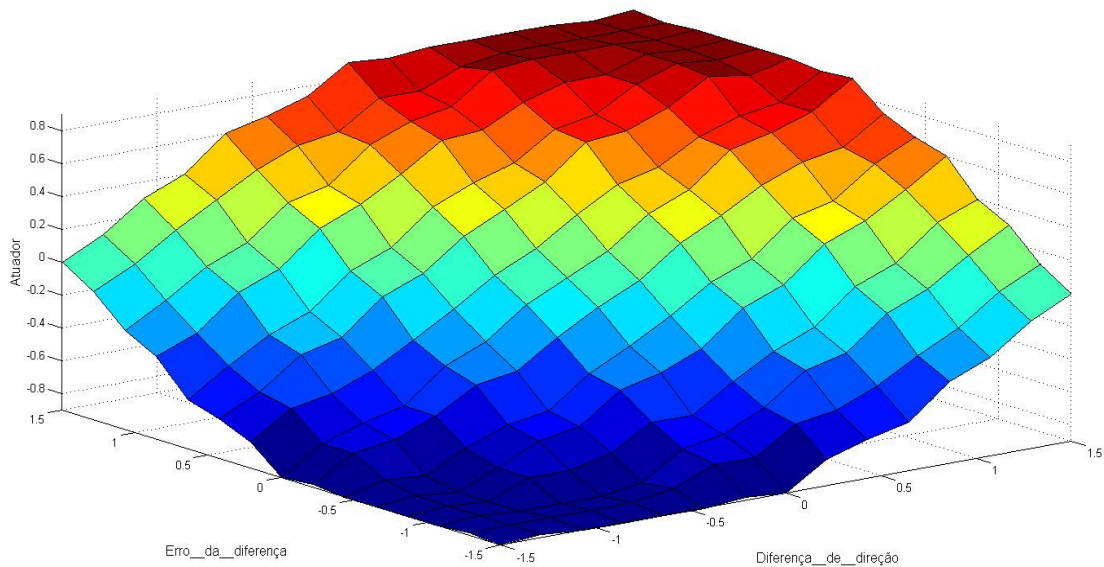


Figura 41 - Superfície gerada pelo Toolbox fuzzy do MATLAB para o controle de paralelismo

4.1.2 Simulação

Os resultados das simulações estão apresentados de dois modos diferentes onde na primeira os sensores de correção foram desligados e na segunda ligados, assim pode-se verificar a influência dos sensores no sistema.

A Figura 42 apresenta a resposta da velocidade do veículo escravo em relação à velocidade do mestre. A linha pontilhada representa variações na velocidade mestre e a linha cheia representa a resposta do veículo escravo.

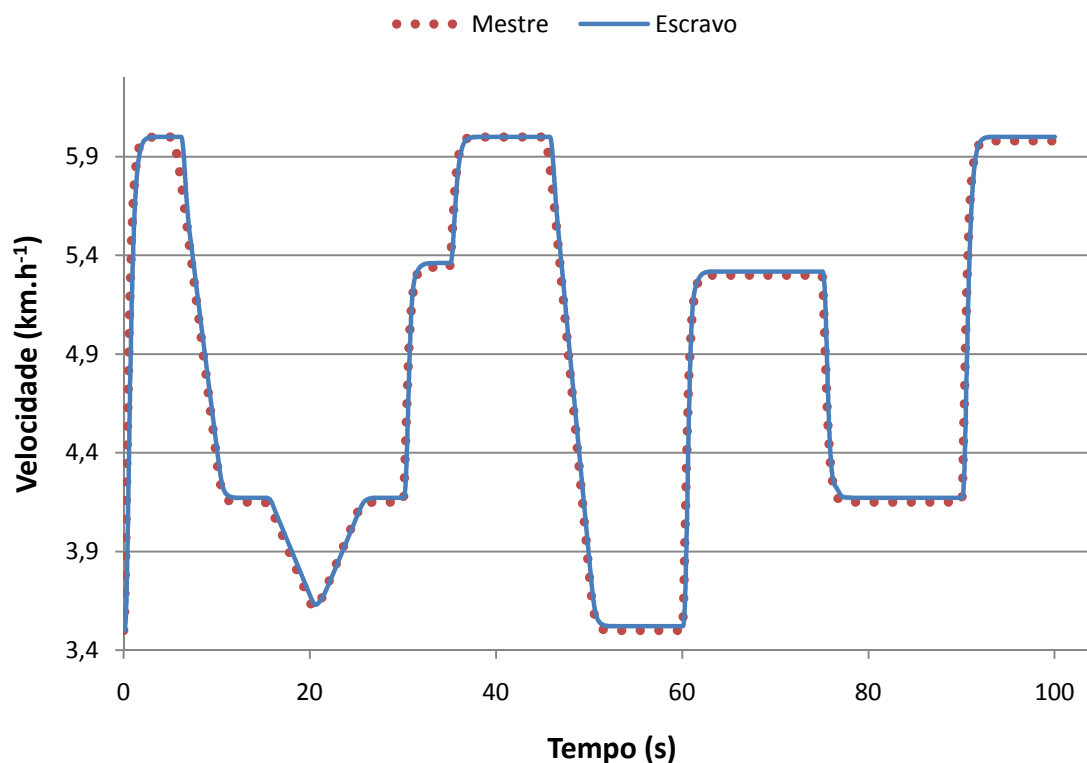


Figura 42 - Resposta de velocidade com os sensores de correção de posicionamento desligados

Nota-se pela Figura 42 que o veículo escravo acompanha a variação de velocidade do veículo mestre.

As respostas nos displays com os sensores desligados apresentaram uma diferença total de deslocamento das máquinas de 0,34 m (0,25%) e a maior diferença encontrada durante o percurso da simulação foi de 0,38 m (0,28%). O deslocamento total dos veículos foi de 133,97 m.

A Figura 43 apresenta a resposta de velocidade com os sensores ligados. A linha pontilhada representa variações na velocidade mestre e a linha cheia representa a resposta do veículo escravo.

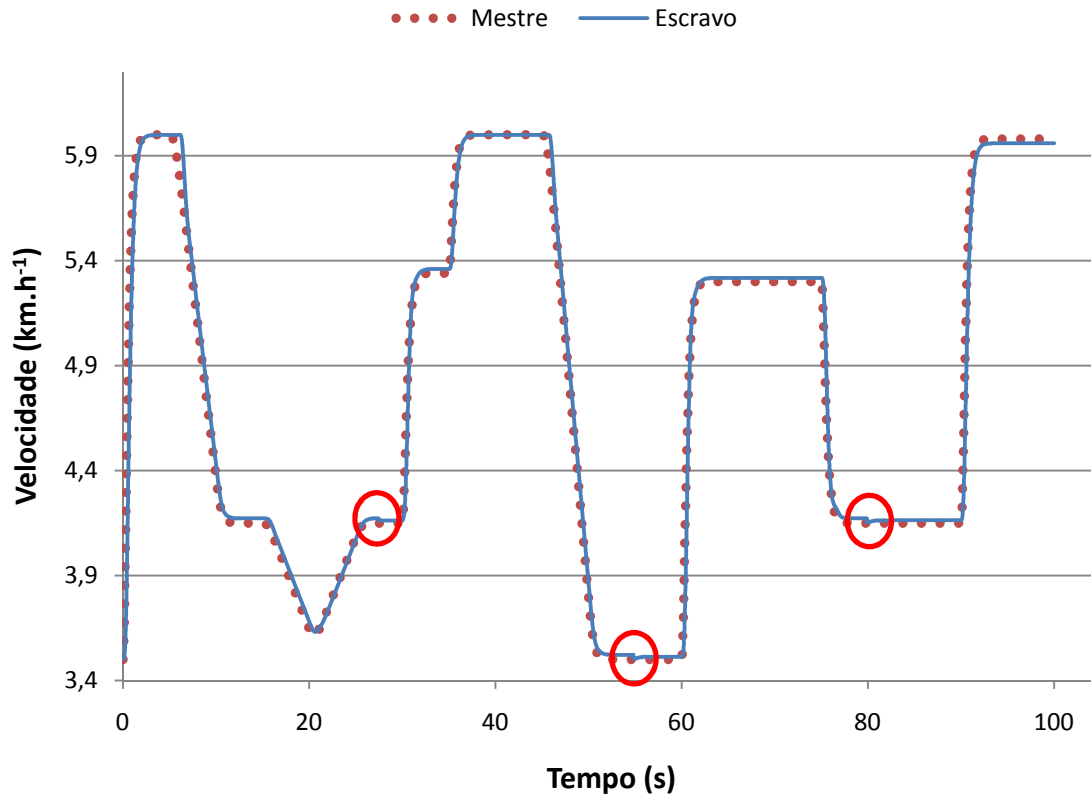


Figura 43 - Resposta de velocidade com os sensores de correção de posicionamento ligados

Comparando o gráfico da Figura 42 com a Figura 43 observa-se os cinco pontos, representado por círculos, onde os sensores estão atuando, influenciando na velocidade do veículo escravo. Dessa forma é possível corrigir erros de velocidade entre os veículos.

As respostas nos displays com os sensores ligados apresentaram uma diferença total no deslocamento das máquinas de 0,10 m (0,07%) e a maior diferença encontrada durante o percurso da simulação foi de 0,23 m (0,17%). O deslocamento total manteve-se em 133,88 m.

A Figura 44 apresenta a resposta da simulação do controle de direção do veículo escravo, onde a linha pontilhada representa o caminho percorrido pelo mestre e a linha cheia representa a resposta do escravo.

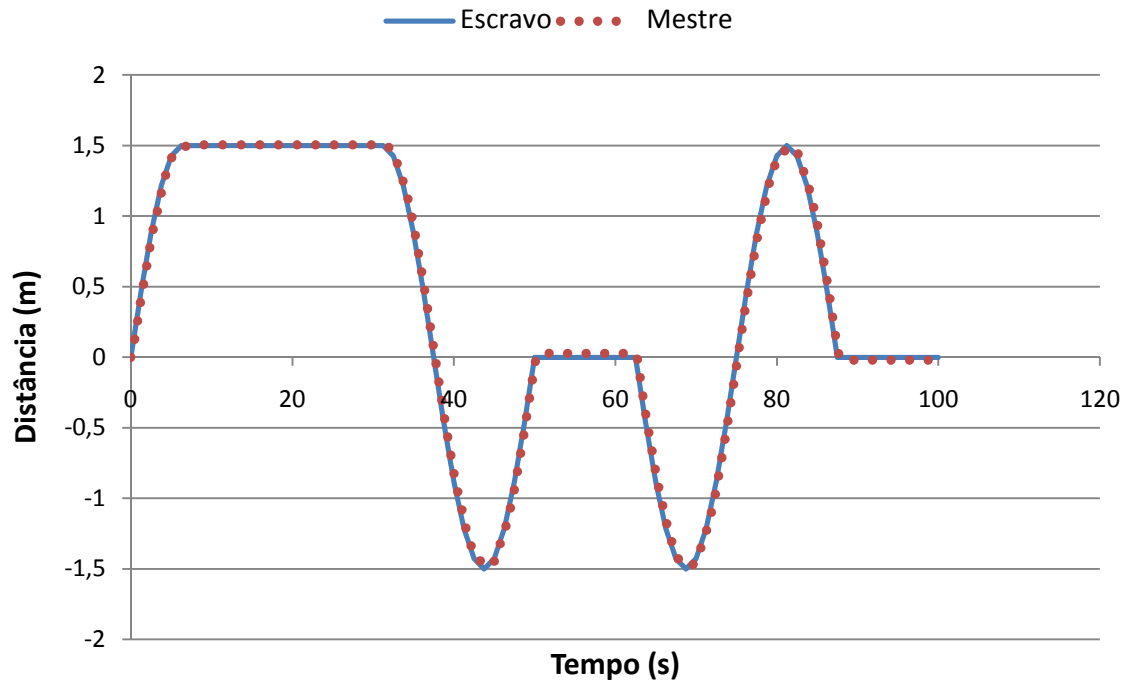


Figura 44 - Resposta do controle de direção da simulação

Na Figura 44 observa-se que o veículo escravo acompanhou o movimento do mestre, a máxima diferença de paralelismo entre as máquinas foi de 0,077 m ou 5,13% de erro com relação ao offset de 1,5 m.

Extraíu-se da simulação completa do sistema os parâmetros do controlador fuzzy PID que foram ajustados de forma empírica até obter as respostas apresentadas acima. Estas constantes são: $K_{dv} = 0,2$ (constante derivativa da velocidade), $K_{p dv} = 0,6$ (constante proporcional derivativa da velocidade), $K_{iv} = 2$ (constante integrativa da velocidade), $K_{pi v} = 2$ (constante proporcional integrativa da velocidade), $K_{dd} = 0,18$ (constante derivativa da direção), $K_{p dd} = 1,3$ (constante proporcional derivativa da direção), $K_{id} = 8$ (constante integrativo da direção), $K_{pi d} = 0,5$ (constante proporcional integrativo da direção). Estes parâmetros podem ser utilizados como ponto de partida para a implementação real do sistema de controle na eletrônica embarcada do trator.

4.2 Sistema de controle de velocidade de um veículo agrícola

4.2.1 Teste dinâmico de dois GPS

A Tabela 4 apresenta a análise ANOVA realizada com as velocidades medida pelos GPS nas três faixas do teste.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios com dois receptores de GPS.

	Fonte	1,31 m.s⁻¹	1,61 m.s⁻¹	1,97 m.s⁻¹
	GPS 1	1,28481	1,58586	1,94347
Média	GPS2	1,28533	1,58664	1,94625
	GPS 1	0,00147	0,00206	0,00283
Variância	GPS2	0,00250	0,00181	0,00283
Soma de	Entre grupos	0,00004	0,00005	0,00066
quadrados	Dentro do grupo	0,28356	0,20915	0,26819
	Entre grupos	1	1	1
Grau de liberdade	Dentro do grupo	512	392	340
Valor - P	Entre grupos	0,79470	0,74370	0,36110

Pela Tabela 4 observa-se que o menor Pvalor foi de 0,3611. Como todos os Pvalor são maiores que 0,05, pôde-se concluir que não existe uma diferença estatisticamente significativa entre as médias de cada teste ao nível de confiança de 95,0%. Com estes valores pode-se afirmar que a velocidade medida por dois receptores GPS de mesma marca e modelo instaladas em tratores diferentes, pode ser utilizada como um comparador de velocidades.

4.2.2 Avaliação do sistema

4.2.2.1 Curva de calibração da velocidade do trator em relação ao pulso

A Figura 45 apresenta o gráfico da velocidade do trator em relação à quantidade de pulsos enviado pelo programa ao drive de acionamento do motor de passo.

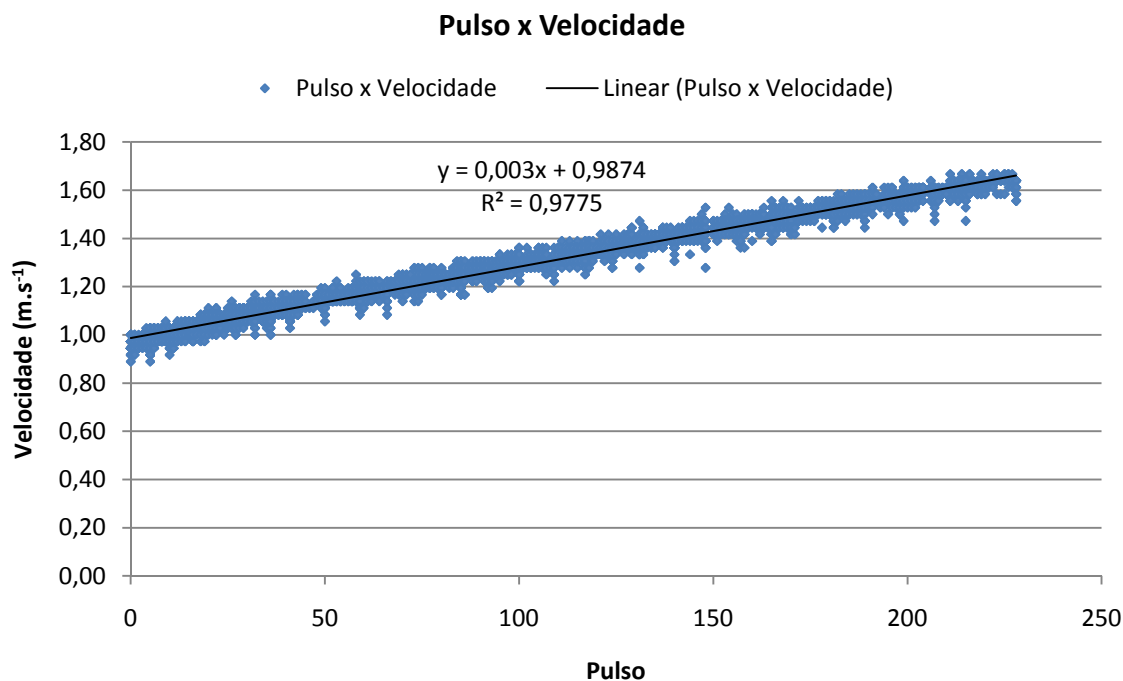


Figura 45 – Gráfico da resposta da velocidade do trator versos os pulso do motor de passo.

Pela Figura 45 pode-se verificar a linearidade da curva onde extraiu-se a equação de velocidade do trator com o $R^2 = 0,9775$. Esta equação foi utilizada no programa gerenciador do trator escravo.

4.2.2.2 Determinação da função de transferência da velocidade do trator

A Figura 46 apresenta a resposta da velocidade do trator a uma excitação em degrau onde as linhas tracejadas representam os testes e a linha cheia representa o gráfico médio.

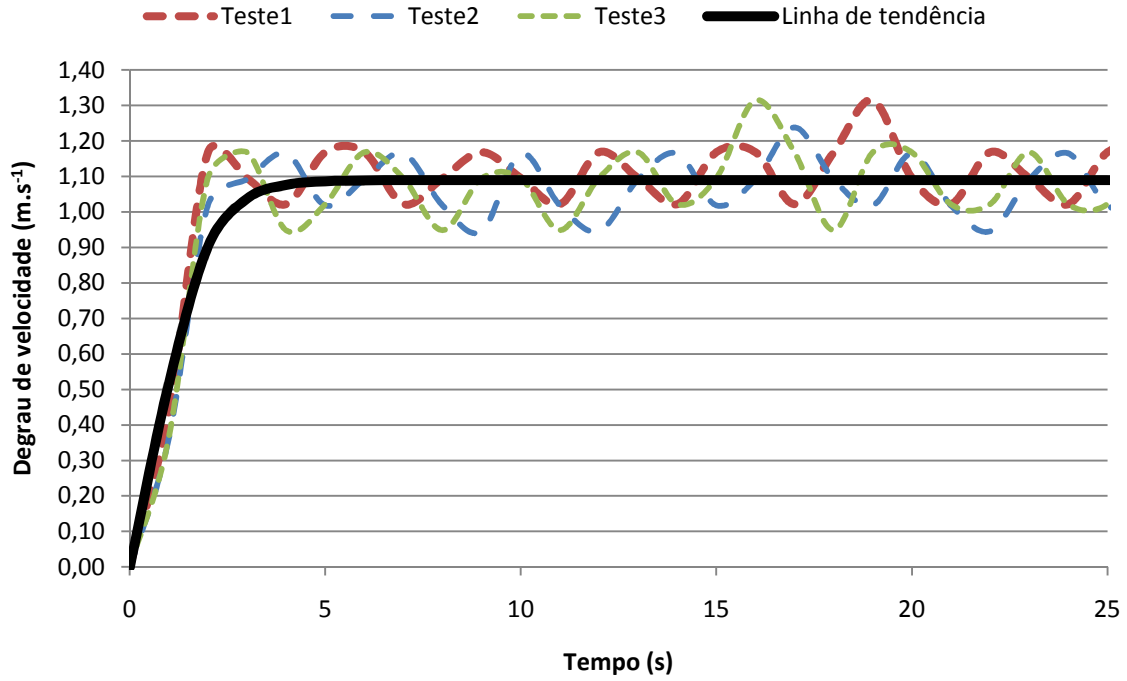


Figura 46 - Gráfico da planta da velocidade do trator.

A linha cheia representa a função de transferência de segunda ordem criticamente amortecida que é apresentado pela Equação 6:

$$F_T = \frac{W_n^2}{s^2 + 2\xi W_n s + W_n^2} \quad (6)$$

Portanto a função de transferência no domínio da frequência para a velocidade do trator está apresentado na Equação 7:

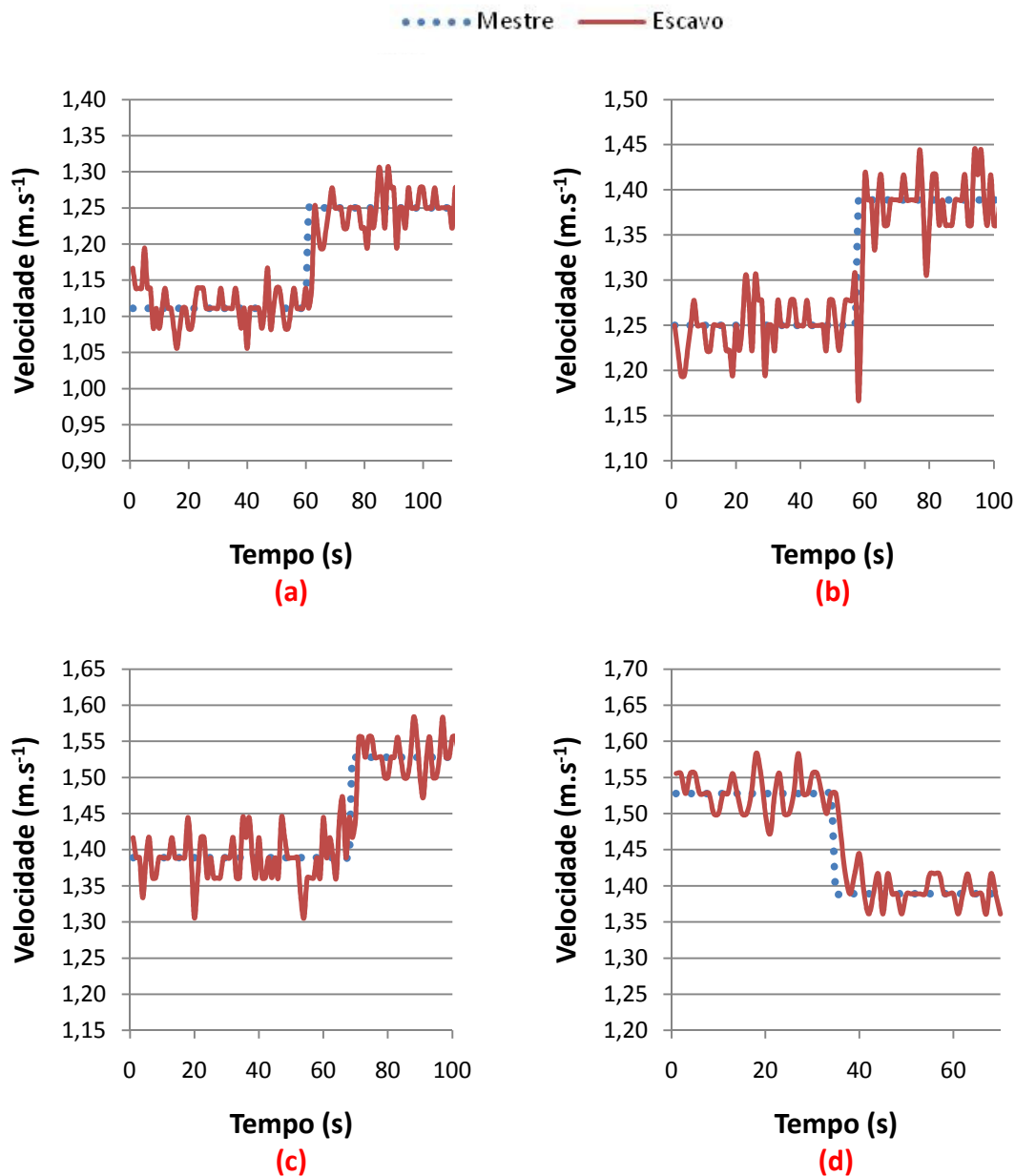
$$F_T = \frac{12,25}{s^2 + 7s + 12,25} \quad (7)$$

Onde:

- $\xi = 1$
- $W_n = 3,5$

4.2.2.3 Teste do sistema realizado com o trator escravo simulando a velocidade do trator mestre

A Figura 47 apresenta os gráficos que representam a velocidade do trator mestre (linha pontilhada) e a velocidade do trator escravo (linha cheia) para os testes realizados somente com um trator escravo simulando as velocidades do mestre. As variações foram de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$; $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$;



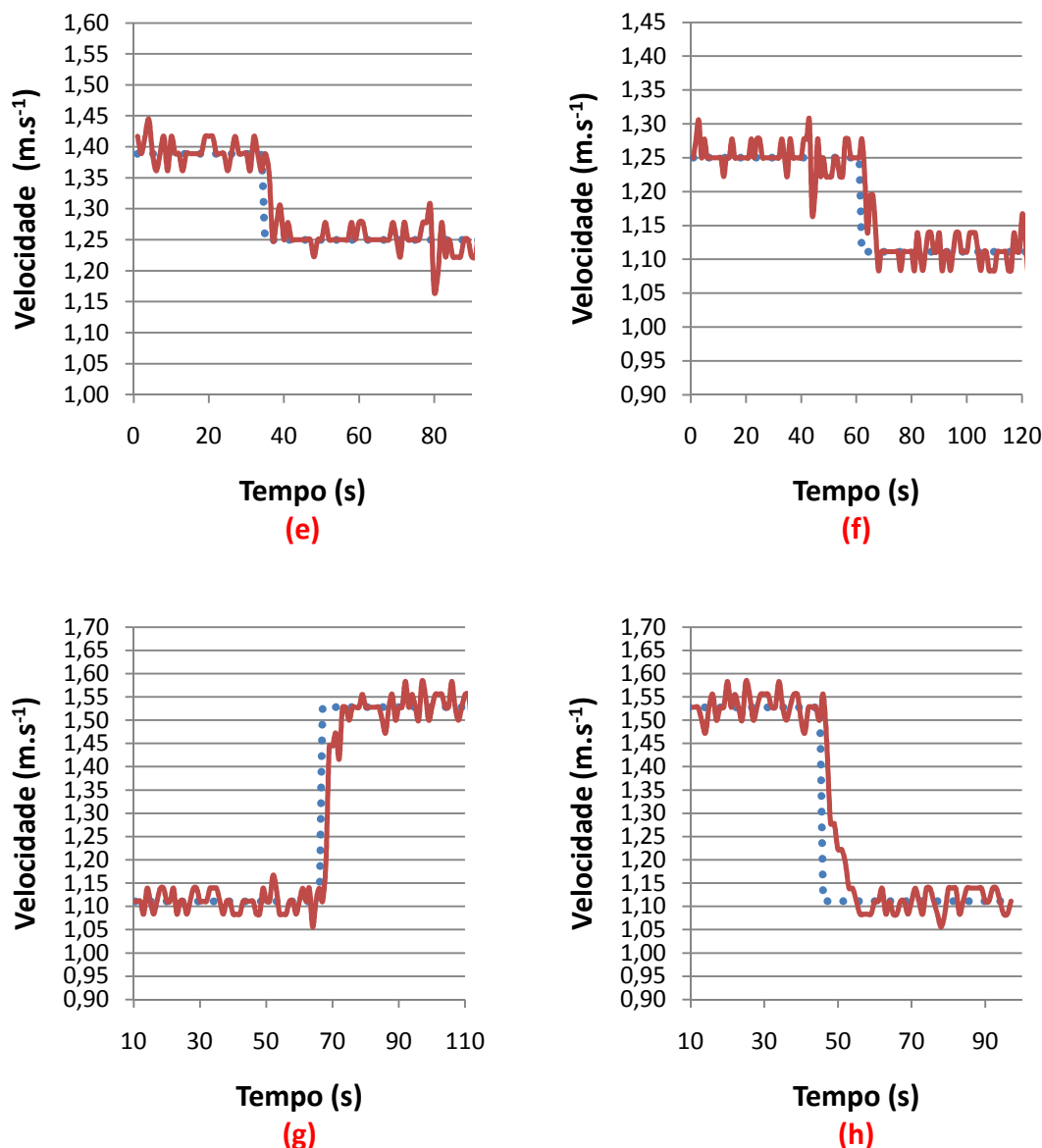


Figura 47 - Gráfico de velocidade pelo tempo do trator mestre e escravo simulando a variação da velocidade do mestre. a) variação de velocidade de 1,11 m.s⁻¹ para 1,25 m.s⁻¹; b) variação de velocidade de 1,25 m.s⁻¹ para 1,39 m.s⁻¹; c) variação de velocidade de 1,39 m.s⁻¹ para 1,53 m.s⁻¹; d) variação de velocidade de 1,53 m.s⁻¹ para 1,39 m.s⁻¹; e) variação de velocidade de 1,39 m.s⁻¹ para 1,25 m.s⁻¹; f) variação de velocidade de 1,25 m.s⁻¹ para 1,11 m.s⁻¹; g) variação de velocidade de 1,11 m.s⁻¹ para 1,53 m.s⁻¹; h) variação de velocidade de 1,53 m.s⁻¹ para 1,11 m.s⁻¹.

Pelos gráficos da Figura 47 verifica-se que o trator escravo (linha cheia) acompanhou o mestre (linha pontilhada) em todos os casos, independente do degrau de velocidade adotado.

No entanto, é possível verificar que houve uma variação de velocidade do trator escravo em torno da velocidade desejada (mestre). Esta variação se dá pelo fato de que a velocidade do trator não é constante, variando em função do próprio sistema de controle de injeção do motor diesel e pelas imperfeições do terreno.

A Tabela 5 apresenta a estatística descritiva realizada com as diferenças entre as velocidades dos tratores.

Tabela 5 - Análise estatística para a variação de velocidade onde o trator mestre é simulado

Vel. Inicial (m.s^{-1})	1,11	1,25	1,39	1,53	1,39	1,25	1,11	1,53
Vel. Final (m.s^{-1})	1,25	1,39	1,53	1,39	1,25	1,11	1,53	1,11
Média	0,000	0,003	0,003	-0,006	-0,006	-0,006	0,008	-0,017
Erro padrão	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,006	0,006
Mediana	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio padrão	0,031	0,036	0,033	0,031	0,028	0,031	0,056	0,067
Mínimo	-0,083	-0,083	-0,083	-0,139	-0,139	-0,167	-0,056	-0,444
Máximo	0,139	0,222	0,111	0,056	0,083	0,083	0,417	0,056
Soma	0,056	0,389	0,167	-0,444	-0,500	-0,556	1,028	-1,500
Contagem	119	127	104	70	97	134	117	97

Pela Tabela 5 verifica-se que em todos os casos a média e a mediana ficaram próximas e se aproximaram de zero, que é o valor desejado. A máxima diferença de velocidade durante o percurso, em módulo, foi de $0,444 \text{ m.s}^{-1}$ nos testes realizados com a variação de velocidade de $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ que é a maior variação. Já nos teste com variações de $0,14 \text{ m.s}^{-1}$ a máxima diferença foi de $0,222 \text{ m.s}^{-1}$ na variação de $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$. A maior média encontrada em módulo foi de $0,017 \text{ m.s}^{-1}$.

4.2.2.4 Testes com o trator mestre e com o trator escravo

A Figura 48 apresenta um gráfico real da variação da velocidade do trator mestre de um valor em torno de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para um valor em torno de $1,25 \text{ m.s}^{-1}$.

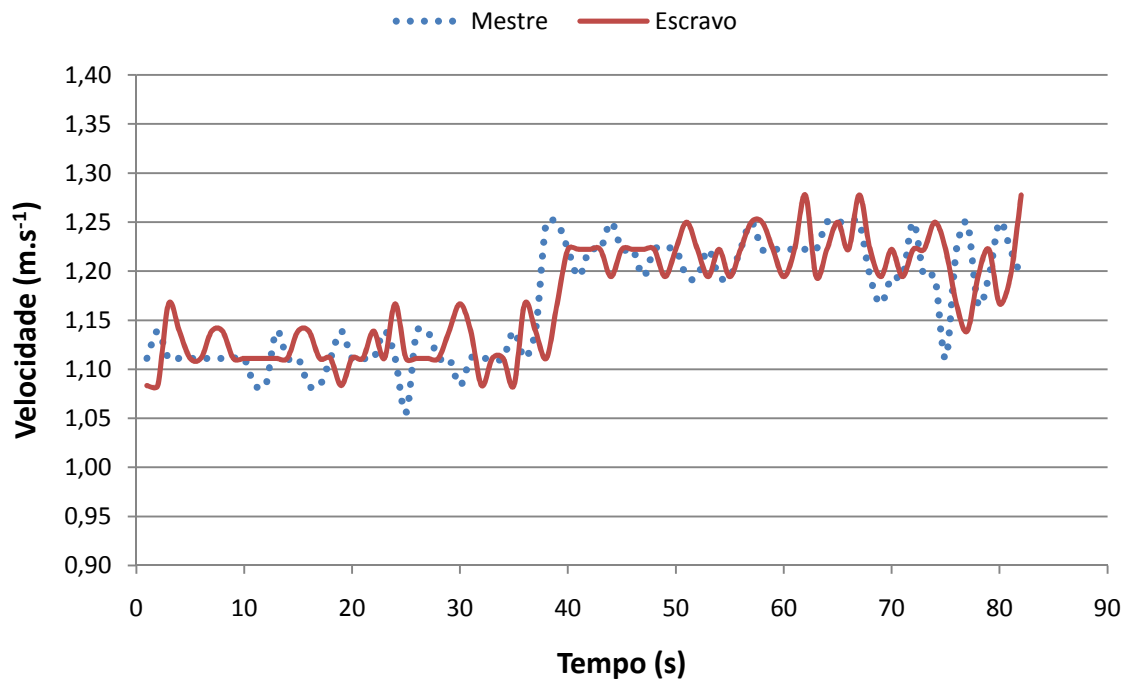
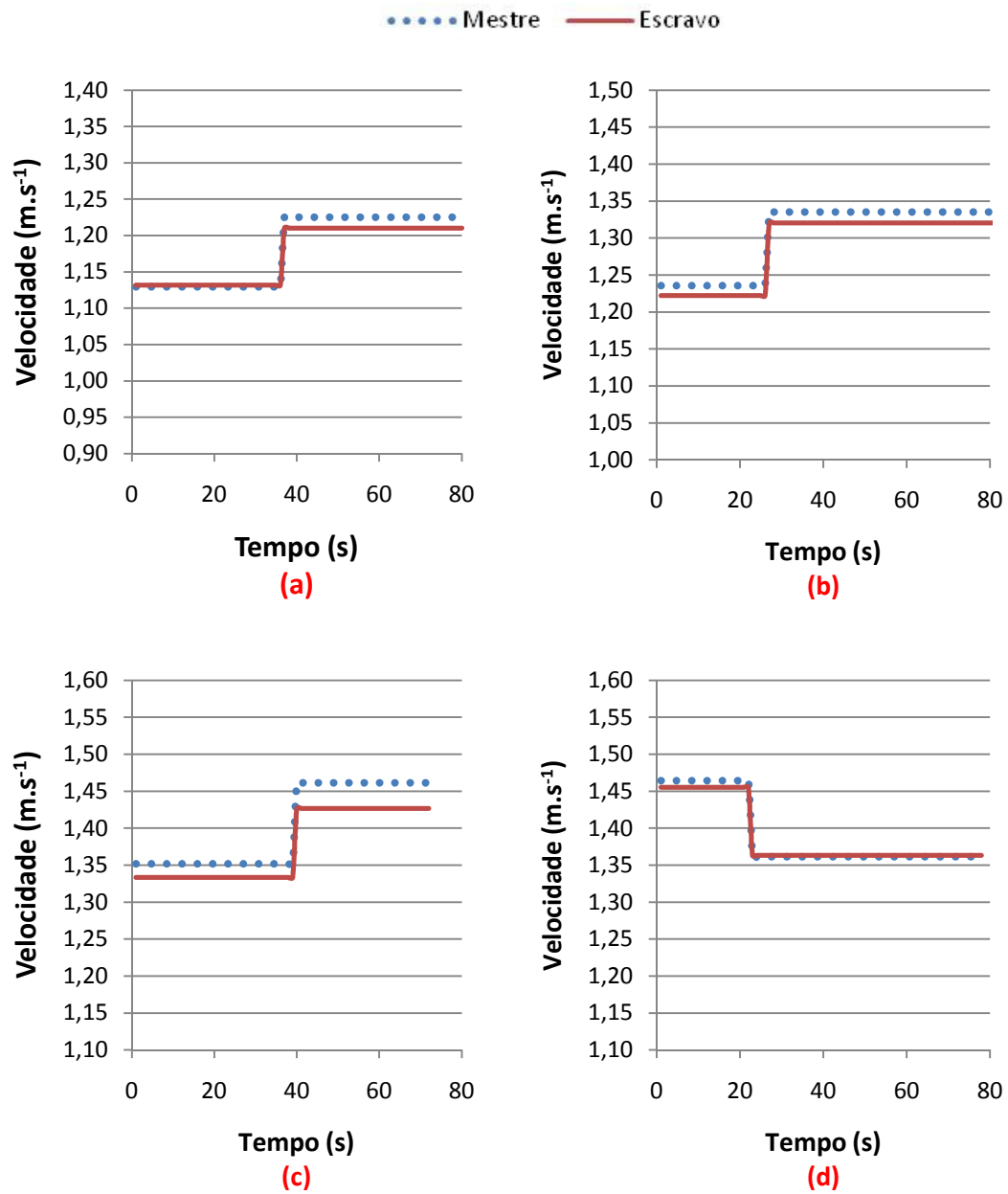


Figura 48 - Gráfico de velocidade pelo tempo do trator mestre e escravo variando a velocidade do mestre de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$

Pôde-se observar pela Figura 48 que tanto a velocidade do trator mestre quanto a do escravo variam muito no tempo, para que se possa analisar de forma mais clara os resultados gerados nos testes, extraiu-se as médias dos valores das velocidades em regime antes e depois do acréscimo da velocidade, analisando assim os períodos de regime do sistema.

A Figura 49 apresenta os gráficos de velocidade média do trator mestre (linha pontilhada) e a do trator escravo (linha cheia) para os testes realizados com os dois veículos. As variações foram de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$; $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$;



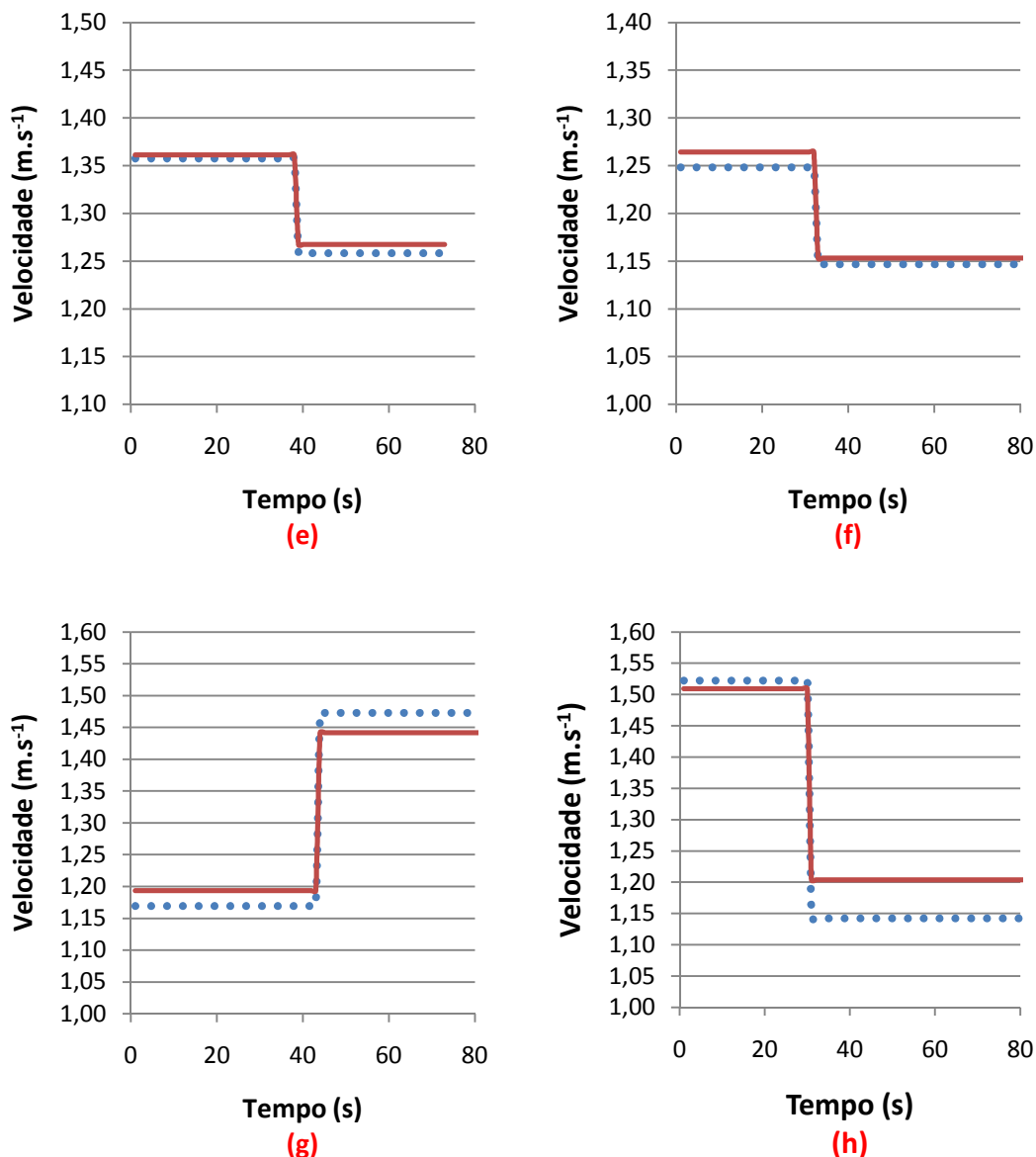


Figura 49 - Gráfico das velocidades médias do trator mestre e do trator escravo, variando a velocidade do mestre. a) variação de velocidade de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; b) variação de velocidade de $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; c) variação de velocidade de $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; d) variação de velocidade de $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,39 \text{ m.s}^{-1}$; e) variação de velocidade de $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,25 \text{ m.s}^{-1}$; f) variação de velocidade de $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$; g) variação de velocidade de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,53 \text{ m.s}^{-1}$; h) variação de velocidade de $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ para $1,11 \text{ m.s}^{-1}$.

Pelos gráficos da Figura 49 verifica-se que o trator escravo (linha cheia) acompanhou o mestre (linha pontilhada) em todos os casos independente do degrau de velocidade adotado. Porém pode-se verificar um erro pequeno em regime uma vez que a escala dos gráficos é de $0,05 \text{ m.s}^{-1}$.

As Tabela 6 a 13 apresentam as análises estatística descritiva das três repetições para os testes realizados com os dois tratores. As tabelas apresentam as análises para as diferenças de velocidade e também para as diferenças de deslocamento verificadas pelos encoders de cada máquina.

Tabela 6 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,11 a 1,25 m.s⁻¹

	<i>Diferença de Vel. (m.s⁻¹)</i>	<i>Diferença de Desl.(m)</i>
TESTE 1		
Média	-0,003	-0,002
Erro padrão	0,004	0,004
Mediana	0,000	0,000
Desvio padrão	0,041	0,037
Mínimo	-0,111	-0,081
Máximo	0,139	0,112
Soma	-0,250	-0,143
Contagem	82	82
TESTE 2		
Média	0,000	0,007
Erro padrão	0,004	0,004
Mediana	0,000	0,000
Desvio padrão	0,036	0,040
Mínimo	-0,083	-0,102
Máximo	0,083	0,132
Soma	-0,028	0,711
Contagem	98	98
TESTE 3		
Média	0,024	0,021
Erro padrão	0,004	0,004
Mediana	0,014	0,020
Desvio padrão	0,046	0,044
Mínimo	-0,056	-0,102
Máximo	0,167	0,102
Soma	2,444	2,153
Contagem	102	102

Tabela 7 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,25 a 1,39 m.s⁻¹

	<i>Diferença de Vel. (m.s⁻¹)</i>	<i>Diferença de Desl.(m)</i>
TESTE 1		
Média	-0,001	-0,004
Erro padrão	0,004	0,005
Mediana	0,000	0,000
Desvio padrão	0,037	0,043
Mínimo	-0,083	-0,081
Máximo	0,139	0,124
Soma	-0,111	-0,345
Contagem	84	84
TESTE 2		
Média	0,018	0,022
Erro padrão	0,004	0,005
Mediana	0,028	0,020
Desvio padrão	0,043	0,051
Mínimo	-0,083	-0,141
Máximo	0,139	0,142
Soma	1,750	2,214
Contagem	99	99
TESTE 3		
Média	0,026	0,026
Erro padrão	0,004	0,004
Mediana	0,028	0,020
Desvio padrão	0,043	0,036
Mínimo	-0,083	-0,061
Máximo	0,111	0,133
Soma	2,444	2,417
Contagem	93	93

Tabela 8 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,39 a 1,53 m.s⁻¹

	<i>Diferença de Vel. (m.s⁻¹)</i>	<i>Diferença de Desl.(m)</i>
TESTE 1		
Média	-0,001	-0,001
Erro padrão	0,004	0,004
Mediana	0,000	0,000
Desvio padrão	0,041	0,041
Mínimo	-0,111	-0,111
Máximo	0,083	0,083
Soma	-0,111	-0,111
Contagem	87	87
TESTE 2		
Média	0,028	0,024
Erro padrão	0,004	0,005
Mediana	0,028	0,020
Desvio padrão	0,035	0,045
Mínimo	-0,056	-0,081
Máximo	0,111	0,183
Soma	2,250	1,975
Contagem	81	81
TESTE 3		
Média	0,008	0,018
Erro padrão	0,005	0,002
Mediana	0,008	0,010
Desvio padrão	0,018	0,035
Mínimo	-0,028	-0,780
Máximo	0,083	0,120
Soma	1,722	1,260
Contagem	88	88

Tabela 9 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,53 a 1,39 m.s⁻¹

	<i>Diferença de Vel. (m.s⁻¹)</i>	<i>Diferença de Desl.(m)</i>
TESTE 1		
Média	-0,012	-0,011
Erro padrão	0,004	0,004
Mediana	0,000	-0,020
Desvio padrão	0,039	0,036
Mínimo	-0,111	-0,081
Máximo	0,056	0,081
Soma	-0,944	-0,853
Contagem	81	81
TESTE 2		
Média	0,003	0,011
Erro padrão	0,004	0,004
Mediana	0,000	0,020
Desvio padrão	0,041	0,038
Mínimo	-0,083	-0,061
Máximo	0,139	0,122
Soma	0,250	0,934
Contagem	86	86
TESTE 3		
Média	0,012	0,021
Erro padrão	0,003	0,004
Mediana	0,028	0,020
Desvio padrão	0,029	0,033
Mínimo	-0,083	-0,041
Máximo	0,056	0,102
Soma	1,000	1,706
Contagem	81	81

Tabela 10 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,39 a 1,25 m.s⁻¹

	<i>Diferença de Vel. (m.s⁻¹)</i>	<i>Diferença de Desl.(m)</i>
TESTE 1		
Média	-0,016	-0,013
Erro padrão	0,003	0,007
Mediana	-0,028	-0,020
Desvio padrão	0,030	0,068
Mínimo	-0,083	-0,142
Máximo	0,056	0,203
Soma	-1,389	-1,117
Contagem	87	87
TESTE 2		
Média	-0,008	-0,004
Erro padrão	0,004	0,006
Mediana	0,000	-0,020
Desvio padrão	0,039	0,053
Mínimo	-0,139	-0,122
Máximo	0,056	0,122
Soma	-0,694	-0,366
Contagem	89	89
TESTE 3		
Média	0,003	0,005
Erro padrão	0,004	0,004
Mediana	0,000	0,000
Desvio padrão	0,036	0,039
Mínimo	-0,111	-0,122
Máximo	0,083	0,142
Soma	0,306	0,447
Contagem	89	89

Tabela 11 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,25 a 1,11 m.s⁻¹

	<i>Diferença de Vel. (m.s⁻¹)</i>	<i>Diferença de Desl.(m)</i>
TESTE 1		
Média	-0,008	-0,004
Erro padrão	0,004	0,007
Mediana	0,000	-0,020
Desvio padrão	0,035	0,066
Mínimo	-0,083	-0,163
Máximo	0,083	0,142
Soma	-0,806	-0,345
Contagem	98	98
TESTE 2		
Média	-0,005	-0,010
Erro padrão	0,006	0,005
Mediana	0,000	-0,020
Desvio padrão	0,056	0,050
Mínimo	-0,167	-0,142
Máximo	0,111	0,142
Soma	-0,528	-0,975
Contagem	102	102
TESTE 3		
Média	-0,015	-0,010
Erro padrão	0,004	0,004
Mediana	-0,028	-0,020
Desvio padrão	0,036	0,036
Mínimo	-0,083	-0,081
Máximo	0,056	0,081
Soma	-1,472	-0,934
Contagem	97	97

Tabela 12 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,11 a 1,53 m.s⁻¹

	<i>Diferença de Vel. (m.s⁻¹)</i>	<i>Diferença de Desl.(m)</i>
TESTE 1		
Média	0,004	0,009
Erro padrão	0,006	0,008
Mediana	0,000	-0,020
Desvio padrão	0,060	0,076
Mínimo	-0,083	-0,122
Máximo	0,250	0,264
Soma	0,333	0,792
Contagem	89	89
TESTE 2		
Média	0,014	0,011
Erro padrão	0,005	0,007
Mediana	0,000	0,000
Desvio padrão	0,050	0,068
Mínimo	-0,083	-0,122
Máximo	0,194	0,244
Soma	1,222	0,955
Contagem	86	86
TESTE 3		
Média	-0,013	-0,019
Erro padrão	0,005	0,007
Mediana	-0,028	-0,020
Desvio padrão	0,049	0,065
Mínimo	-0,111	-0,122
Máximo	0,194	0,264
Soma	-1,139	-1,767
Contagem	91	91

Tabela 13 - Análise estatística para a variação de velocidade de 1,53 a 1,11 m.s⁻¹

	<i>Diferença de Vel. (m.s⁻¹)</i>	<i>Diferença de Desl.(m)</i>
TESTE 1		
Média	-0,013	0,007
Erro padrão	0,006	0,008
Mediana	-0,028	0,000
Desvio padrão	0,058	0,075
Mínimo	-0,222	-0,305
Máximo	0,111	0,183
Soma	-1,222	0,650
Contagem	91	91
TESTE 2		
Média	-0,036	-0,019
Erro padrão	0,005	0,007
Mediana	-0,028	-0,020
Desvio padrão	0,052	0,070
Mínimo	-0,139	-0,142
Máximo	0,111	0,142
Soma	-1,722	-1,828
Contagem	94	94
TESTE 3		
Média	-0,051	-0,017
Erro padrão	0,006	0,007
Mediana	-0,056	-0,021
Desvio padrão	0,055	0,063
Mínimo	-0,194	-0,102
Máximo	0,139	0,133
Soma	-2,306	-1,469
Contagem	89	89

A máxima diferença de velocidade em módulo foi de 0,25 m.s⁻¹ apresentada na Tabela 12 onde a variação da velocidade do trator mestre foi maior, passando de 1,11 a 1,53 m.s⁻¹. A máxima diferença de deslocamento no decorrer dos percursos, em módulo, foi de 0,305 m apresentada na Tabela 13 onde a variação de velocidade também é de 0,42 m.s⁻¹.

A Tabela 14 apresenta o total do deslocamento dos tratores, em cada teste, bem como o erro acumulado do sistema de controle de velocidade. Os deslocamentos foram medidos pelos encodes.

Tabela 14 - Erro acumulado no deslocamento total dos tratores em metro

Velocidade m.s⁻¹		TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
1,11 - 1,25	Total deslocamento	94,78	115,56	117,73
	Erro %	-0,15	0,62	1,83
1,25 - 1,39	Total deslocamento	107,55	128,05	118,71
	Erro %	-0,32	1,73	2,04
1,39 - 1,53	Total deslocamento	107,55	128,05	132,08
	Erro %	-0,10	1,54	0,95
1,53 - 1,39	Total deslocamento	112,90	118,58	110,09
	Erro %	-0,76	0,79	1,55
1,39 - 1,25	Total deslocamento	114,34	114,48	113,22
	Erro %	-0,98	-0,32	0,39
1,25 - 1,11	Total deslocamento	116,65	117,77	113,97
	Erro %	-0,30	-0,83	-0,82
1,11 - 1,53	Total deslocamento	112,35	112,94	120,64
	Erro %	0,71	0,85	-1,46
1,53 - 1,11	Total deslocamento	115,50	122,65	116,17
	Erro %	0,56	-1,49	-1,26

Pelas tabelas apresentadas verifica-se que o erro é aleatório até mesmo dentro de cada teste variando, por exemplo, de -0,32% a 2,04% na Tabela 14 com a variação de 1,25 para 1,39 m.s⁻¹. O maior erro acumulado em todos os testes foi de 2,417 m (2,04%).

4.3 Controle de direção de um trator

4.3.1 Avaliação do sensor

4.3.1.1 Lv-MaxSonar

A Figura 50 apresenta as distâncias medidas pelo sensor Lv-MaxSonar no decorrer do percurso, onde a linha tracejada representa a trajetória do veículo 1 onde está instalado o sensor, a linha cheia representa a trajetória da Van, anteparo do sensor e a linha pontilhada representa as medidas de distância realizada pelo sensor.

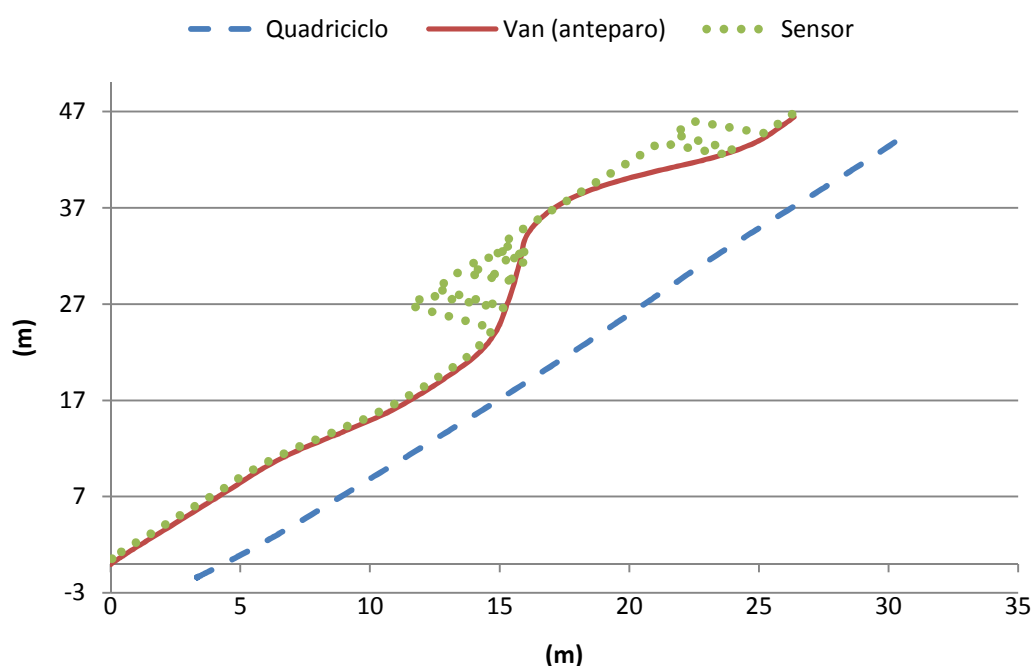


Figura 50 – Teste da acurácia do sensor Lv-MaxSonar (MaxBotix).

Na Figura 50 observa-se que o sensor captou bem as distâncias próximas, porém apresentou alguns valores discrepantes (outliers) para os pontos mais distantes.

A Tabela 15 apresenta a análise estatística descritiva da diferença das distâncias, em metro medidas pelo sensor e pelo RTK. Para análise os valores “outliers” foram retirados, pois na prática é possível identificar e filtrar esses pontos no programa, isso desde que não haja muitos pontos discrepantes.

Tabela 15 - Estatística do sensor Lv_MaxSonar

<i>Diferença entre RTK e sensor (m)</i>	
Média	-0,274
Erro padrão	0,024
Mediana	-0,278
Desvio padrão	0,268
Variância da amostra	0,072
Curtose	-1,478
Assimetria	0,041
Mínimo	-0,659
Máximo	0,282
Contagem	124

Pela Tabela 15 pode-se notar que a média dos valores foi de -0,274 m sendo que o valor ideal seria zero e que a maior diferença de medida foi 0,659 m.

4.3.1.2 Sonar TSPC

A Figura 51 apresenta as distâncias medidas pelo sensor Sonar TSPC no decorrer do percurso, onde a linha tracejada representa a trajetória do veículo 1, a linha cheia representa a trajetória do veículo 2 e a linha pontilhada as medidas de distância realizada pelo sensor.

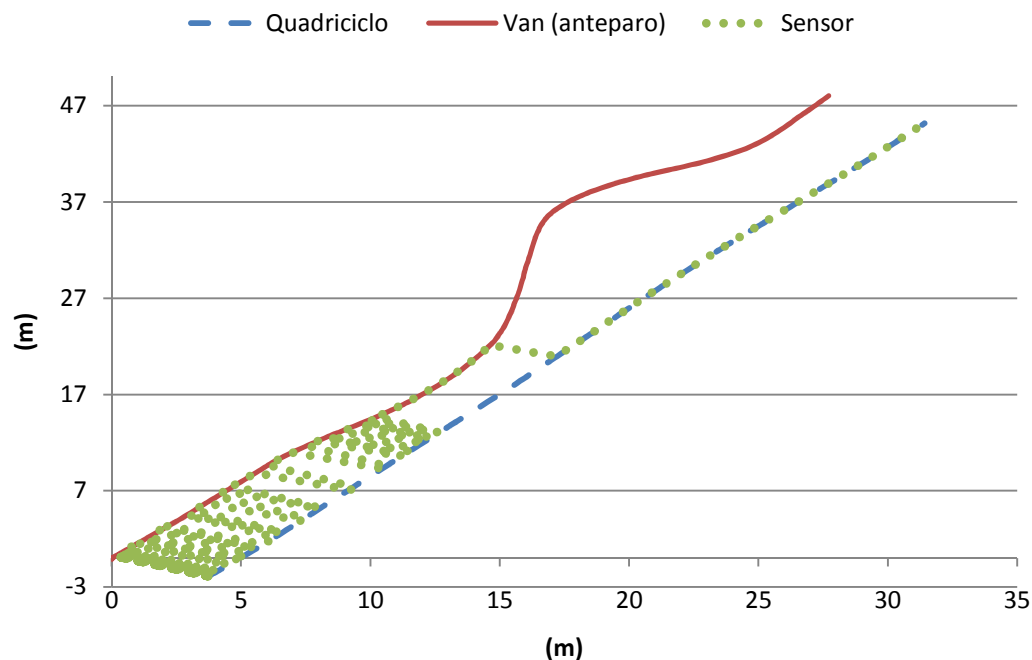


Figura 51 – Teste da acurácia do sensor sonar TSPC (Senix, Bristol, USA).

Nota-se na Figura 51 que o sensor apresentou muitos “outliers” em todo o decorrer do percurso. Isso se deve ao fato de que este sensor possui um cone de atuação muito estreito, qualquer variação no ângulo do anteparo desvia o sinal de ultrassom.

A Tabela 16 apresenta a análise estatística descritiva da diferença das distâncias, em metro medidas pelo sensor e pelo RTK, sem os valores de “outliers”.

Tabela 16 - Estatística do sensor TSPC

<i>Diferença entre RTK e sensor (m)</i>	
Média	-0,021
Erro padrão	0,009
Mediana	-0,042
Desvio padrão	0,088
Curtose	-1,571
Assimetria	0,211
Mínimo	-0,146
Máximo	0,101
Contagem	100

Pode-se observar pelos dados da Tabela 16, que excluem os valores “outliers”, que o sensor captou bem as distâncias com uma boa acurácia, a média dos valores foi de 0,021 m e a maior diferença de medidas foi de -0,146.

4.3.1.3 Sensor Laser

O Figura 52 apresenta as distâncias medidas por este sensor no decorrer do percurso, onde a linha tracejada representa a trajetória do veículo 1, a linha cheia a trajetória do veículo 2 e a linha pontilhada as medidas de distância realizada pelo sensor.

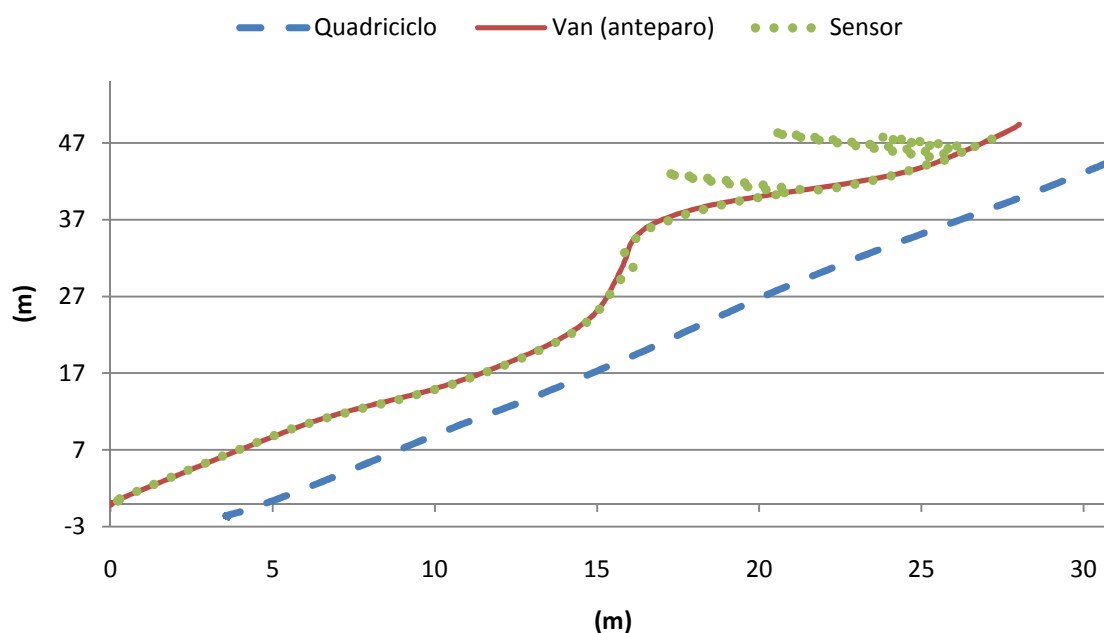


Figura 52 - Teste da acurácia sensor Laser (IFM)

Na Figura 52 pode-se observar que neste caso o número de “outliers” é baixo, menos de 1,0 %, isso se deve principalmente ao fato de que o sensor de distância a laser não é sensível a variações no ângulo do anteparo.

A Tabela 17 apresenta a análise estatística descritiva da diferença das distâncias, em metro medidas pelo sensor e pelo RTK, sem os valores de “outliers”.

Tabela 17 - Estatística do sensor Laser

<i>Diferença entre RTK e sensor (m)</i>	
Média	0,083
Erro padrão	0,002
Mediana	0,086
Desvio padrão	0,027
Curtose	4,170
Assimetria	1,817
Mínimo	-0,084
Máximo	0,107
Contagem	144

Pode-se observar que o sensor Laser possui uma boa acurácia; a média dos valores foi de 0,083 m e a maior diferença de medidas foi de 0,107.

Pela boa acurácia e pelo baixo número de pontos “outliers” apresentado pelo sensor laser em relação aos demais testados, optou-se pela utilização deste sensor que será responsável pela medida da distância entre o veículo mestre e escravo no decorrer dos testes de controle de direção.

4.3.2 Controle de direção utilizando sensor laser

A Figura 53 apresenta a resposta da leitura do sensor laser (linha cheia) utilizando o sistema de controle de direção desenvolvido, quando o offset (linha pontilhada) mudava de 2,00 para 2,40 m.

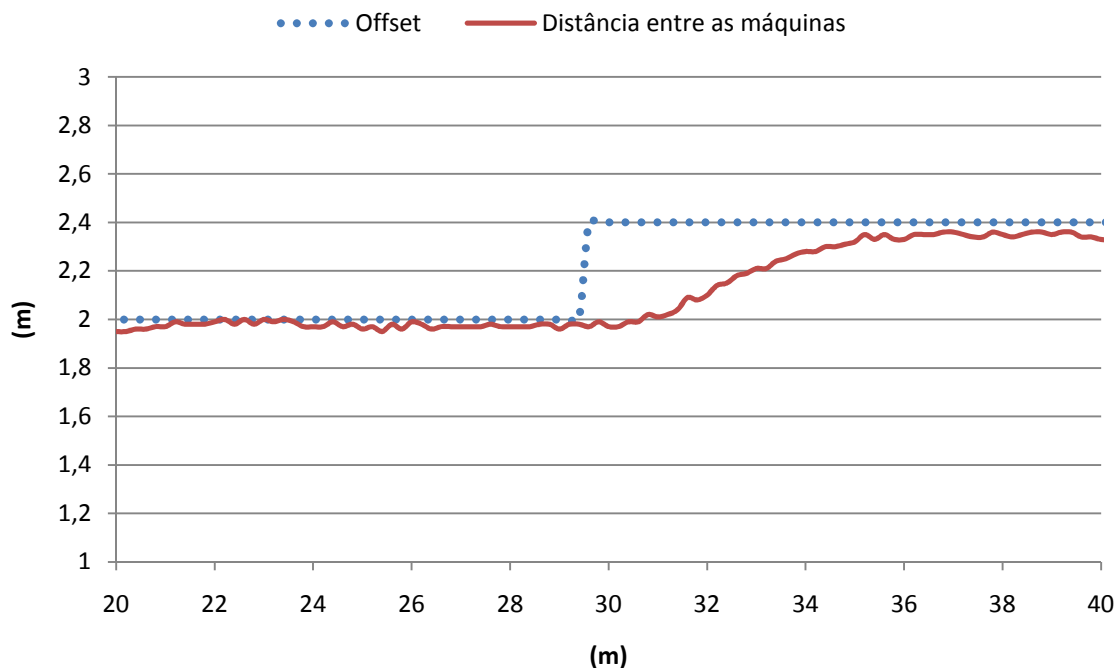


Figura 53 – Teste com o sistema de controle quando o offset muda de 2,00 m para 2,40 m

Na Figura 53 observa-se que trator acompanhou a variação de offset. O valor médio de tempo de resposta para as cinco repetições a essa variação foi de 7,4 segundos com um tempo morto de 1,7 segundos, que é o tempo em que o sistema demora a reagir, em torno de um segundo.

A Tabela 18 apresenta a análise estatística descritiva da diferença entre as distâncias dos dois veículos e o valor de offset desejado para a variação de offset de 2,00 m a 2,40 m. Os resultados estão divididos para o sistema em regime antes e depois da excitação.

Tabela 18 - Estatística descritiva das cinco repetições para a variação de offset de 0,4 m

Sistema em regime	Antes da excitação (m)	Depois da excitação (m)
Média	0,01	0,02
Mediana	0,01	0,02
Desvio padrão	0,03	0,03
Mínimo	-0,06	-0,07
Máximo	0,07	0,07
Contagem	218	220

Pode-se verificar pela Tabela 18 que os valores das médias e a mediana são próximos de zero que é o valor desejado. A média em módulo foi de 0,02 m e o maior erro de paralelismo encontrado em módulo foi de 0,07 m.

A Figura 54 apresenta a resposta da leitura do sensor (linha cheia) utilizando o sistema de controle de direção desenvolvido, quando o offset (linha pontilhada) mudava de 2,00 para 2,60 m.

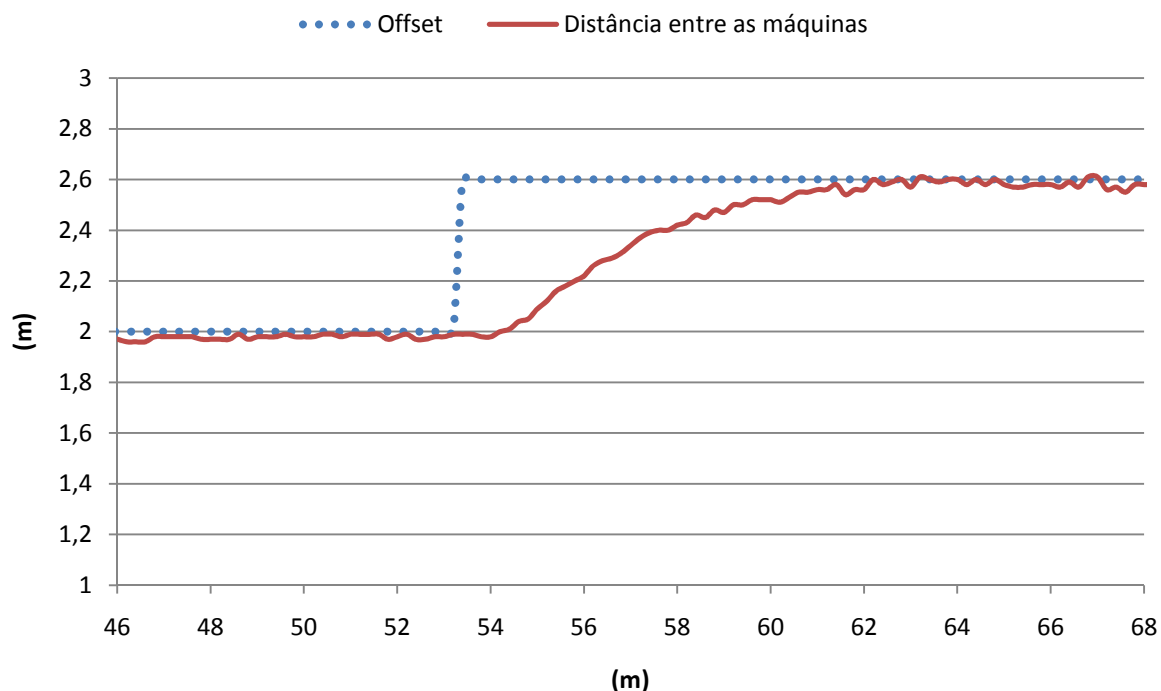


Figura 54 - Teste com o sistema de controle quando o offset muda de 2,00 m para 2,60 m

O valor médio de tempo de resposta para essa variação da Figura 54 foi de 7,8 segundos e tempo morto de 0,9 segundos.

A Tabela 19 apresenta a análise estatística descritiva para as cinco repetições variando o offset de 2,00 m a 2,60 m.

Tabela 19 - Estatística descritiva das cinco repetições para a variação de offset de 0,6 m

Sistema em regime	Antes da excitação (m)	Depois da excitação (m)
Média	0,02	-0,01
Mediana	0,02	0,00
Desvio padrão	0,04	0,04
Mínimo	-0,08	-0,10
Máximo	0,10	0,07
Contagem	166	297

Pela Tabela 19 pode-se verificar neste caso que os valores das médias e medianas também são próximos de zero. A maior média em módulo foi de 0,02 m e o maior erro de paralelismo encontrado em módulo foi de 0,10 m.

A Figura 55 apresenta a resposta média do sensor (linha cheia) quando o offset (linha pontilhada) mudava de 2,00 para 2,80 m.

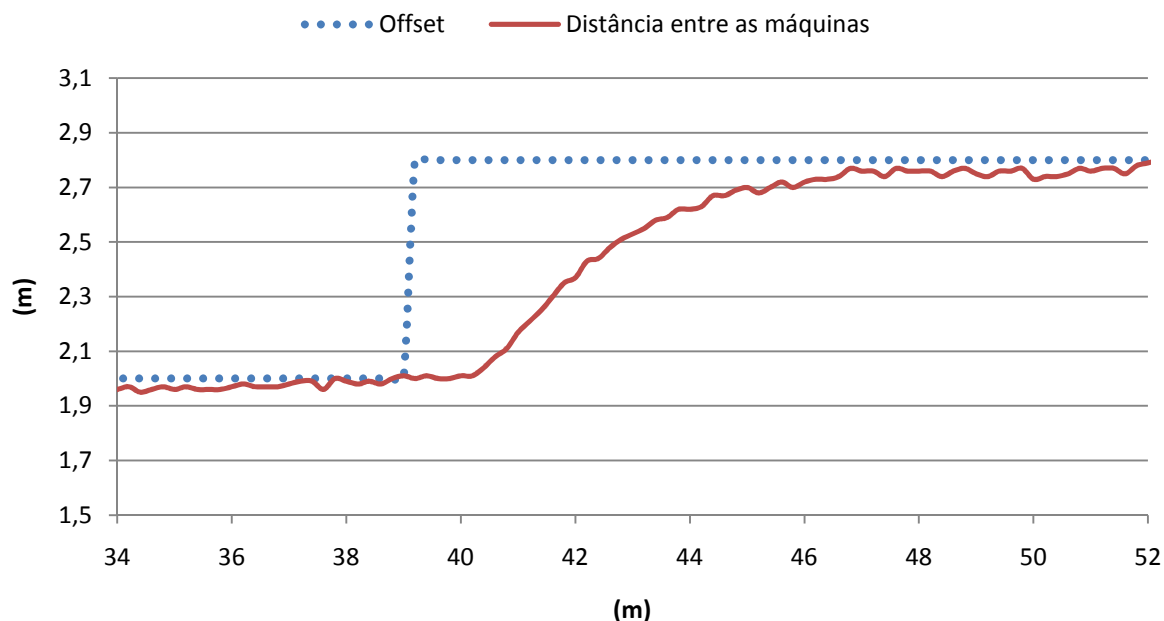


Figura 55 - Teste com o sistema de controle quando o offset muda de 2,00 m para 2,80 m

O valor médio de tempo de resposta para a variação da Figura 55 foi de 7,9 segundos e tempo morto de 1,2 segundos.

A Tabela 20 apresenta a análise estatística descritiva para as cinco repetições variando o offset de 2,00 m a 2,80 m.

Tabela 20 - Estatística descritiva das cinco repetições para a variação de offset de 0,8 m

Sistema em regime	Antes da excitação (m)	Depois da excitação (m)
Média	0,03	-0,01
Mediana	0,03	-0,01
Desvio padrão	0,03	0,04
Mínimo	-0,04	-0,08
Máximo	0,09	0,12
Contagem	292	382

A média em módulo foi de 0,03 e o maior erro de paralelismo encontrado em módulo foi de 0,12 m.

Por último a Figura 56 apresenta a resposta média do sistema desenvolvido quando o offset mudava de 2,00 para 3,00 m.

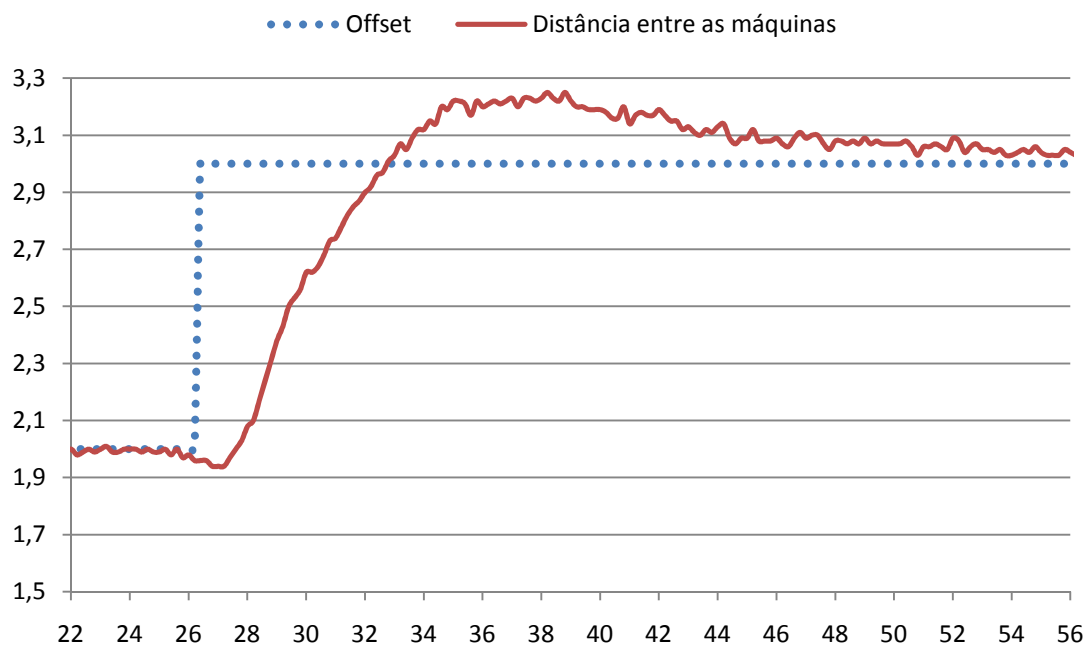


Figura 56 - Teste com o sistema de controle quando o offset muda de 2,00 m para 3,00 m

O valor médio de tempo de resposta a variação da Figura 56 foi de 18 segundos. Para esta situação o tempo foi maior, pois o sistema demora a reconhecer um acréscimo acima de 1 metro e quando reconhece a atuação é muito brusca gerando um sobre sinal que atrasa o tempo de acomodação do sistema.

Todos os testes realizados com a excitação em degrau apresentaram um tempo morto. Este tempo de reação se dá pelo fato de que o software do piloto automático da Trimble possui uma rotina para reconhecer quando um ponto está fora do previsto. Em testes preliminares o tempo morto ainda era maior, este problema foi amenizado mudando o primeiro valor da string do GPVTG que é responsável pela informação direção do veículo. Este valor era mudado junto com o deslocamento do ponto, assim as novas latitudes e longitudes criadas ficavam mais confiáveis para o software do piloto automático.

A Figura 57 apresenta o gráfico dos testes realizados com o veículo mestre em uma trajetória curvilínea.

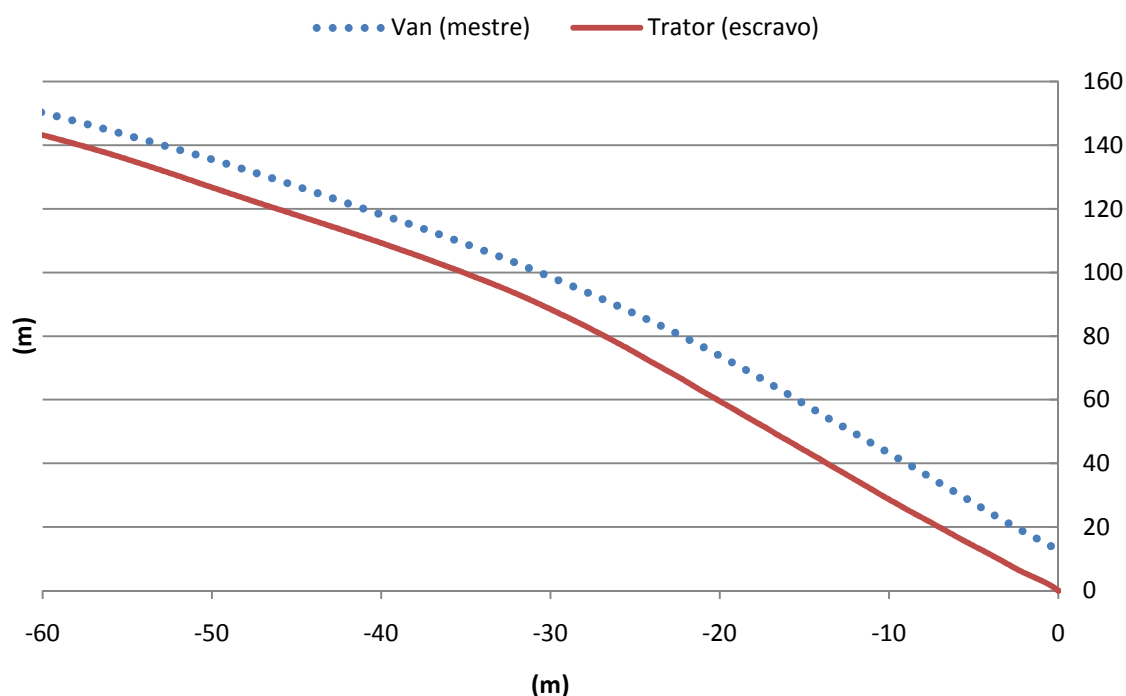


Figura 57 - Resposta do sistema de controle em trajetórias curvas.

Na Figura 57 pode-se observar que a Van (linha pontilhada) realizou um percurso em curva e o trator (linha cheia) acompanhou sua trajetória. A Figura 58 ilustra o deslocamento dos dois veículos no estacionamento da universidade de Kentucky.

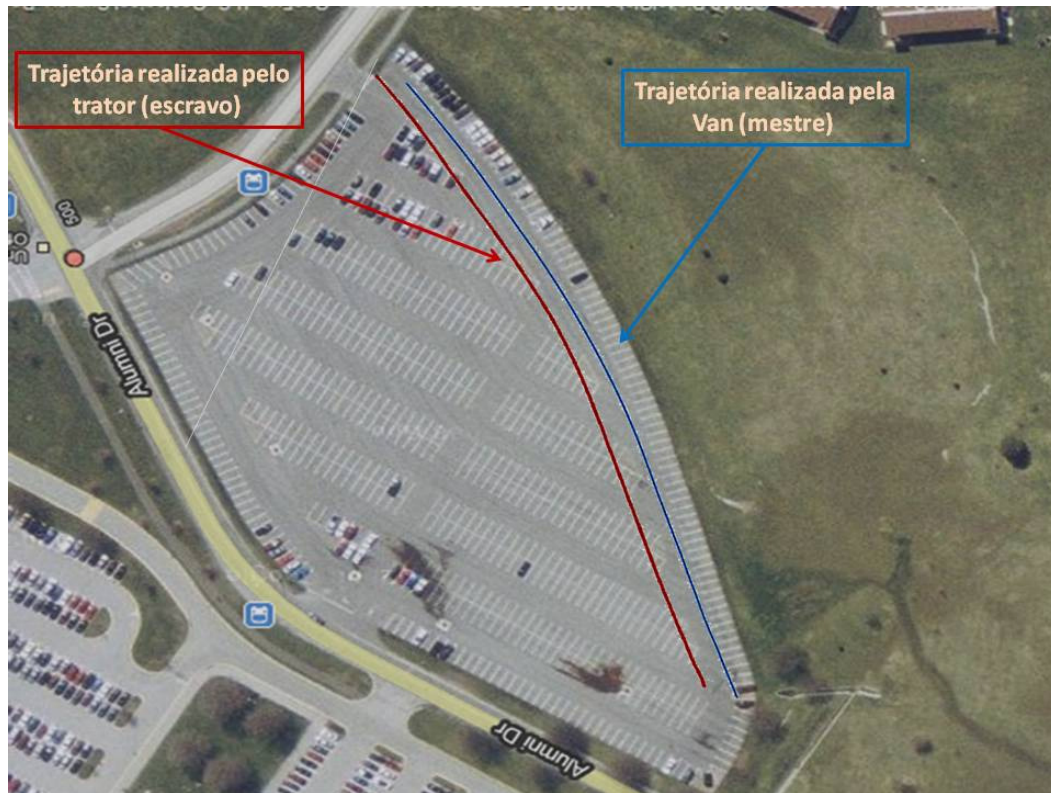


Figura 58 - Trajetória realizada pelo veículo mestre e escravo na universidade de Kentucky

A Figura 58 é uma sobreposição da área onde foram realizados os testes juntamente com o gráfico da Figura 57.

Já a Figura 59 apresenta os valores da diferença entre as medidas de distância captada pelo sensor laser e o offset desejado.

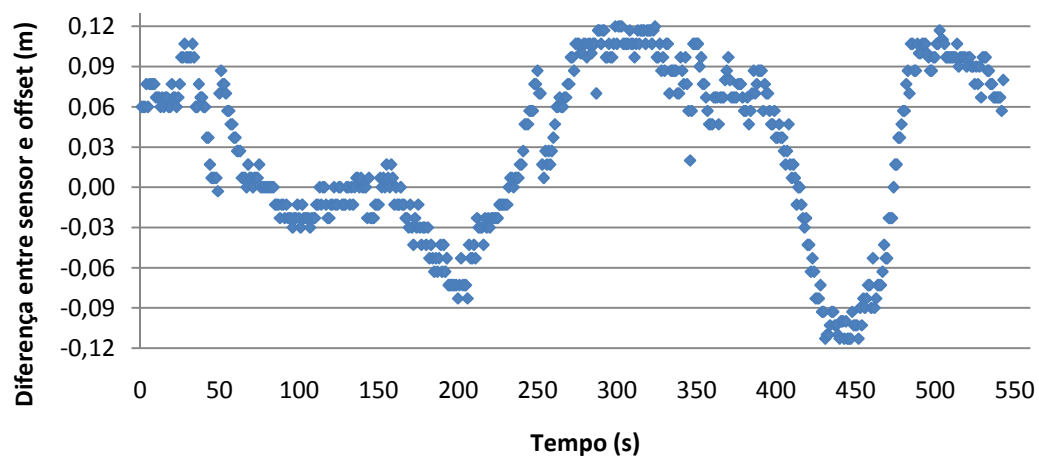


Figura 59 - Resposta das medidas do sensor no decorrer do percurso

Nota-se pela Figura 59 a tentativa do sistema de direção desenvolvido de manter a distância entre os veículos no valor de offset. O ideal para este gráfico seria que os pontos ficassem próximos de zero.

A Tabela 21 apresenta a estatística descritiva das diferenças das distâncias medidas pelo sensor e o valor desejado de paralelismo entre as máquinas (offset).

Tabela 21 - Estatística descritiva da diferença de distância medida pelo sensor e o offset

<i>Diferença entre o sensor e o offset (m)</i>	
Média	0,028
Erro padrão	0,003
Mediana	0,037
Desvio padrão	0,063
Variância da amostra	0,004
Mínimo	-0,113
Máximo	0,120
Contagem	543

Nota-se na Tabela 21 que a média dos valores ficou próximo de zero, que era o valor desejado e o máximo erro de paralelismo durante o percurso foi de 0,12 m. Considerando que o valor médio da largura do pneu de um transbordo é de 0,6 m e que em uma plantação de cana-de-açúcar com espaçamento de 1,5 m sobram 0,9 m para o pneu do trator se deslocar, tem-se que o pneu tem 0,3 m de folga para erros de direção sendo 0,15 m de cada lado. Com esses dados pode-se considerar que o erro máximo de 0,12 m é aceitável por estar dentro do erro permitido.

5. CONCLUSÃO

Concluiu-se que o projeto foi bem sucedido uma vez que os resultados comprovaram que é possível realizar um sincronismo entre dois veículos utilizando sensores e GPS. Além disso, comprovou-se a eficiência do controlador fuzzy para o sistema de controle de velocidade uma vez que o controlador fuzzy modelado pôde ser implementado e testado.

Pôde-se concluir que o subitem 4.1 apresentou boas respostas à simulação da modelagem do controlador fuzzy com erros de paralelismo entre os veículos de 0,077 m, correspondendo a 5,13% de erro comparado com o offset de 1,5 m. Já os erros de sincronismo passaram de 0,34 m (0,25%) para 0,10 m (0,07%) simulando o sistema com os sensores de correção ligados. O controlador fuzzy de velocidade modelado foi implementado e testado no subitem 3.2, onde concluiu-se que os objetivos foram atingidos uma vez que o trator escravo acompanhou as variações de velocidade do trator mestre. Os erros de deslocamento apresentados no subitem 4.2 podem ser corrigidos instalando sensores na lateral do trator escravo que indique o desalinhamento das máquinas acrescentando uma realimentação ao controle, como foi simulado e comprovado no subitem 4.1. No subitem 3.3 foi possível utilizar um piloto automático já comercial para trabalhar de forma diferente do habitual tornando-se assim um escravo que se movimenta conforme um mestre, este sistema apresentou respostas entre 7,4 s a 7,9 s no tempo de acomodação a uma excitação em degrau e um erro máximo de 0,12 m durante todo o percurso dos testes. Conclui-se que estes valores são considerados aceitáveis para a operação agrícola propostas onde o desviou de até 0,15 m não prejudica o desempenho operacional do conjunto colhedora veículo de transbordo. Além disso, tanto o tempo de resposta como o erro em regime ficou limitados à resposta do próprio sistema de piloto automático.

6. PROJETOS FUTURO

Em uma próxima etapa o controle de velocidade, o controle de direção e os sensores de correção devem ser implementados em um mesmo trator escravo, que também estará equipado com um GPS comum. Já o trator mestre será equipado com um piloto automático completo com RTK e o sensor laser, (Figura 60). Nesta etapa será feita a fusão dos dois programas desenvolvidos de modo que trabalhem juntos.

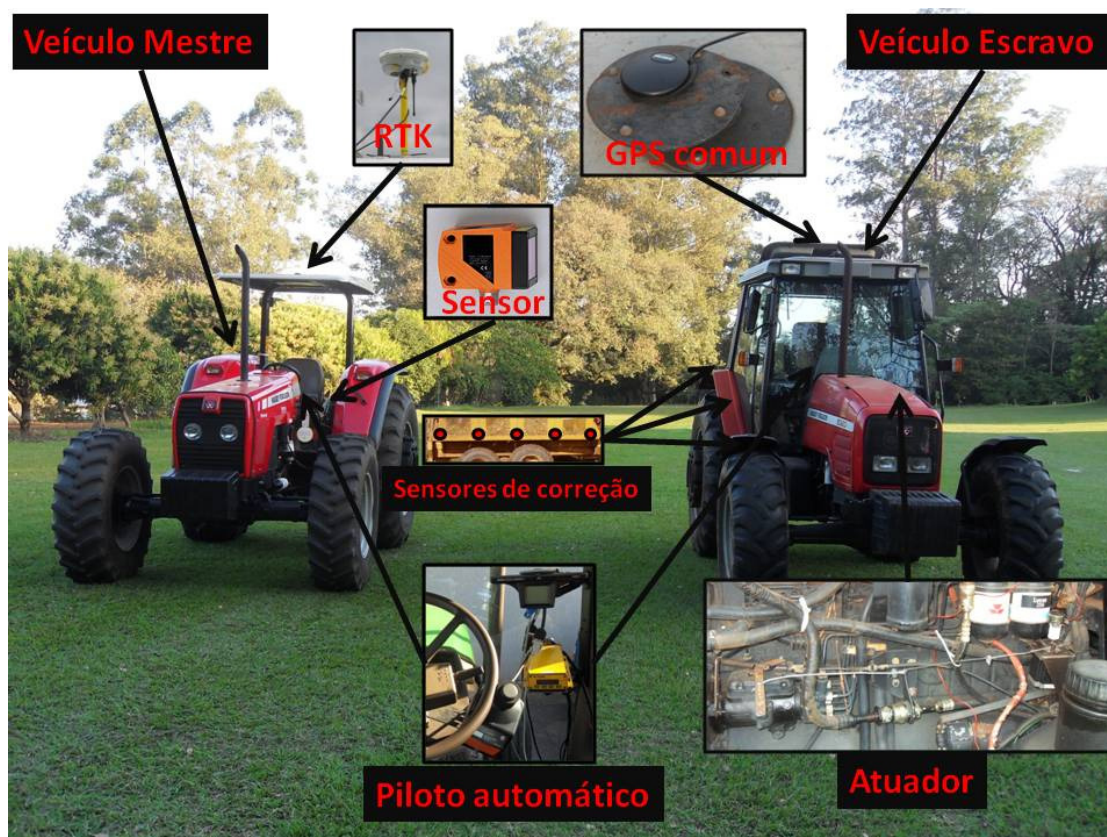


Figura 60 - Próximas etapas de implementação do sistema completo

Com o sistema de controle completo instalado nos veículos será possível realizar os testes para ajustar os últimos parâmetros do sistema de controle. Após isso, o sistema estará pronto para a última etapa onde será implementado em uma colhedora de cana-de-açúcar e em um transbordo de modo a validar o projeto completo em uma situação real de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGLUND, S.; BUICK, R. Guidance and automated steering drive resurgence in precision farming. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2005, Uppsala. **Proceedings...** Uppsala: John Stafford, 2005. P. 39-45.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/boletim_cana_setembro_2010.pdf. Acesso em: 15 de agosto 2010.

COX, E. **Fuzzy logic for business and industry**. Rockland: Charles River Media, Inc. 1995.

DICK, R.G. Potential losses higher when harvesting green. **BSES Bulletin**, Australia, n.15, p. 18-10, Jul. 1986.

DICK, R. G.; JAMES I. W. The eletronic cane loss monitor. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONFERENCE, 14.,1992, Mackay. **Proceedings...** Brisbane: Watson Ferguson, 1992. p.150-155.

DICK, R. G.; HILTON J. D. Sensor and control technology in sugarcane harvesters. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONFERENCE, 14, 1992, Mackay. **Proceedings...** Brisbane: Watson Ferguson, 1992, p.179-186.

DICK, R. G.; RIDGE, D.R.. **Harvester extractor performance and dirt rejection studies**. 13p. Relatório técnico-BSES, Australia, 1988.

DRIANKOV, D.; HELLENDORN, H.; REINFRANK, M. **An introduction to fuzzy control**. Springer-Verlag, New York, 316p. 1996.

FERREIRA, A.L.G.; PARANHOS, J.P.S. **Controle em tempo real por lógica fuzzy**. Projeto Final (Curso de Engenharia Elétrica/Eletrônica) – Faculdade de Engenharia de Resende, Resende-RJ, 2004.

FERNANDES, A C; OLIVEIRA, E R; QUEIROZ, L. Sugarcane trash measurements in Brazil. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 16., 1977, São Paulo. **Executive Committee of The ISSCT Congress**. São Paulo: Issct, 1978. v. 2, p. 1963 – 1973.

FOSTER, C. A.; STROSSER, R. P.; PETERS, J. Automatic velocity control of a self-propelled windrower. **Computers And Electronics In Agriculture**, Europa, n. 47, p.41-58, 08 out. 2005.

HAGRAS, H.; COLLEY M.; CALLAGHAN V. Outdoor Mobile Robots Learning and Adaptation. **IEEE Robotics & Automation Magazine**. no. 53. pp. 53-69. Setembro. 2001.

HORIUCHI, J.; KISHIMOTO, M. Application of *fuzzy* control to industrial bioprocess in Japan. **Fuzzy sets and Systems**, v.128, p.117-124, 2002.

JAGER, R. **Fuzzy logic in control**. Thesis Technische. Universiteit Delft, 1995.

JANG, J. S. R.; GULLEY, N. **Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB**. Usa: The Mathworks, 1993.

KISE, M.; ZHANG, Q.; MÁŠ, F. Rovira. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. **Biosystems Engineering: Automation and Emerging Technologies**, Illinois, n. , p.357-367, 23 fev. 2005

KODAGODA, K. R.; WIJESOMA, W. S. ; TEOH, E. K. Fuzzy Speed and Steering Control of an AGV. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Vol. 10, No. 1, January 2002.

LEITE, M.S. **Estudo comparativo do desempenho de controladores fuzzy e convencional aplicados em um bioprocesso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

LI, H.X.; GATLAND, H.B. Conventional *fuzzy* control and its enhancement. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v.26, n.5, p.791-797, 1996.

LUNA HUAMANÍ, I. **Redes neurais fuzzy aplicadas em identificação e controle de sistemas**. Dissertação (Mestrado em Automação Industrial) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A. **Bioetanol de cana-de-açúcar: Novo Modelo Agrícola para cana-de-açúcar**. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 950 p.

MAGALHÃES, P.S.G.; CERRI, D.G.P. Yield monitoring of sugar cane. *Biosystems Engineering*, London, v.96, n.1, p.1-6, 2007.

MANDANI, E.H. **Applications of fuzzy algorithm for simple dynamic plant**. Proceedings of the IEEE, v.121, p.1585-1588, 1974.

MENEGATTI L.; MOLIN, J. P.; GÓES, S. Monitoramento localizado da produção e logística durante a colheita de cana de açúcar, In – Seminário de mecanização e produção de cana-de-açúcar, 7; **CD**, Ribeirão Preto, 2005.

MORAES, E. E. **Avaliação das perdas invisíveis de cana-de-açúcar (Saccharum Spp.) e impurezas vegetais na colheita mecanizada**. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 1992.

NEVES, J. L. M. **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras de cana-de-açúcar picada e alternativas para sua redução**. 223 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 2003.

NEVES, J. L. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; OTA, W. M. Sistema de Monitoramento de Perdas visíveis de cana-de-açúcar em colhedora de cana picada. *Engenharia Agrícola*. , v.24, p.764 - 770, 2004

PAWLIKOWSKI, S. **Development of a fuzzy logic Speed and Steering Control system for an Autonomous Vehicle**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, University of Cincinnati, 1999.

PEREIRA FILHO, R. D. **Desenvolvimento e implementação de controladores nebulosos em uma coluna piloto de destilação em batelada**. Dissertação (Mestrado em Sistema de

Processos Químicos e Informática) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PINHEIRO, C. A. M. **Análise e projeto de sistemas de controle *fuzzy*: uma abordagem no domínio da frequência**. Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

RAMALINGAM, N.; STOMBAUGH, T.S.; MIRGEAUX, J. DGPS-Based Automatic Vehicle Guidance. **Asae**: Annual International Meeting, Milwaukee, n.001068, p.9-12, 03 jul. 2000.

REID, JF, ZHANG, Q., NOGUCHI, N., DICKSON, M., 2000. Agricultural automatic guidance research in North America. **Computers and Electronics in Agriculture**, 25:155-167. Sakai, 2000.

ROZEFF, N.; CRAWFORD JR, H.R. Green cane vs. burned cane comparisons, 1978-1979. **In**: International society of sugar cane technologists congress. 17., 1980, Manila. Philippines: The Executive Committee of The ISSCT, 1980 . v..1, p. 916-932.

SALVI, José V.; MATOS, Marcos A.; MILAN, Marcos. **Avaliação do desempenho de dispositivo de corte de base de colhedora de cana-de-açúcar**. *Eng. Agríc.* [online]. 2007, vol.27, n.1, pp. 201-209.

SCANDALIARIS, J.; MURO, E.; MARIOTTI, J. Comparative evaluation of harvesting systems. . **In**: International Society Of Sugar Cane Technologists Congress, 18., 1983, La Havana. Cuba: The Executive Committee of The ISSCT, 1983. v.1, p. 475-487.

SUBRAMANIAN, Vijay; BURKS, Thomas F.; ARROYO, A. A.. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. **Computers And Electronics In Agriculture**, Florida, n. , p.130-143, 16 jul. 2006.

SERRA, G. L. O. **Propostas de metodologias para identificação e controle inteligentes**. Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SHAW, I. S.; SIMÕES M. G. (1999). *Controle e Modelagem Fuzzy*. FAPESP, Editora Edgard Blucher LTDA.

STOMBAUGH, T. S. 1998. **Automatic guidance of agricultural vehicles at higher speeds**. Ph.D. diss. Library, University of Illinois at Urbana-Champaign.

SUDKAMP, T.; HAMMEL, R. j.. **Fuzzy modeling paradigms and practice: Rule Base Completion in Fuzzy Models**. Usa: Kluwer Academic, 1996.

TSOUKALAS, L. H.; UHRIG R. E. (1997). **Fuzzy and Neural Approaches in Engineering**. A Wiley-Interscience Publication.

YAGER, R.; FILEV, D. **Essentials of fuzzy modeling and control**. John Wiley e Sons, 1994.

ZADEH, L.A. *Fuzzy sets*. **Informatics and Control**, v.8, p.338-353, 1965.