



**CARLOS RENATO BORGES DOS SANTOS**

**SISTEMA ELETRÔNICO PARA A PREDIÇÃO  
DE ESTABILIDADE ESTÁTICA DE VEÍCULOS  
AUTOMOTORES**

**LAVRAS – MG**

**2017**

**CARLOS RENATO BORGES DOS SANTOS**

**SISTEMA ELETRÔNICO PARA A PREDIÇÃO DE ESTABILIDADE  
ESTÁTICA DE VEÍCULOS AUTOMOTORES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2017**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Santos, Carlos Renato Borges dos.

Sistema eletrônico para a predição de estabilidade estática de  
veículos automotores / Carlos Renato Borges dos Santos. - 2017.  
155 p. : il.

Orientador: Giovanni Francisco Rabelo.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2017.  
Bibliografia.

1. Inclinação. 2. Transversal. 3. Lateral. 4. Longitudinal. 5.  
Estabilidade estática. I. Rabelo, Giovanni Francisco. II. Título.

**CARLOS RENATO BORGES DOS SANTOS**

**SISTEMA ELETRÔNICO PARA A PREDIÇÃO DE ESTABILIDADE  
ESTÁTICA DE VEÍCULOS AUTOMOTORES**

***ELECTRONIC SYSTEM FOR PREDICTING THE STATIC STABILITY OF  
MOTOR VEHICLES***

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 15 de setembro de 2017.

Prof. Dr. Giovani Bernardes Vitor	Unifei
Prof. Dr. Carlos Antônio Rufino	UFV
Prof. Dr. Reginaldo Barbosa Fernandes	Cefet-MG
Prof. Dr. Jackson Antônio Barbosa	UFLA

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2017**

À minha esposa, amante, confidente e amiga, Eleyde.  
Às nossas filhas, Alissa e Alanna.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela força e coragem nos difíceis momentos.

Agradeço à minha esposa Eleyde, pela dedicação, compreensão, carinho e apoio em todos os momentos difíceis deste longo caminho.

Às minhas filhas, Alissa e Alanna, bênçãos de Deus.

Ao meu orientador, Giovanni Francisco Rabelo, pela confiança e total apoio ao trabalho realizado.

Agradeço à ajuda técnica de Eder Furtado, pela construção das plataformas dos sensores.

Agradeço ao suporte técnico do motorista Pedro Severo da Silva, que contribuiu com ideias e sugestões para a realização do experimento com o trator, além de manobrá-lo durante os ensaios.

Agradecimentos ao Arthur de Miranda Neto, Victor Etagens, Mohamed Cherif Rahal, Eric Monacelli e ao VEDECOM/UVSQ.

Agradecimentos às contribuições de Giovani Bernardes e Jackson Barbosa.

Aos meus pais, Carlos Roberto e Milza Rossana, que me mostraram o caminho do saber pela importância do estudo.

Aos meus avós, Milza (in memoriam), José (in memoriam), Marina e Athenodoro (in memoriam), pelas suas ações inspiradoras, lições de vida e superação de desafios.

Agradecimentos ao Arthur de Miranda Neto, Victor Etagens, Mohamed Cherif Rahal, Eric Monacelli e ao VEDECOM e à Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ).

Agradecimentos às contribuições de Giovani Bernardes e Jackson Barbosa.

Agradecimentos à CAPES pela bolsa de estudos.

Ao IFMG-Campus Formiga, por permitir e apoiar o meu ingresso no curso de doutorado.

"Não faça nada quando estiver com dúvidas. Tome suas decisões só depois de tê-las dissipado. Enquanto não tiver segurança sobre a questão que lhe causa a hesitação, não adianta levá-la adiante, isso apenas aumentará as suas preocupações.

...

A certeza aliada à segurança aumenta o nosso poder de decisão."  
(Valdemir P. Barbosa - Livro: Força Interior)



## RESUMO

Neste trabalho são apresentados o desenvolvimento e a validação de um sistema de predição da estabilidade estática de um trator agrícola. Ele é capaz de estimar a inclinação do trator, em momento futuro, a partir da medição da inclinação atual e da altura de obstáculos à frente das rodas dianteiras e traseiras. O modelo triciclo foi utilizado para verificar a estabilidade estática atual e futura. Neste trabalho, também, mediu-se o ângulo do eixo dianteiro atual e realizou-se sua predição. Para essa finalidade, necessitou-se apenas da inserção de um medidor de distância ou de um medidor de inclinação no eixo dianteiro, aproveitando-se os dados obtidos pelos demais sensores do sistema de predição das inclinações transversal e longitudinal do trator agrícola. Ensaio realizados com trator mostram a aplicabilidade e a precisão do sistema proposto de predição, podendo-se adequá-lo a outros veículos automotores.

**Palavras-chave:** Inclinação. Transversal. Lateral. Longitudinal. Estabilidade. Predição.

## **ABSTRACT**

In this work, the development and validation of a static stability prediction system for agricultural tractor are presented. This system is capable of estimating the inclination of the tractor in future movement based on current inclination and obstacle height measurements ahead of the front and rear tires. The tricycle model was used to verify current and future static stability. The angle of the front axis was also measured and, later, predicted. For this end, only the insertion of a distance gauge or front axis inclination gauge was necessary, using the data obtained by means of the other sensors of the transversal and longitudinal inclination prediction system of the tractor. Trials conducted with the tractor showed the applicability and precision of the proposed prediction system, with the possibility of adaptation to other motor vehicles.

**Keywords:** Inclination. Transversal. Lateral. Longitudinal. Stability. Prediction.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Objetivo geral	13
1.2	Objetivos específicos	14
1.3	Descrição dos capítulos	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1	Acidentes com tratores agrícolas	17
2.2	O tombamento de tratores agrícolas	19
2.3	Mecânica do chassi do trator	28
2.4	Filtros digitais	41
2.4.1	Média	41
2.4.2	Média móvel	43
2.4.3	Filtro Passa-Baixa	43
2.4.4	Filtro de Kalman	43
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>47</b>
3.1	Sistema de predição	47
3.1.1	Ajuste de Zero	48
3.1.2	Medição	49
3.1.3	Equações de predição da inclinação	51
3.1.4	Equações de Predição do ângulo do eixo dianteiro	53
3.2	Matrizes de rotação	55
3.3	Transformação do plano de inclinação	57
3.4	Hardware	62
3.4.1	Microcontrolador	65
3.4.2	Teclado matricial	67
3.4.3	Medidor de distância	68
3.4.4	Sensor de orientação	70
3.4.5	Display de cristal líquido	71
3.5	Software	73
3.5.1	Biblioteca circuito Alfa	73
3.5.2	Biblioteca circuito Omega	74
3.6	Resumo do capítulo	74
<b>4</b>	<b>TESTES COM OS SENSORES EM MAQUETE</b>	<b>75</b>

4.1	Medições com sensor de orientação .....	77
4.2	Medições com sensor ultrassônico.....	80
4.3	Filtragem .....	82
4.3.1	Filtragem do sensor de orientação .....	83
4.3.2	Filtragem do sensor ultrassônico.....	83
4.4	Filtragem com mudança brusca.....	84
4.5	Desempenho dos algoritmos de filtragem .....	85
4.6	Conclusões do capítulo .....	88
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO: ROTAÇÃO DO CHASSI.....</b>	<b>89</b>
5.1	Os experimentos de Demsar, Bernik e Duhovnik (2012) .....	89
5.2	Os experimentos de Khoury Junior (2000) .....	106
5.3	Algoritmo de verificação da estabilidade estática.....	111
5.4	Conclusões do capítulo .....	114
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO: TESTES COM TRATOR .....</b>	<b>115</b>
6.1	Os ensaios com trator .....	121
6.2	Medição manual.....	124
6.2.1	Comparando formas de medir o ângulo do eixo.....	131
6.3	Medição eletrônica.....	132
6.3.1	Utilizando ultrassônicos e sensor de orientação.....	132
6.3.2	Utilizando ultrassônicos e inclinômetro.....	138
6.4	Resumo e comentário dos resultados .....	143
7	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>145</b>
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	145
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE A – TESTE DOS ALGORITMOS DOS FILTROS</b>	
	<b>DIGITAIS.....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE B – VERIFICANDO RELAÇÃO ENTRE MEDIÇÃO</b>	
	<b>MANUAL E ELETRÔNICA.....</b>	<b>155</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento de novas tecnologias é vital à competitividade diante de um mercado globalizado. Nesse contexto, o aprimoramento tecnológico, no tocante à automação das máquinas agrícolas, é essencial à produtividade e à segurança do agricultor. Todavia tecnologias exigem elevados investimentos que excluem o acesso a inovações aos pequenos agricultores, que não possuem condições econômicas para investir em produtos com tecnologias de ponta. Apesar dos avanços obtidos, por meio da mecanização agrícola, ainda há acidentes com tratores no campo, sendo o tombamento (ou capotamento) um dos mais graves. Estudos sobre acidentes do trabalho, em zonas rurais, revelam um alarmante índice de operadores de tratores agrícolas que perderam suas vidas em decorrência do tombamento. A largura dos eixos e o elevado centro de gravidade do trator são agentes facilitadores do tombamento, ao passo que operações indevidas facilitam o tombamento. Medidas de proteção ao operador são implementadas, recomendadas e normatizadas quanto ao cinto de segurança e às estruturas de proteção ao tombamento (também conhecido como EPC - estruturas de proteção ao capotamento). Por outro lado, ainda não há dispositivos comerciais capazes de anteceder a inclinação do trator. Neste trabalho, é proposto um dispositivo de medição da inclinação do trator e que mapeia a área por onde os pneus do trator passarão, verificando - se a estabilidade estática, ou seja, podem-se detectar obstáculos ou buracos, objetivando-se antecipar a inclinação do trator antes que ele passe pelo obstáculo. Uma vez processada a inclinação futura do veículo, objetiva-se o desdobramento de novas tecnologias que incrementem a segurança veicular.

### **1.1 Objetivo geral**

O âmago deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema eletrônico de custo acessível que consiga, em um primeiro momento, conjecturar um

cenário de tombamento de uma máquina agrícola, oferecendo maior segurança ao operador.

### **1.2 Objetivos específicos**

- a) Construir um sistema eletrônico capaz de antecipar as inclinações transversal e longitudinal de uma máquina agrícola.
- b) Desenvolver algoritmos para o cálculo da inclinação atual e futura a partir dos dados dos sensores.
- c) Apresentar uma interface gráfica, em ambiente embarcado, que forneça as informações de inclinação em tempo real.
- d) Determinar o ângulo atual e futuro do eixo dianteiro.
- e) Validação do sistema, realizando-se ensaios em máquina agrícola.

### **1.3 Descrição dos capítulos**

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica dos acidentes com tratores, destacando-se o índice de acidentes por tombamento no cenário agrícola. Revisiona-se, também, aspectos da mecânica do chassi e apresenta um estudo sobre filtros digitais, utilizados em sinais digitais oriundos de sensores.

No capítulo 3 são mostradas as equações de predição da inclinação e as matrizes de rotação. Apresenta o hardware, descrevendo seus componentes e lógica de funcionamento.

No capítulo 4 são mostrados os resultados dos testes dos sensores, do microcontrolador e dos filtros digitais, testados numa maquete.

No capítulo 5 são mostrados dois modelos do chassi, o modelo triciclo e o trapezoidal, os quais são usados em regiões planares cujo centro de gravidade deve estar contido, para que se mantenha a estabilidade estática do trator. Aplicam-se as matrizes de rotação para adequar os modelos às inclinações transversal e longitudinal do trator e verificar a estabilidade estática.

Finalmente, no capítulo 6, são mostrados testes realizados em um trator agrícola, para verificar o sistema de predição das inclinações transversal e longitudinal, que são fundamentais para a validação da estabilidade estática, mostrada no Capítulo 5.





## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo, são apresentadas revisões bibliográficas com que realizaram-se estudos estatísticos sobre os acidentes na agricultura, mostrando que os acidentes por tombamento de tratores são significativos. São mostrados, ainda, estudos sobre a estabilidade de tratores, que constata, dentre outros parâmetros, a importância em se conhecer a inclinação do veículo. Após isso, realizou-se um levantamento bibliográfico sobre a mecânica do chassi e sobre as novas tecnologias empregadas na agricultura para aumentar a segurança do operador do trator agrícola.

### **2.1 Acidentes com tratores agrícolas**

Estudos da Organização Internacional do Trabalho mostram que as atividades agrícolas estão entre as três atividades mais perigosas para os trabalhadores, em especial, as que utilizam máquinas agrícolas (MONTEIRO; ARBEX, 2012).

No Brasil, ainda há poucos estudos relacionados aos acidentes, envolvendo máquinas agrícolas, o que dificulta a obtenção de dados sobre acidentes para classificá-los quanto ao tipo e causa (MONTEIRO; ARBEX, 2012; SCHLOSSER et al., 2002).

A escolha da máquina agrícola não deve ser limitada apenas à potência, consumo, torque ou qualquer outra característica relacionada ao desempenho, mas também à segurança e ao bem-estar de quem vai operá-la e mantê-la (SILVEIRA, 1988).

Schlosser et al. (2002) objetivaram em seu estudo a caracterização dos acidentes, envolvendo tratores agrícolas ocorridos na região da Depressão Central do Rio Grande do Sul, para, em seguida, delinear estratégias eficientes em sua prevenção. Neste estudo, destaca-se o tombamento como o tipo de acidente mais comum, ocorrido com tratores agrícolas, correspondendo a

51,71% do total de acidentes graves. No mesmo estudo, ainda, é destacado que 32,22% dos acidentes com tratores foram causados por falta de atenção do operador.

Os principais riscos de acidente com tratores que podem ocorrer são tombamento transversal (ou lateral), tombamento para trás, aprisionamento por peças móveis e queda do operador. O tombamento transversal pode ocorrer em terrenos inclinados, queda de roda em buraco, afundamento das rodas traseiras na lama, deslocamento e frenagem brusca em alta velocidade, presença de pedras e outros obstáculos que se encontram no percurso do trator (CORRÊA; YAMASHITA, 2009).

Reis (2009) revela que, na região central do Rio Grande do Sul, nas propriedades agrícolas mecanizadas, 75% dos acidentes catalogados envolvem tratores agrícolas e afirma que o tombamento foi a maior causa de acidentes fatais.

A obra de Silveira (1988) mostra uma estatística de acidentes de trabalho na agricultura brasileira em que 40% dos acidentes são causados por incapacidade ou ignorância ao perigo, 22% por velocidade excessiva e 21% por falta de atenção do tratorista.

Segundo Li et al. (2016), as estatísticas mostram que o tombamento transversal é o tipo de acidente fatal mais frequente envolvendo tratores. Há, segundo os autores, muito interesse de pesquisa em melhorar a estabilidade transversal do trator. Eles, ainda, ressaltam que em pesquisas anteriores descobriram-se os efeitos de vários fatores sobre as respostas dinâmicas do trator; entretanto os fatores têm sido analisados separadamente, não se conhecendo as suas interações.

Em Portugal, uma campanha de palestras, realizada em 2016, revelou que mais de 60% das mortes causadas pelos tratores agrícolas, no ano de 2010, foram decorrentes de tombamento (DIAS, 2016).

Em pesquisa realizada nas regiões Nordeste, Central e Leste de Minas Gerais, constatou-se que dos acidentes de trabalho no meio rural, 67,11% ocorreram com tratores agrícolas, e destes, 18,42% foram por tombamento, ou seja, foi o segundo maior tipo de acidente, perdendo somente para o contato com o eixo cardã. Ainda, dos acidentes com tratores agrícolas, 26,31% ocorreram por falta de atenção, sendo esse o principal motivo constatado (FERNANDES et al., 2014).

No estudo sobre acidentes com tratores, realizado em 73 municípios de Minas Gerais, Madeira (2011) conclui que as propriedades agrícolas analisadas são, predominantemente de pequeno porte, com baixo nível tecnológico e com graves problemas de segurança, sendo alta a incidência de acidentes com tratores, cujo tombamento é o segundo tipo mais comum de acidente, ao passo que a falta de atenção é uma das principais causas de acidentes.

## **2.2 O tombamento de tratores agrícolas**

O tombamento não está restrito somente aos tratores agrícolas. Grzebieta, Rechnitzer e Simmons (2015) realizaram ensaios de estabilidade estática em quadriciclos, em virtude do índice de mortalidades de pessoas que utilizam esses veículos. Segundo o estudo mais recente, ocorrido na Austrália, entre 2001 e 2012, mais de 170 casos fatais envolveram quadriciclos e, aproximadamente, 60% das mortes estavam relacionadas ao tombamento e mais de 89% dos tombamentos ocorreram em áreas rurais.

Whitehead et al. (2004) investigaram o efeito da altura e distância do centro de gravidade, no tombamento de veículo de passageiros, demonstrando o modelo computacional desenvolvido, a partir da correlação entre simulações e resultados experimentais. O tombamento (ou capotamento) resulta da perda da estabilidade do trator a qual está relacionada à distância entre eixos e à bitola utilizada (MONTEIRO; ARBEX, 2012).

O tombamento ocorre, quando um trator se inclina para o lado ou para trás até tombar, potencialmente capaz de esmagar o operador. Tombamentos acontecem com mais frequência, durante uma curva acentuada em alta velocidade em terrenos inclinados, embora os dados mostrem que também ocorrem em terreno plano, após bater em obstáculos ou mediante o uso inadequado do engate e implementos.

Os tombamentos são a principal causa de morte nas operações agrícolas, apresentando mais da metade de todas as mortes relacionadas ao trator (ABUBAKAR; AHMAD; AKANDE, 2010).

Li (2016) aponta o tombamento como o principal fator das mortes envolvendo tratores agrícolas; logo, há um grande interesse em investigar a estabilidade lateral do trator.

Uma forma de avisar o operador sobre o início do tombamento consiste em perceber o momento em que o pneu perde o contato com o solo; entretanto, ainda não se tem certeza sobre a influência de certos fatores dinâmicos, no início do tombamento do trator. O resultado desse trabalho foi publicado em (LI et al., 2016).

Segundo Oliveira et al. (2013), é de grande importância o conhecimento do limite da estabilidade lateral de tratores, na segurança das operações agrícolas, para evitar acidentes fatais. O estabelecimento das declividades-limite dos terrenos, para uso de máquinas agrícolas, dá-se em função da análise do equilíbrio estático transversal de tratores agrícolas. Buscando desenvolver estruturas de proteção contra tombamento mais modernas, Liu e Ayers (1998) desenvolveram um sistema de detecção da iminência de tombamento que possibilitasse um rápido desdobramento de estruturas protetoras.

A pesquisa sobre a estabilidade e a dinâmica de tratores pode ser experimental, por simulação de computador ou por simulação de computador e experimentação. Os parâmetros utilizados em simulações podem ser estáticos,

quase-estático ou dinâmico. Sob condições estáticas, o tombamento inicia-se, quando a componente normal das forças as quais atuam no trator torna-se nula (AHMADI, 2011).

Li et al. (2015) utilizaram o modelo quase-estático na compreensão da derrapagem e do tombamento. Para um trator, andando em terreno inclinado, o tombamento transversal tem sido frequentemente discutido por meio de modelos matemáticos. Enquanto os modelos estáticos existentes contribuem à compreensão do mecanismo do tombamento, poucos deles têm considerado a estabilidade da perspectiva de derrapagem do trator. Os resultados apresentados no estudo forneceram uma forma relativamente abrangente, para entender estabilidade estática, envolvendo derrapagem e tombamento.

O trabalho de Barros (2012) apresentou um modelo matemático de tração de um trator agrícola, validando o modelo, a partir de ensaios controlados que dependem de vários parâmetros, medições de giro das rodas, velocidade de deslocamento linear do trator e da inclinação da pista. A velocidade de giro das rodas e do motor foi realizada, utilizando-se sensores indutivos e rodas dentadas que, a partir da contagem dos pulsos, mede a rotação dos pneus da mesma forma que um encoder. A velocidade linear do trator foi realizada por um sensor radar.

Alguns dos parâmetros calculados dependem diretamente da inclinação da pista, logo o experimento foi realizado em pistas com inclinação constante.

Lima et al. (2004) objetivaram estimar as estabilidades longitudinal e transversal, nas condições dinâmicas de tráfego, baseando-se na estabilidade estática e nas coordenadas do centro de gravidade (CG) de dois tratores. Como resultado, cada tipo de máquina tem sua recomendação para trabalhar em terrenos com inclinações máximas diferentes.

Pereira et al. (2011) avaliaram a estabilidade lateral de tratores, no preparo do solo para plantações florestais e, a partir da determinação do centro

de gravidade dos tratores, determinou-se o ângulo máximo de segurança para a circulação de tratores agrícolas em áreas com declives.

Gravalos et al. (2011) realizaram ensaios experimentais para verificar o efeito do comprimento do eixo traseiro e peso adicional colocado sobre as rodas na estabilidade transversal de um trator na condução em inclinações laterais.

Khoury Junior et al. (2009) realizaram simulações computacionais, para analisar o comportamento dinâmico de um trator agrícola 4x2, trabalhando em condições diferentes de terreno e de operação. Analisando os resultados, observou-se que a altura do centro de gravidade e a bitola foram os fatores de maior influência

na estabilidade lateral, ao passo que os fatores que mais influenciaram a estabilidade longitudinal (tombamento para trás) são a distância entre eixos e a distância longitudinal do centro de gravidade.

Ahmadi (2013) desenvolveu um modelo dinâmico para estudar os efeitos de diferentes geometrias e especificações da massa de um trator, operando em terrenos irregulares inclinados sobre a estabilidade transversal da máquina. Em sua análise, recomenda que a melhor estratégia, para estabilizar um trator contra o tombamento lateral, é reduzir o centro de gravidade do trator e aumentar a largura do seu eixo, simultaneamente.

A análise realizada por Santos Neto (2012) revela que a deficiência direcional de equipamentos agrícolas autopropelidos restringe o seu uso em terrenos com declividade superior a 12%, para que haja um manejo adequado. Dentre as conclusões desse estudo, os veículos que trafegam em terrenos declivosos devem esterçar suas rodas para corrigir a deriva causada por forças transversais que deformam os pneus. Leite, Santos e Lanças (2010) desenvolveram um inclinômetro analógico para a detecção da inclinação transversal do trator agrícola. Atualmente, inclinômetros automotivos podem ser facilmente adquiridos em sites da internet por preços acessíveis.

Khoury Junior (2000) desenvolveu um modelo matemático, para a previsão da perda da estabilidade de tratores agrícolas, utilizando características geométricas e ponderais do trator e de sua condição numa pista de ensaio. Dessa forma, neste estudo realizaram-se análises de balanço de forças e de momentos para determinar as equações que regem o comportamento estático e dinâmico do trator em superfície inclinada, comparando-se entre os valores dos ângulos-limite de tombamento por simulação e por experimentação, chegando-se à conclusão de que o modelo matemático desenvolvido é capaz de prever a perda da estabilidade de trator 4x2 satisfatoriamente.

Yisa, Terao e Kubota (1995) estudaram a estabilidade direcional de combinações trator-implemento operado em terrenos agrícolas inclinados por simulação computacional, com o objetivo de explicar o fenômeno do deslizamento lateral e o efeito da distribuição de transferência de carga em tratores agrícolas operados em declive. Dessa forma, desenvolveu-se um modelo matemático e realizou-se simulação computacional.

Demsar, Bernik e Duhovnik (2012) apresentaram um modelo matemático de simulação numérica da estabilidade estática do trator com eixo dianteiro articulado. Expuseram, ainda, uma análise das mudanças de alguns parâmetros, como posição do centro de gravidade, distância entre eixos, bitola dos eixos e altura do mancal para verificação do impacto na estabilidade do trator. Nesse estudo, demonstrou-se que as mudanças desses parâmetros podem alterar, de forma significativa, a estabilidade do trator.

Tratores de altura elevada, quando são operados em terrenos acidentados, apresentam alto risco de tombamento. Sun et al. (2016) utilizam sensores inerciais em um protótipo, realizando experimentos que identifiquem os efeitos da velocidade, ângulo de inclinação e velocidades de rotação na estabilidade do trator. Nos experimentos, constatou-se que a velocidade do trator

e o ângulo de direção são os dois parâmetros mais críticos de influência da estabilidade do trator com centro de gravidade elevado.

Reis (2009) e Schlosser et al. (2002) relatam que o uso de Estruturas de Proteção ao Capotamento (EPC) em conjunto com o cinto de segurança podem evitar acidentes graves, como o esmagamento do operador do trator.

O EPC tem sido o dispositivo mais eficaz na prevenção de fatalidades com tombamento de tratores; todavia a mais eficiente forma de evitar essas fatalidades é prever o tombamento antes que ocorra (KISE; ZHANG, 2006).

Spiandorello et al. (2015) utilizam um sistema microcontrolado dotado de acelerômetro que alerta com sinal luminoso e sonoro sobre a inclinação do trator agrícola. Nesse sistema, determina-se a declividade operacional limite do veículo, variável dinâmica (cita especificamente a aceleração do veículo) e a inclinação do veículo. Entretanto não empregam sensores para determinar a inclinação em momento futuro.

Bordini (2012) apresenta um método de balanceamento longitudinal, por meio de um atuador hidráulico acionado por um sensor (não informado), para detectar tensões que afetam a atitude longitudinal do veículo agrícola.

Friend (2014) descreve um sistema de determinação da inclinação, utilizando o Filtro de Kalman que mantém a precisão sob vibrações, usando acelerômetro, inclinômetro e um controlador.

Soriano Azorin (2009) descreve um mecanismo antitombamento adaptado para tratores agrícolas. Ao detectar o tombamento, aciona-se um barramento (que se encontra inicialmente na horizontal), para que ele fique na vertical, impedindo o tombamento.

Abu-Hamdeh e Al-Jalil (2004) desenvolveram um modelo computacional do efeito mecânico no sistema trator-carreta, movendo-se em aclive e em declive, melhorando a previsão do efeito de diferentes parâmetros na estabilidade e no controle da combinação trator-carreta em terrenos inclinados.



O campo visual do trator é fundamental para garantir uma direção segura; o escapamento, filtro e cabina não devem obstruir a visão das rodas dianteiras (SILVEIRA, 1988). Na Figura 2.1 mostra-se como é o campo visual de um trator, no qual uma pessoa quase desaparece na frente do pneu dianteiro; um obstáculo, portanto, pode não ser visto pelo operador, possibilitando o tombamento do trator.

A estereovisão tem sido uma das principais ferramentas de mapeamento do terreno ou região navegável para veículos e tratores autônomos. O trabalho de Kise, Zhang e Más (2004), que visa à substituição do operador por um sistema autônomo, utiliza a estereovisão para identificar a via entre as linhas de cultivo. Em outro artigo, Kise e Zhang (2006) empregam os mesmos elementos da estereovisão para criar um mapa virtual do terreno, utilizando um trator virtual, para percorrer o terreno digitalizado e verificar a possibilidade de tombamento lateral.

Figura 2.1 – Campo visual do trator.



Fonte: Do autor (2017).

A análise estéreo utiliza duas ou mais imagens para estimar a distância de pontos em uma cena. O conceito básico é a triangulação: um ponto da cena e os dois pontos da câmara formam um triângulo. Percebendo-se a linha de base entre as duas câmaras e o ângulo formado pelos raios das câmaras, a distância do objeto pode ser então determinada. Obstáculos negativos (valas e falésias) são difíceis de detectar, porque o sensor pode não ver o fundo do obstáculo, por seu alcance. Isso é especialmente verdadeiro para os sensores instalados numa posição insuficientemente alta e que estejam rastreando grandes distâncias. Obstáculos negativos podem ser inferidos, quando houver uma lacuna no plano do solo. Terrenos acidentados apresentam dois desafios. Em primeiro lugar, não há solo plano, de forma a dificultar dirigibilidade. Em segundo lugar, a vegetação pode ser confundida como um obstáculo (SICILIANO; KHATIB, 2008).

Reina e Milella (2012) realizaram experimentos com um trator agrícola autônomo dotado de GPS, câmera trinocular, LASER 3D, câmera estéreo e termo câmera. Neste trabalho, foram utilizados algoritmos para realizar mapeamento do terreno, a partir de dados estatísticos, para verificar a região navegável do terreno.

A Figura 2.2 mostra o trator autônomo da CASE IH, exibido na Agrishow, em Ribeirão Preto, 2017. Este ainda se encontra na fase de testes, com projeção comercial para os próximos anos. Neste protótipo, pode-se ver o Velodyne e câmera, para o reconhecimento de obstáculos. O trator autônomo é uma possível solução, para evitar mortes por tombamento, uma vez que a viabilidade econômica desses veículos seja alcançada.

Figura 2.2 – Trator autônomo da CASE IH.



Fonte: Do autor (2017).

A publicação de Lleras et al. (2017) apresenta os resultados de estudo, em um simulador de trator da Universidade Estadual da Pensilvânia, que estuda como tombamentos podem ser evitados. Dois conjuntos de experimentos são mostrados.

O primeiro revela que não houve diferença estatisticamente significativa entre operadores de tratores experientes e sem experiência, nem qualquer influência significativa do ângulo de inclinação na percepção do tombamento. O segundo consiste nas interfaces, para alertar o operador sobre perigo de tombamento, indicando que a interface de alerta mais eficaz, determinada pela velocidade e eficácia de reação do operador, foi a combinação do sistema auditivo usado com uma exibição visual.

### 2.3 Mecânica do chassi do trator

São diversos os fatores que indicam a complexidade do chassi do trator agrícola (BARGER et al., 1966).

O estudo das forças em equilíbrio que atuam sobre o chassi de um trator agrícola é essencial para a compreensão de determinados fenômenos que ocorrem durante sua utilização (MIALHE, 1980).

Segundo Liu e Ayers (1998), os fatores envolvidos na estabilidade do trator são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fatores que influenciam a estabilidade.

<b>Fatores estáticos</b>	<b>Fatores dinâmicos</b>
Posição angular (transversal e longitudinal)	Velocidade
Centro de gravidade	Velocidade angular longitudinal
Largura do eixo	Velocidade angular transversal
Distância entre eixos	Velocidade angular (curva)

Fonte: Liu e Ayers (1998).

Matematicamente, o equilíbrio de um corpo ocorre, quando o somatório das forças e o somatório dos momentos em relação a um ponto  $O$  qualquer são nulos, conforme a Equação 2.1 (HIBBELER, 2011).

$$\begin{aligned} F_R &= \sum F = 0 \\ (M_R)_O &= 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Em condições estáticas, a resultante de  $n$  forças que atuam nos eixos X, Y e Z são nulas, dadas pela Equação 2.2.

$$\sum_{p=1}^n (f_{x_p} \cdot \vec{i} + f_{y_p} \cdot \vec{j} + f_{z_p} \cdot \vec{k}) = 0 \quad (2.2)$$

A Equação 2.2, também, pode ser escrita da forma, vista pela Equação 2.3.

$$\begin{cases} \sum \vec{f}_x = 0 \\ \sum \vec{f}_y = 0 \\ \sum \vec{f}_z = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Segundo Fonseca (1969, p. 137), chama-se de momento “estático de uma força em relação a um ponto” ao produto de sua intensidade pela distância de um ponto ao ponto de seu suporte. Em equilíbrio, o somatório dos momentos são nulos (FONSECA, 1969). A Equação 2.4 mostra o produto vetorial entre o vetor força  $\vec{F}$  e o vetor distância  $\vec{d}$ .

$$\sum_{p=1}^n (\vec{F}_p \cdot \vec{d}_p) = 0 \quad (2.4)$$

Em que o vetor força é dado pela Equação 2.5.

$$\vec{F}_p = (f_{x_p} \cdot \vec{i} + f_{y_p} \cdot \vec{j} + f_{z_p} \cdot \vec{k}) \quad (2.5)$$

E o vetor distância é dado pela Equação 2.6.

$$\vec{d}_p = (D_{x_p} \cdot \vec{i} + D_{y_p} \cdot \vec{j} + D_{z_p} \cdot \vec{k}) \quad (2.6)$$

O produto vetorial pode ser escrito, em forma de determinante, mostrada na Equação 2.7,

$$\sum_{p=1}^n \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ f_{x_p} & f_{y_p} & f_{z_p} \\ D_{x_p} & D_{y_p} & D_{z_p} \end{vmatrix} = 0 \quad (2.7)$$

cujo desenvolvimento pode ser desmembrado em três equações, mostradas na Equação 2.8.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \vec{M}_x = 0 \\ \sum \vec{M}_y = 0 \\ \sum \vec{M}_z = 0 \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Dada a Figura 2.3, a declividade é definida pela Equação 2.9.

Figura 2.3 – Declividade.

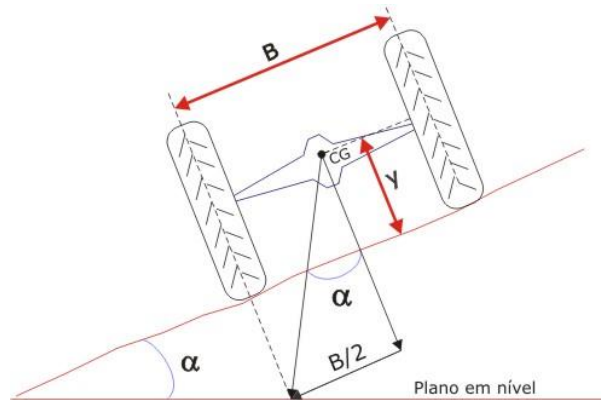


Fonte: Varella e Khoury Junior (2008).

$$D = \frac{z}{x} \cdot 100 \quad (2.9)$$

Analisando a Figura 2.4, em condições de equilíbrio estático transversal de tratores do tipo standard, a inclinação transversal máxima  $\alpha$  é dada pela Equação 2.10. Todavia, o modelo do chassi com apenas três pontos (triciclo) representa melhor o comportamento do chassi de um trator (BARGER et al., 1979; DEMSAR; BERNIK; DUHOVNIK, 2012; KHOURY JUNIOR, 2000; MIALHE, 1980). Nesse modelo, o tombamento lateral apresenta dois estágios.

Figura 2.4 – Determinação da declividade máxima.



Fonte: Varella e Khoury Junior (2008).

$$\alpha_{Max} = atan\left(\frac{B}{2 \cdot y}\right) \quad (2.10)$$

Sob o ponto de vista estático, no primeiro estágio, ao analisar a Figura 2.5, o movimento de giro ocorre em torno da linha  $P_2P_M$ , em que  $P_2$  é o ponto de contato da roda traseira com o solo e  $P_M$  é o mancal que liga o chassi ao eixo dianteiro. Nesse movimento de rotação, a massa do eixo dianteiro não participa do processo (KHOURY JUNIOR, 2000). Logo, a massa do trator envolvida é parcial (ver Equação 2.11), obtendo-se, dessa forma, o centro de gravidade parcial.

O primeiro estágio do tombamento lateral ocorre, quando a força Normal de reação do solo em um dos pneus é nula, ou seja, quando um dos pneus deixa de tocar o solo. Nesse momento, há um giro em torno da linha  $P_2P_M$  (Figura 2.5). O primeiro estágio de tombamento lateral encerra-se, quando o eixo dianteiro encosta no chassi. Nesse momento, inicia-se o segundo estágio do tombamento, quando o trator gira em torno da linha  $P_2P_4$  (Figura 2.5). A energia acumulada define se o trator tombará (KHOURY JUNIOR, 2000).

Sob o ponto de vista geométrico, a projeção do centro de gravidade deve estar internamente ligada às linhas  $P_2P_M$  e  $P_1P_M$  (Figura 2.5). Ao ultrapassar uma dessas linhas, ocorre o tombamento (MIALHE, 1980).

A massa total do trator é dada pela adição da massa parcial do trator à massa do eixo dianteiro, como visto na Equação 2.11.

$$m_t = m_p + m_{e_D} \quad (2.11)$$

A legenda da Equação 2.11 é vista na Tabela 2.2.



Tabela 2.2 – Legenda da equação 2.11.

Variável	Descrição
$m_t$	Massa total do trator
$m_p$	Massa parcial (massa total exceto a do eixo dianteiro)
$m_{eD}$	Massa do eixo dianteiro

Fonte: Do autor (2017).

No segundo estágio, ao analisar a Figura 2.5, o giro ocorre em torno da linha  $P_2P_4$  em que  $P_2$  é o ponto de contato do pneu traseiro com o solo e  $P_4$  é o ponto de contato entre o pneu dianteiro e o solo. Logo, a massa total do trator participa do segundo estágio (BARGER et al., 1979; KHOURY JUNIOR, 2000).

No modelo triciclo, em condições estáticas, a declividade-limite ( $D_{Lim}$ ) é dada pela Equação 2.12.

$$D_{Lim} = \frac{Y_P}{Z_P} \quad (2.12)$$

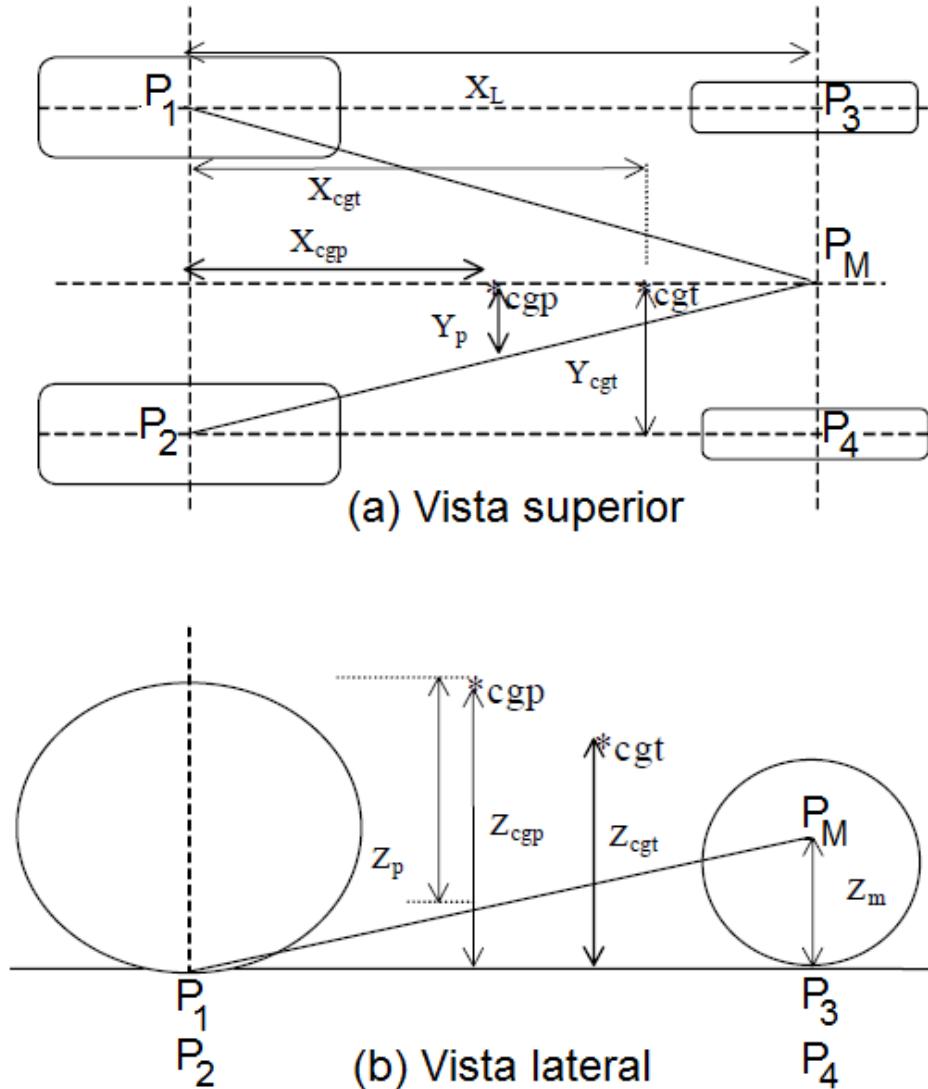
Na Equação 2.13 determina-se o parâmetro  $Y_P$ , visto na Figura 2.5(a).

$$Y_P = \frac{e_T \cdot (X_L - X_{cgp})}{2 \cdot X_L} \quad (2.13)$$

Na Equação 2.14, determina-se o parâmetro  $Z_P$ , visto na Figura 2.5(b).

$$Z_P = Z_{cgp} \cdot \frac{Z_M \cdot X_{cgp}}{X_L} \quad (2.14)$$

Figura 2.5 – Pontos de apoio de um trator agrícola.



Fonte: Khoury Junior (2000), com adaptações.

Na Tabela 2.3, descrevem-se os parâmetros destacados nas Equações 2.12, 2.13 e 2.14.

Demsar, Bernik e Duhovnik (2012) apresentaram, em seu trabalho, um modelo de análise estática, mostrado na Figura 2.6. Nesse modelo, a região de

estabilidade, em que o centro de gravidade deve situar-se, é mostrada na Figura 2.6(b).

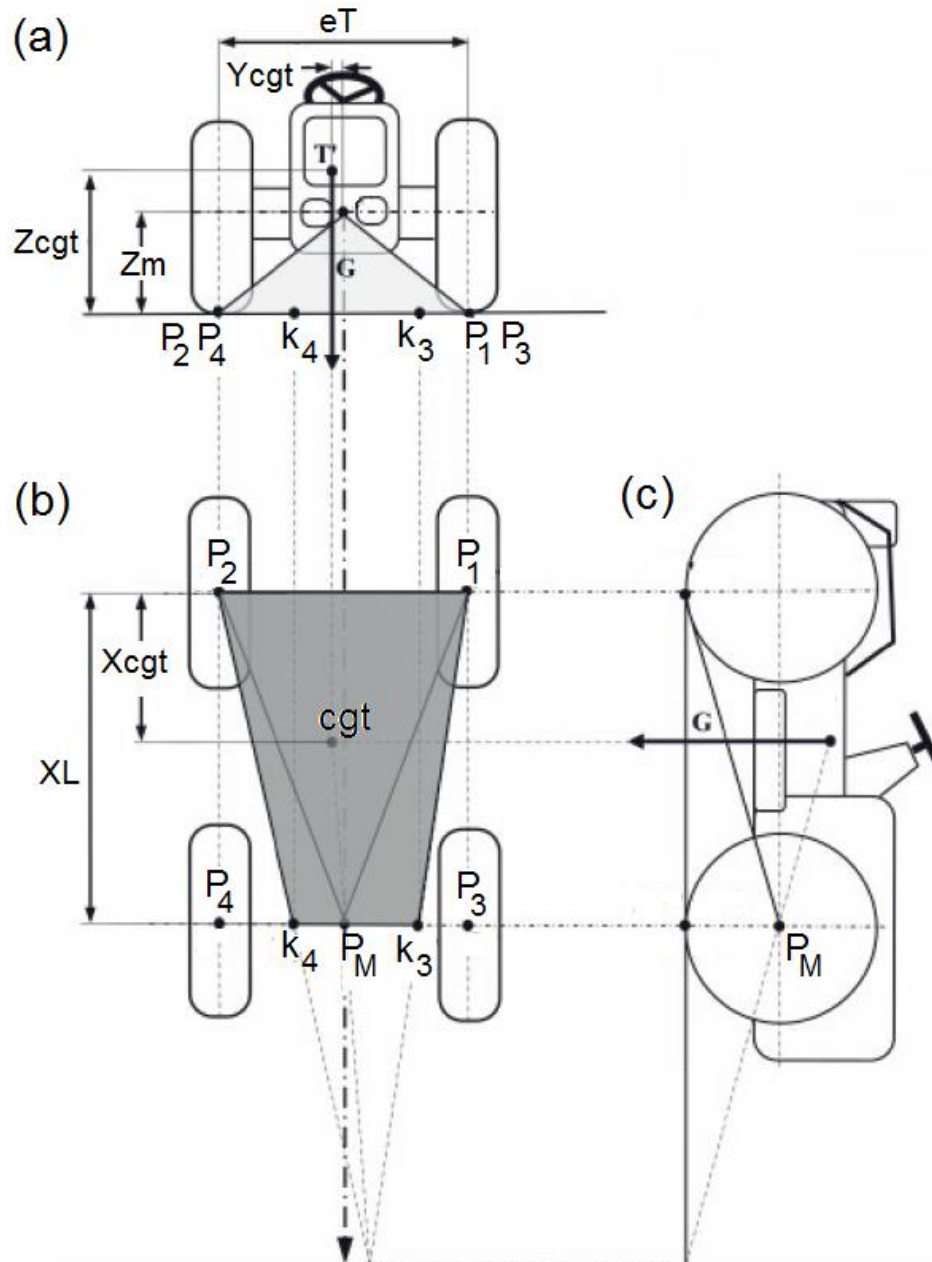
A Figura 2.7 mostra os ângulos  $\phi_{k1}$ ,  $\phi_{k2}$ ,  $\phi_{k3}$  e  $\phi_{k4}$ , definidos pela Equação 2.15, Equação 2.16, Equação 2.17 e Equação 2.18, respectivamente.

Tabela 2.3 – Legenda das equações 2.12, 2.13 e 2.14.

<b>Variável</b>	<b>Descrição</b>
$Y_p$	Distância transversal entre a linha $P_2P_M$ e o plano vertical do cgp
$Z_p$	Distância vertical entre a linha $P_2P_M$ e o plano horizontal do cgp
$e_T$	Bitola traseira do trator
$XL$	Distância entre eixos
$Z_M$	Altura do mancal no eixo frontal
$Z_{cgp}$	Distância vertical do plano de apoio ao cgp

Fonte: Khoury Junior (2000).

Figura 2.6 – Pontos de análise de Demsar, Bernik e Duhovnik (2012).



Fonte: Demsar, Bernik e Duhovnik (2012), com adaptações.

Os ângulos  $\phi_{k1}$  e  $\phi_{k2}$  relacionam-se aos ângulos-limite da estabilidade longitudinal em aclive.

$$\phi_{k1} = -atan\left(\frac{\frac{e_T}{2} + Y_{cgt}}{X_{cgt}}\right) \quad (2.15)$$

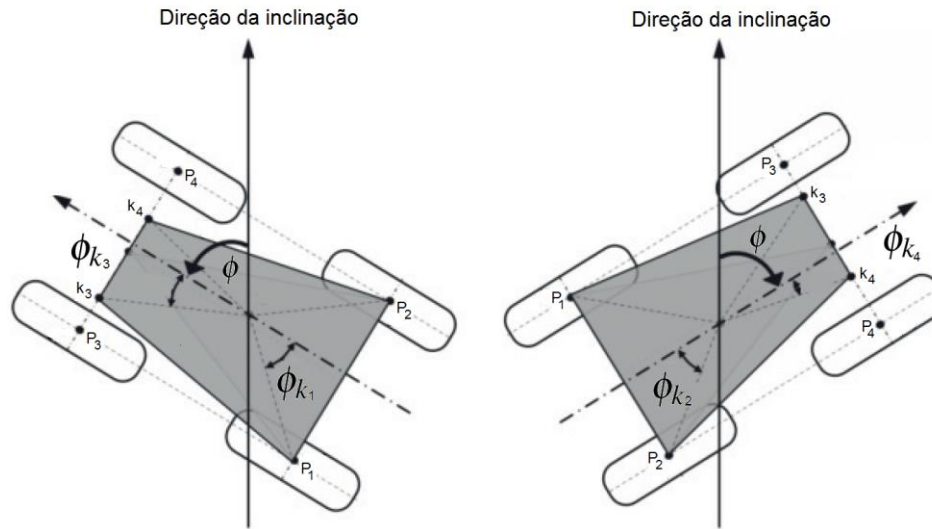
$$\phi_{k2} = atan\left(\frac{\frac{e_T}{2} - Y_{cgt}}{X_{cgt}}\right) \quad (2.16)$$

Os ângulos  $\phi_{k3}$  e  $\phi_{k4}$  relacionam-se aos ângulos-limite da estabilidade longitudinal em declive.

$$\phi_{k3} = atan\left(\frac{l_F \left(\frac{\frac{e_T + b_F}{2}}{X_L + l_F}\right) + b_F + Y_{cgt}}{X_L - X_{cgt}}\right) \quad (2.17)$$

$$\phi_{k4} = atan\left(\frac{l_F \left(\frac{\frac{e_T - b_F}{2}}{X_L + l_F}\right) + b_F - Y_{cgt}}{X_L - X_{cgt}}\right) \quad (2.18)$$

Figura 2.7 – Ângulos de análise de Demsar, Bernik e Duhovnik (2012).



Fonte: Demsar, Bernik e Duhovnik (2012), com adaptações.

Equações que determinam constantes, dadas pela Equação 2.19 e Equação 2.20.

$$l_F = Z_M \cdot \left( \frac{X_L - X_{cgt}}{Z_{cgt} - Z_M} \right) \quad (2.19)$$

$$b_F = \frac{Y_{cgt} \cdot Z_M}{Z_{cgt} - Z_M} \quad (2.20)$$

As equações que governam o ângulo de estabilidade estática longitudinal, em função do ATT (Ângulo de Trabalho do Trator -  $\phi$ ), são descritas na Equação 2.21 e na Equação 2.22.

A Equação 2.21 rege o ângulo da Inclinação Máxima do Plano (IMP), em função do Ângulo de Trabalho do Trator. O intervalo do ATT é compreendido entre  $-\phi_{k1}$  e  $\phi_{k2}$ .

$$\theta_{(-\phi_{k1} \leq \phi \leq \phi_{k2})} = \operatorname{atan} \left( \frac{X_{cgt}}{\frac{\cos(\phi)}{Z_{cgt}}} \right) \quad (2.21)$$

A Equação 2.22 governa o Ângulo da Inclinação Máxima do Plano, em função do Ângulo de Trabalho do Trator. Os limites do ATT encontram-se entre  $(\pi - \phi_{k3})$  e  $(\pi + \phi_{k4})$ .

$$\theta_{(\pi - \phi_{k3} \leq \phi \leq \pi + \phi_{k4})} = \operatorname{atan} \left( \frac{X_{cgt} - X_L}{\frac{\cos(\phi)}{Z_{cgt}}} \right) \quad (2.22)$$

As equações que governam o ângulo máximo de estabilidade estática transversal, em função do Ângulo de Trabalho do Trator  $\phi$ , são descritas na Equação 2.23 e na Equação 2.24.

$$\theta_{(\phi_{k2} \leq \phi \leq \pi - \phi_{k4})} = \operatorname{atan} \left( \frac{X_{cgt} \cdot \cos \left( \phi_{k2} + \operatorname{atan} \left( \frac{X_L + l_F}{\frac{e_T}{2} + b_F} \right) \right)}{Z_{cgt} \cdot \cos(\phi_{k2}) \cdot \cos \left( \phi + \operatorname{atan} \left( \frac{X_L + l_F}{\frac{e_T}{2} + b_F} \right) \right)} \right) \quad (2.23)$$

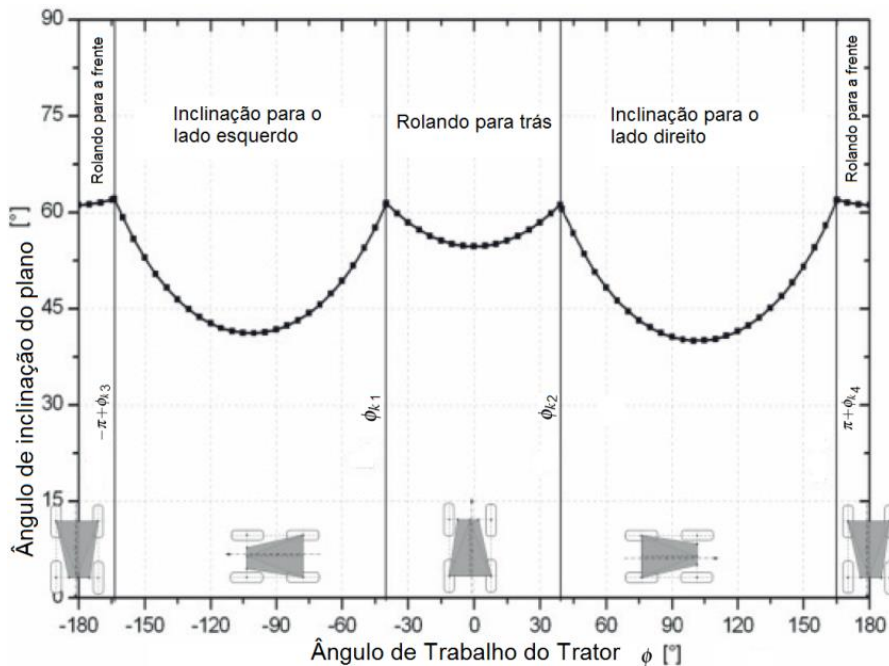
$$\begin{aligned} \theta_{(-\pi + \phi_{k3} \leq \phi \leq -\phi_{k1})} \\ = \operatorname{atan} \left( \frac{X_{cgt} \cdot \cos \left( \phi_{k1} + \operatorname{atan} \left( \frac{X_L + l_F}{\frac{e_T}{2} - b_F} \right) \right)}{Z_{cgt} \cdot \cos(\phi_{k1}) \cdot \cos \left( \phi - \operatorname{atan} \left( \frac{X_L + l_F}{\frac{e_T}{2} - b_F} \right) \right)} \right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

A Equação 2.23 rege o ângulo da Inclinação Máxima do Plano, em função do Ângulo de Trabalho do Trator. O ATT encontra-se entre  $(\phi_{k2})$  e  $(\pi - \phi_{k4})$ .

A Equação 2.24 rege o ângulo da inclinação máxima do plano em função do ângulo de trabalho do trator. A região do ATT, válida para essa equação, encontra-se entre  $(-\pi + \phi_{k3})$  e  $(-\phi_{k1})$ .

A partir das equações descritas da Equação 2.16 à Equação 2.24, pode-se determinar a Inclinação Máxima do Plano  $\theta_{Max}$  em função do Ângulo de Trabalho do Trator ( $\phi$ ), visto na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Inclinação máxima do plano em função do ATT.



Fonte: Demsar, Bernik e Duhovnik (2012), com adaptações.

A Inclinação Máxima do Plano capaz de manter a estabilidade estática do trator varia, conforme o Ângulo de Trabalho do Trator (DEMSAR; BERNIK;



DUHOVNIK, 2012). A Figura 2.8 apresenta resultados de uma simulação da estabilidade estática de um trator. No eixo  $X$ , tem-se o ATT; no eixo  $Y$ , tem-se a IMP. Para outros veículos, é importante conhecer o efeito das forças que atuam nos pneus e na suspensão. Minakawa et al. (1999) descreveram um método, por meio do qual a força transmitida, a partir da superfície da estrada para o pneu, é determinada corrigindo a força de transmissão em uma suspensão. Nam, Fujimoto e Hori (2012) apresentam um método para usar sensores laterais de força de pneus, estimar o ângulo de deslocamento lateral do veículo e melhorar a estabilidade de veículos.

## 2.4 Filtros digitais

A aquisição de sinais oriundos de sensores requer a utilização de filtros. Sinais analógicos requerem filtros analógicos, como filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa ou rejeita-faixa (RAZAVI, 2014). No entanto os sensores utilizados fornecem sinais digitais. Sun et al. (2016) apontam o ruído dos sensores inerciais como um problema em seus experimentos e sugere a inserção de filtros digitais na continuidade de seus trabalhos. A aplicação de filtros torna-se necessária diante de um sinal com ruído. Existe uma infinidade de filtros aplicados a diferentes tipos de ruídos ou interferências. Na literatura revisada, os sinais do referido dispositivo, normalmente, são filtrados por *filtro de Kalman*. Além desse filtro, experimentaram outros mais simples, como *Média móvel*, *Média* e *Passa-Baixa*, cujos resultados são mostrados no Capítulo 4.

### 2.4.1 Média

Este algoritmo estabiliza oscilações aleatórias, mas não é adequado quando a variável varia ao longo do tempo (KIM, 2010). A equação da média é vista na Equação 2.25.

$$\bar{x}_n = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (2.25)$$

Multiplicando-se os dois lados por  $n$  e dividindo-se por  $(n - 1)$ , tem-se a Equação 2.26.

$$\left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot \bar{x}_n = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_{n-1}}{n-1} + \frac{x_n}{n-1} \quad (2.26)$$

A média do termo  $(n - 1)$  é dada pela Equação 2.27.

$$\bar{x}_{n-1} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_{n-1}}{n-1} \quad (2.27)$$

Substituindo-se e multiplicando por  $(n - 1)$  e dividindo-se por  $n$ , tem-se a Equação 2.28.

$$\bar{x}_n = \frac{n-1}{n} \cdot \bar{x}_{n-1} + \frac{x_n}{n} \quad (2.28)$$

A eq. 2.28 pode ser reescrita na forma da Equação 2.29.

$$\begin{cases} \alpha = \frac{n-1}{n} \\ \bar{x}_n = \alpha \cdot \bar{x}_{n-1} + (1-\alpha) \cdot x_n \end{cases} \quad (2.29)$$

Na Equação 2.29, nota-se que os novos valores recebidos são cada vez menos significativos do que os anteriores, em virtude do coeficiente  $\alpha$ .

### 2.4.2 Média móvel

Objetiva-se com este filtro calcular a enésima média dos últimos  $k$  dados recebidos. Para isso, a cada nova leitura, exclui-se o dado da leitura mais antiga. A equação desse filtro é dada pela Equação 2.30.

$$\bar{x}_n = \bar{x}_{n-1} + \frac{x_n - x_{n-k}}{k} \quad (2.30)$$

Esse filtro é menos imune ao ruído do que o filtro *Média*, mas apresenta melhor resposta diante de uma mudança brusca do valor da variável medida. Quanto maior é o valor de  $k$  maior é a imunidade ao ruído; entretanto menor é a resposta à variação do sinal.

### 2.4.3 Filtro Passa-Baixa

O algoritmo do filtro passa-baixa é dado pela Equação 2.31.

$$\bar{x}_n = \alpha \cdot \bar{x}_{n-1} + (1 - \alpha) \cdot x_n \quad (2.31)$$

Em que  $0 < \alpha < 1$ . Quanto maior o valor de  $\alpha$  maior o efeito de suavização (MONK, 2015).

No caso do FPB (Filtro Passa-Baixa), os dados mais antigos possuem uma ponderação menos significativa do que o dado mais recente. Esse filtro apresenta uma melhor performance à imunidade de ruído e melhor resposta à variação do sinal do que o *Média Móvel* (KIM, 2010).

### 2.4.4 Filtro de Kalman

O filtro de Kalman (*KF - Kalman Filter*) é um algoritmo computacional, para estimativa com alguma sofisticada formulação com múltiplos passos, mostrados nas equações a seguir (KIM, 2010).

Etapa 0: Definição de valores iniciais, Equação 2.32.

$$\widehat{x}_0, P_0 \quad (2.32)$$

Etapa 1: Predição e erro de covariância, Equação 2.33 e Equação 2.34.

$$\widehat{x}_k = A \cdot \widehat{x}_{k-1} \quad (2.33)$$

$$P_k^- = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q \quad (2.34)$$

Etapa 2: Cálculo do ganho de Kalman, Equação 2.35.

$$K_k = P_k^- \cdot H^T \cdot (H \cdot P_k^- \cdot H^T + R)^{-1} \quad (2.35)$$

Etapa 3: Aquisição do sinal  $z_k$ , cálculo da estimativa, Equação 2.36.

$$K_k = P_k^- \cdot (H \cdot P_k^- \cdot H^T + R)^{-1} \quad (2.36)$$

Etapa 4: Cálculo do erro de covariância, Equação 2.37.

$$\widehat{x}_k = \widehat{x}_k^- + K_k \cdot H \cdot P_k^- \quad (2.37)$$

Após a Equação 2.37, o processo volta à Etapa 1 (Equação 2.33).

Na Tabela 2.4, descrevem-se as variáveis apresentadas nos passos de cálculo do KF.

Tabela 2.4 – Variáveis dos passos do KF.

<b>Parâmetro</b>	<b>Variável</b>
Entrada externa	$Z_k$
Saída final	$\hat{x}_k$
Modelo do sistema	$A, H, Q, R$
Cálculos internos	$\hat{x}_k^-, P_k^-, P_k, K_k$

Fonte: Kim (2010).

Utilizando o filtro de Kalman, o tempo de atraso é virtualmente nulo, o que não ocorre com os filtros que utilizam média. Os objetivos de remoção de ruído e de redução da sensibilidade às variações são alcançados simultaneamente (KIM, 2010).

As matrizes  $A$  e  $H$  são construídas observando o modelo do fenômeno físico observado.

Já as matrizes  $Q$  e  $R$  são erros de covariância. A primeira representa a matriz de transição de estado, ao passo que a segunda representa a matriz de covariância do ruído da medição. Por serem matrizes difíceis de serem obtidas analiticamente, podem ser obtidas por tentativa e erro (KIM, 2010).



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, é apresentado o tratamento matemático desenvolvido na determinação da inclinação transversal e longitudinal do trator, bem como os materiais utilizados nos experimentos.

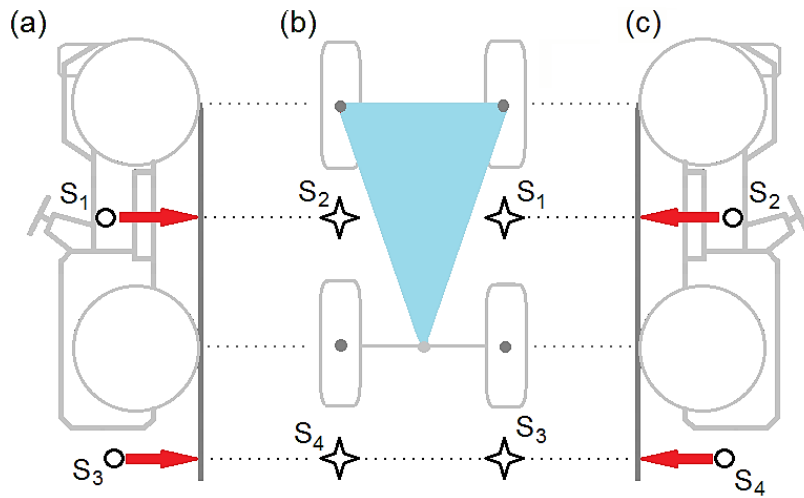
Na metodologia, o procedimento experimental é descrito primeiramente para mostrar o posicionamento dos pontos de medição e as grandezas físicas envolvidas. Em seguida, são mostradas as equações de predição utilizando os dados de medição. Logo depois são mostrados como identificar a estabilidade estática do trator, por meio de matrizes de rotação e de transformação do sistema de ângulos da inclinação do trator. Finalmente, são apresentados hardware e software do sistema eletrônico de predição das inclinações.

#### 3.1 Sistema de predição

O procedimento que permite a predição das inclinações é composto por três etapas: ajuste de zero, medição e cálculo da predição, as quais são descritas nos itens 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3. A Figura 3.1 mostra o posicionamento dos medidores de distância. Em (a) são mostradas a vista lateral esquerda do trator e a região de alcance dos sensores  $S_1$  e  $S_3$  ao solo. Em (b) é mostrada a vista superior do trator, com os sensores  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$  à frente dos pneus. Em (c) são mostradas a vista lateral direita do trator e a região de alcance dos sensores  $S_2$  e  $S_4$  ao solo.

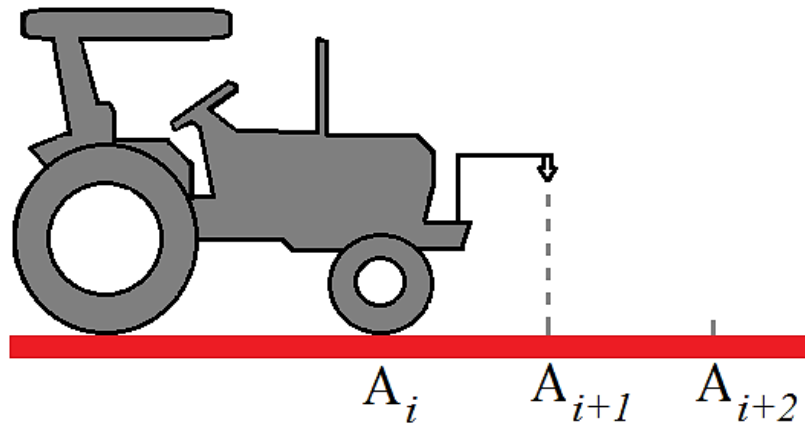
Na Figura 3.2 verifica-se a sequência de medições. Inicia-se o procedimento de medição com o pneu dianteiro no ponto  $A_i$ , possibilitando a predição no ponto  $A_{i+1}$ . Quando o pneu dianteiro estiver no ponto  $A_{i+1}$ , permite-se a predição no ponto  $A_{i+2}$ .

Figura 3.1 – Posicionamento dos sensores



Fonte: Do autor (2017).

Figura 3.2 – Procedimento dos ensaios.



Fonte: Do autor (2017).

### 3.1.1 Ajuste de Zero

De forma a dinamizar a aplicação do sistema eletrônico, em qualquer trator ou maquete, foi necessária a implementação do ajuste de zero ( $A_{jz}$ ), que



consiste em identificar a altura dos sensores e as inclinações transversal e longitudinal do trator em relação ao plano horizontal. Para isso, o veículo deve estar parado, desligado, em um local plano.

O ajuste de zero dos sensores ultrassônicos consiste em verificar a altura de cada sensor em relação ao solo, que deve ser plano e horizontal, ao passo que cada sensor deve estar direcionado, ortogonalmente, em direção ao solo. O vetor de calibração é dado pela Equação 3.1.

$$[\rho_{Ajz}] = [\rho_{1Ajz} \quad \rho_{2Ajz} \quad \rho_{3Ajz} \quad \rho_{4Ajz} \quad \rho_{5Ajz}] \quad (3.1)$$

O ajuste de zero dos sensores de inclinação consiste em estabelecer o valor de  $0^\circ$ . Esse ajuste é necessário, pois o sensor pode ser colocado em local não horizontal, pela sua instalação no veículo, desde que haja os sensores de inclinação e estejam alinhados aos eixos transversal e longitudinal do veículo. Dessa forma, o ângulo transversal e longitudinal são levados a zero, após o ajuste, como também ocorre nos sensores ultrassônicos. O ângulo de ajuste de zero da inclinação transversal é dado por  $\alpha_{Ajz}$ , o ângulo de ajuste de zero da inclinação longitudinal é dado por  $\beta_{Ajz}$ . Após o ajuste de zero, iniciam-se as etapas da medição e do cálculo da predição.

### 3.1.2 Medição

O vetor de medição de distâncias ( $\rho_M$ ) é mostrado na Equação 3.2, em que  $\rho_{1M}$  a  $\rho_{4M}$  são os dados brutos (sem ajuste de zero) dos sensores  $S_1$  a  $S_4$ , colocados à frente dos pneus (pontos  $P_1$  a  $P_4$ , respectivamente). Complementando,  $\rho_{5M}$  é o dado bruto do sensor  $S_5$ , que mede a distância entre o referido sensor e o eixo dianteiro.

$$[\rho_{Ajz}] = [\rho_{1Ajz} \quad \rho_{2Ajz} \quad \rho_{3Ajz} \quad \rho_{4Ajz} \quad \rho_{5Ajz}] \quad (3.2)$$

A Equação 3.3 mostra os dados após o ajuste de zero dos dados brutos.

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{1AjZ} \\ \rho_{2AjZ} \\ \rho_{3AjZ} \\ \rho_{4AjZ} \\ \rho_{5AjZ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho_{1M} \\ \rho_{2M} \\ \rho_{3M} \\ \rho_{4M} \\ \rho_{5M} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

O dado bruto da inclinação transversal é dado por  $\alpha_M$ , ao passo que o dado bruto da inclinação longitudinal corresponde a  $\beta_M$ .

O vetor de dados da inclinação é mostrado na Equação 3.4, em que  $\alpha$  é a inclinação transversal e  $\beta$  é a inclinação longitudinal do veículo.

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_M \\ \beta_M \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha_{AjZ} \\ \beta_{AjZ} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Ressalta-se a diferença na subtração realizada nas equações 3.3 e 3.4. A primeira subtrai do ajuste de zero o valor medido; a segunda subtrai o valor medido do ajuste de zero. Dessa forma, o valor nulo de  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  ou  $\rho_4$  significa que não há obstáculo; valor positivo significa que o obstáculo pode ser uma pedra, degrau, outros; por outro lado, valor negativo significa vala, ou buraco.

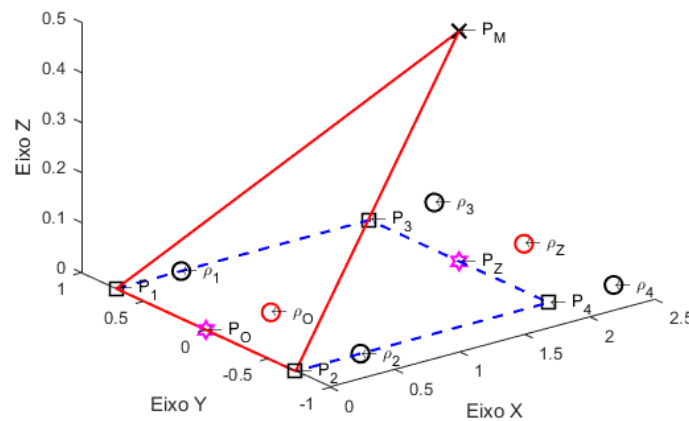
Para  $\rho_5$ , valor nulo significa ângulo nulo entre chassi e eixo dianteiro; valor negativo significa que o eixo dianteiro inclina-se no sentido contrário ao da Figura 3.4; por outro lado, valor positivo significa um giro no sentido apontado pela Figura 3.4. Para  $\alpha$  nulo, a inclinação transversal é zero; valor positivo significa uma inclinação em sentido horário; valor negativo significa inclinação em sentido anti-horário. Para  $\beta$  nulo, a inclinação longitudinal é zero; valor positivo significa declive, valor negativo significa aclave.

Após medir as alturas dos obstáculos e as inclinações transversal e longitudinal atuais, inicia-se o processo de predição.

### 3.1.3 Equações de predição da inclinação

A Figura 3.3 apresenta alguns dos principais pontos de análise da predição da inclinação de um trator agrícola. O ponto  $P_M$  corresponde ao mancal,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$  correspondem aos pontos de contato dos pneus ao plano do solo, com  $P_4$  sobre o ponto  $A_i$  da Figura 3.2;  $P_O$  corresponde ao ponto médio da linha,  $P_1P_2$  e  $P_Z$  correspondem ao ponto médio da linha  $P_3P_4$ . Os dados de medição  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  e  $\rho_4$  correspondem aos pontos de contato dos pneus ao plano do solo, quando o eixo dianteiro do trator atingir o ponto  $A_{i+1}$  da Figura 3.2;  $\rho_O$  corresponde ao ponto médio da linha  $\rho_1\rho_2$  e  $\rho_Z$  corresponde ao ponto médio da linha  $\rho_3\rho_4$ .

Figura 3.3 – Pontos de análise do trator



Fonte: Do autor (2017).

A inclinação transversal do chassi ( $\alpha$ ) é obtida pelo ângulo entre a linha  $P_1P_2$  e o plano horizontal. Os dados de  $\rho_1$  e  $\rho_2$  correspondem à altura dos obstáculos no ponto  $A_{i+1}$ , em que a predição da inclinação transversal é calculada pelo ângulo entre a linha  $\rho_1\rho_2$  e o plano  $P_1P_2P_Z$  adicionado ao  $\alpha$ .

Logo, a predição da inclinação transversal  $\alpha_{pred}$  é determinada pela Equação 3.5.

$$\alpha_{pred} = \text{atan}\left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{e_T}\right) + \alpha \quad (3.5)$$

A inclinação longitudinal  $\beta$  é determinada pela inclinação entre a linha  $P_0P_Z$  e o plano horizontal. A predição do ângulo da inclinação longitudinal  $\beta_{pred}$  é dada pelo ângulo entre a linha  $\rho_0\rho_Z$  e o plano  $P_1P_2P_Z$  adicionado ao ângulo  $\beta$ , mostrada na Equação 3.6.

$$\beta_{pred} = \text{atan}\left(\frac{\rho_0 - \rho_Z}{e_D}\right) + \beta \quad (3.6)$$

Na Tabela 3.1 apresentam-se as informações sobre as equações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8.

Tabela 3.1 – Legenda das equações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8.

Variável	Descrição
$\alpha_{pred}$	ângulo de predição da inclinação transversal
$\alpha$	ângulo transversal do chassi
$\beta_{pred}$	ângulo de inclinação longitudinal
$\beta$	ângulo longitudinal do chassi
$\rho_i$	altura dos obstáculos em relação ao plano $\rho_1\rho_2\rho_Z$
$\rho_0$	ponto médio da linha $\rho_1\rho_2$
$\rho_Z$	ponto médio da linha $\rho_3\rho_4$
$e_T$	comprimento do eixo dianteiro
XL	distância entre eixos

Fonte: Do autor (2017).

As variáveis mostradas na Equação 3.6 são mostradas na Equação 3.7 e Equação 3.8.

$$\rho_z = \frac{\rho_3 + \rho_4}{2} \quad (3.7)$$

$$\rho_0 = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad (3.8)$$

### 3.1.4 Equações de Predição do ângulo do eixo dianteiro

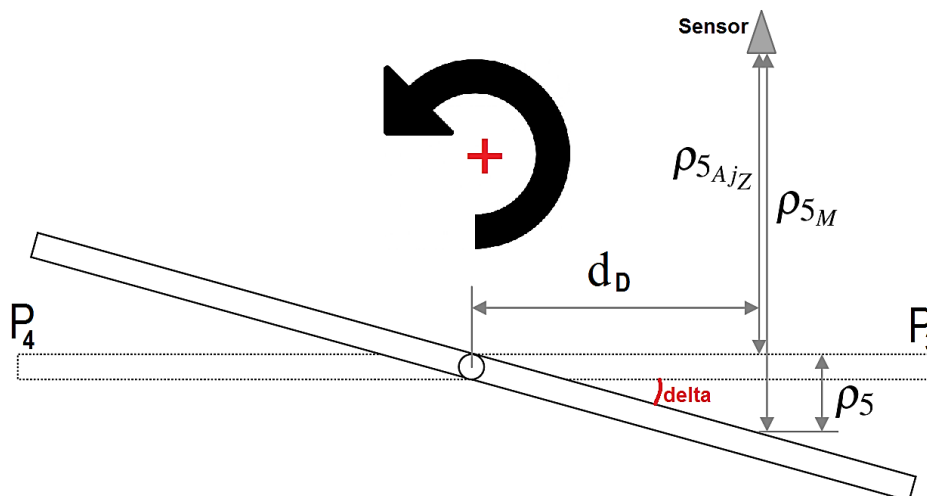
A determinação do ângulo do eixo dianteiro é realizada a partir da medição da distância do eixo ao sensor  $S_5$ . A Figura 3.4 mostra o ângulo entre o chassi e o eixo dianteiro, visto de frente ao trator. A equação que calcula o ângulo do eixo dianteiro atual, em relação ao chassi, é dada pela Equação 3.9.

$$\delta = \text{atan}\left(\frac{\rho_5}{d_D}\right) \quad (3.9)$$

A predição do ângulo do eixo dianteiro é dada pela Equação 3.10.

$$\delta_{pred} = \text{atan}\left(\frac{\rho_3 - \rho_4}{e_D}\right) - \text{atan}\left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{e_T}\right) \quad (3.10)$$

Figura 3.4 – Vista de frente para análise do ângulo do eixo dianteiro.



Fonte: Do autor (2017).

A rotação do eixo dianteiro é limitada em torno de um ângulo-limite, momento este em que o eixo dianteiro encosta no chassi. Em razão disso, o ângulo  $\delta_{pred}$  não pode ser maior do que o ângulo-limite do eixo dianteiro do trator ( $\xi$ ), que pode ser obtido experimentalmente. Essa relação é mostrada na Equação 3.11.

$$\delta_{pred} = \text{atan}\left(\frac{\rho_3 - \rho_4}{e_D}\right) - \text{atan}\left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{e_T}\right) \quad (3.10)$$

Os parâmetros das Equações 3.9, 3.10 e 3.11 são explicados na Tabela 3.2.

$$|\delta_{pred}| < \xi \quad (3.11)$$

Caso a condição da Equação 3.11 não seja atingida, ou seja,  $|\delta_{pred}| \geq \xi$ , um alerta será acionado, pois haverá o contato do eixo dianteiro ao chassi.

Tabela 3.2 – Legenda das equações 3.9, 3.10 e 3.11.

Variável	Descrição
$\delta$	ângulo do eixo dianteiro em relação ao chassi
$\delta_{\text{pred}}$	predição do ângulo dianteiro em relação ao chassi
$d_D$	distância horizontal entre o mancal e o sensor S <sub>5</sub>
$\xi$	ângulo-limite em que o eixo dianteiro encosta no chassi

Fonte: Do autor (2017).

### 3.2 Matrizes de rotação

Seja um vetor  $\vec{v}_A$ , como visto na Equação 3.12.

$$\vec{v}_A = (a_x \quad a_y \quad a_z) \quad (3.12)$$

Esse vetor pode ser rotacionado em torno do eixo X, Y ou Z. A matriz de rotação em torno do eixo X pode ser vista na Equação 3.13 (CRAIG, 2012).

$$[M_{\theta_x}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\text{sen}(\theta_x) \\ 0 & \text{sen}(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

A rotação em torno do eixo Y é obtida pela matriz vista na Equação 3.14.

$$[M_{\theta_y}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \text{sen}(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Ao rotacionar o vetor  $\vec{v}_A$ , a partir da Equação 3.15, obtém-se  $\vec{v}_{\text{rot}}$ .

$$[v_{\text{rot}}] = [M_{\theta_x}] \cdot [M_{\theta_y}] \cdot [v_A]^T \quad (3.15)$$

O sentido positivo dos ângulos de rotação pode ser visto na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Sentido dos ângulos de rotação.



Fonte: Do autor (2017).

A partir da Equação 3.15, podem ser rotacionados os pontos listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Pontos principais do trator utilizados para cálculo de rotação.

Ponto	Descrição
$P_1$	ponto de contato do pneu traseiro esquerdo com o solo
$P_2$	ponto de contato do pneu traseiro direito com o solo
$P_M$	mancal
cgp	centro de gravidade parcial
cgt	centro de gravidade total

Fonte: Do autor (2017).

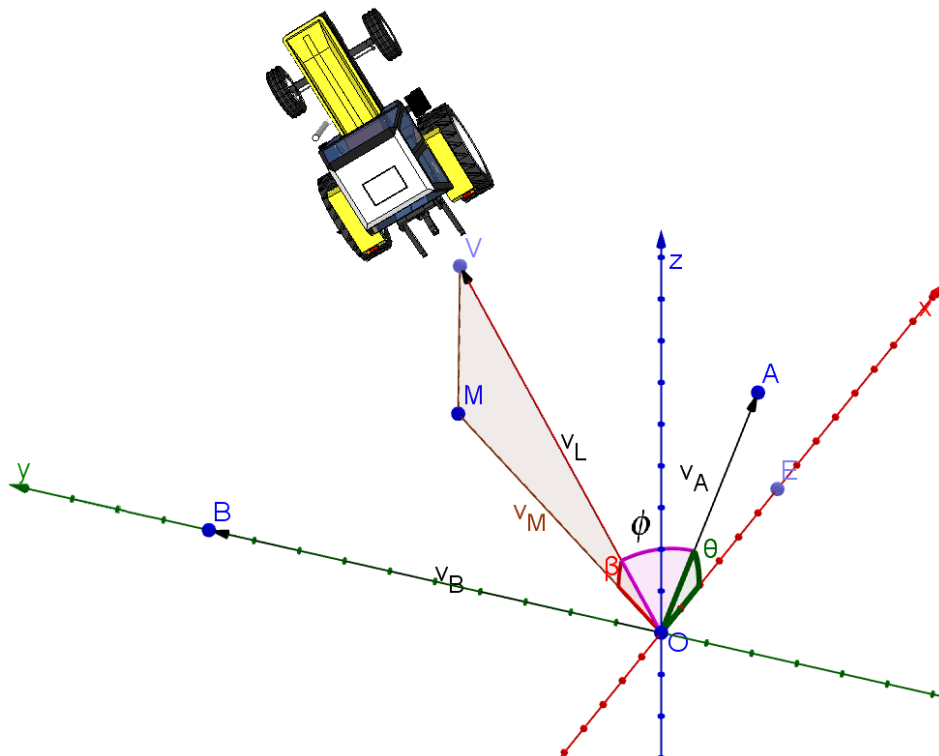
Utilizou-se o Matlab para verificar o algoritmo. Os resultados encontram-se no Capítulo 5.



### 3.3 Transformação do plano de inclinação

Demsar, Bernik e Duhovnik (2012) e Khoury Junior (2000) apresentam, em seus trabalhos, os dados do **ângulo de inclinação do plano - AIP** ( $\theta$ ) e do **ângulo de trabalho do trator - ATT** ( $\phi$ ), como visto na Figura 3.6. O AIP é o ângulo formado pelo plano do chassi e pelo plano horizontal (vetor  $\vec{v}_A$  da Figura 3.6). O ATT é o ângulo formado pelo eixo longitudinal do trator e o eixo do plano de inclinação (vetor  $\vec{v}_L$  da Figura 3.6). Todavia os sensores de inclinação fornecem os ângulos de inclinação longitudinal ( $\beta$ ) e transversal ( $\alpha$ ) do veículo, que são diferentes dos ângulos trabalhados pelos autores citados. Por essa razão, necessita-se de uma transformação direta e inversa dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  em  $\theta$  e  $\phi$ .

Figura 3.6 – Trator no sistema ( $\theta, \phi$ ).

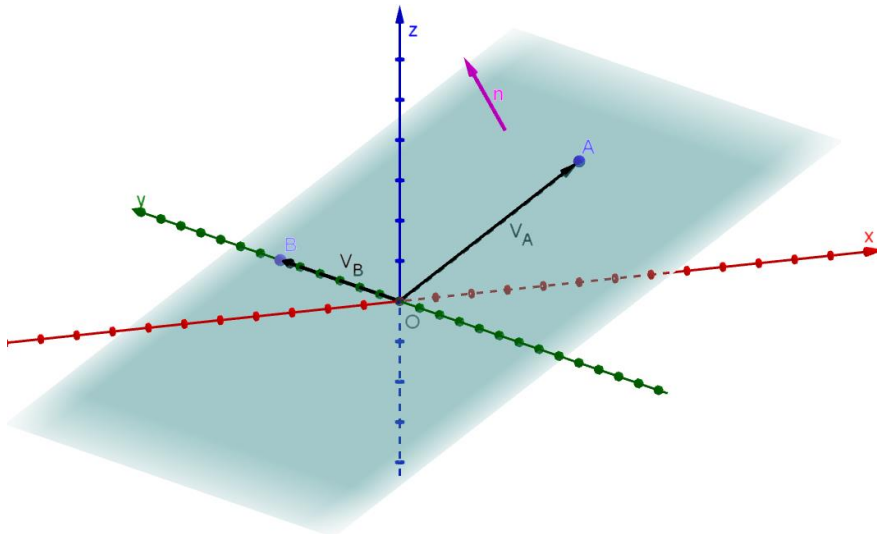


Fonte: Do autor (2017).

Para transformar o sistema  $(\theta, \phi)$  em dados de inclinação transversal e longitudinal  $(\alpha, \beta)$ , considere o plano formado pelos pontos  $A$ ,  $B$  e  $O$ , da Figura 3.7 (STEINBRUCH; WINTERLE, 2014).

$$\begin{aligned} A &= (x_a \quad 0 \quad z_a) \\ O &= (0 \quad 0 \quad 0) \\ B &= (0 \quad y_b \quad 0) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Figura 3.7 – Pontos do plano inclinado.



Fonte: Do autor (2017).

Para se obter a equação do plano, é necessária a obtenção do vetor  $\vec{n}$  ortogonal ao plano da Figura 3.7. O vetor  $\vec{n}$  é calculado pelo produto vetorial de dois vetores contidos no plano. Logo os vetores  $\vec{v}_A$  e  $\vec{v}_B$  são dados pela diferença entre os pontos  $A$  e  $O$  e pela diferença entre os pontos  $B$  e  $O$ , respectivamente, como vistos na Equação 3.17.

$$\begin{aligned} \vec{v}_A &= (x_a \quad 0 \quad z_a) \\ \vec{v}_B &= (0 \quad y_b \quad 0) \end{aligned} \quad (3.17)$$

O vetor  $\vec{n}$  ortonormal ao plano formado pelos três pontos é dado pela Equação 3.18.

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_a & 0 & z_a \\ 0 & y_b & 0 \end{bmatrix} = (-z_a \cdot y_b)\vec{i} + (x_a \cdot y_b)\vec{k} \quad (3.18)$$

A partir do vetor  $\vec{n}$ , determina-se a equação do plano inclinado, mostrada na Equação 3.19 (REIS; SILVA, 2014).

$$K_1 \cdot (x - x_0) + K_2 \cdot (y - y_0) + K_3 \cdot (z - z_0) = 0 \quad (3.19)$$

O plano inclinado passa pela origem, o que significa que  $x_0 = 0$ ,  $y_0 = 0$ ,  $z_0 = 0$ . A equação do plano inclinado é dada pela Equação 3.20.

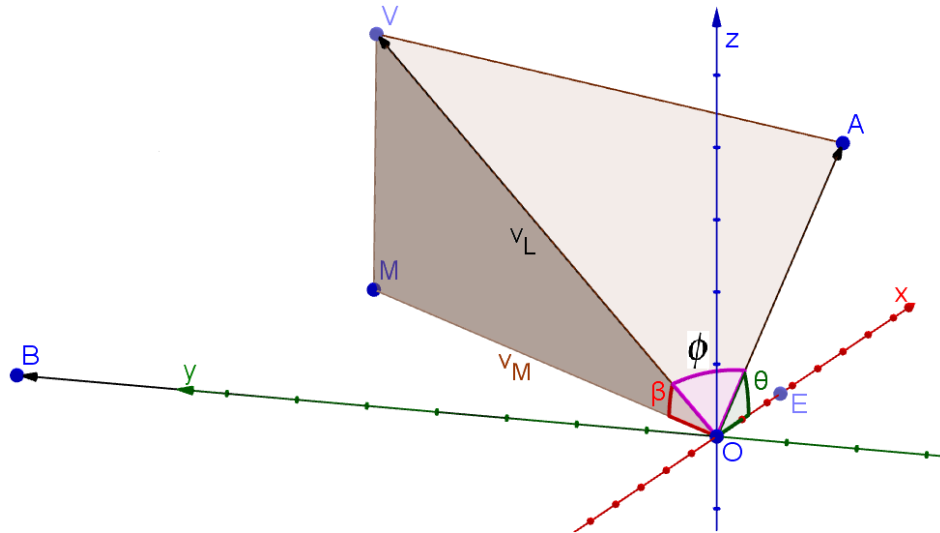
$$(-z_a \cdot y_b) \cdot x + (x_a \cdot y_b) \cdot z = 0 \quad (3.20)$$

Dado um vetor unitário  $\vec{v}_L$  que esteja no plano inclinado da Equação 3.20 e com ângulo  $\phi$ , em relação ao eixo X, mostrado na Equação 3.21 e visto na Figura 3.8. Para facilitar a visualização dos ângulos, retirou-se o plano da Figura 3.8. Entretanto parte do plano é mostrado na superfície formada pelos pontos A, V e O, da mesma figura.

$$\vec{v}_L = (X_{v_L} \quad Y_{v_L} \quad Z_{v_L}) \quad (3.21)$$

$$|\vec{v}_L| = 1$$

Figura 3.8 – Ângulos analisados  $\beta$ ,  $\theta$  e  $\phi$ .



Fonte: Do autor (2017).

Utilizando geometria analítica, determinam-se as coordenadas do vetor  $\vec{v}_L$ , mostradas na Equação 3.22.

$$X_{v_L} = \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad (3.22)$$

$$Y_{v_L} = \sin(\phi)$$

$$Z_{v_L} = \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

Na Figura 3.8, o ponto  $M$ , contido no plano  $XY$ , forma o triângulo retângulo  $VOM$ , em que um dos catetos é o vetor  $\vec{v}_M$  e a hipotenusa é o vetor unitário  $\vec{v}_L$ , mostrado na Equação 3.23.

$$\vec{M} = (X_{v_L} \quad Y_{v_L} \quad 0) \quad (3.23)$$

A Equação 3.24 mostra que o ângulo longitudinal do trator é dado pelo ângulo  $\beta$  (ângulo entre  $\vec{v}_L$  e  $\vec{M}$ ).

$$\text{sen}(\beta) = \frac{Z_{v_L}}{|v_L|} \quad (3.24)$$

Substituindo a variável da Equação 3.22 e da Equação 3.21 na Equação 3.24, tem-se a Equação 3.25, que determina o ângulo da inclinação longitudinal do trator. O sinal negativo na equação ocorre em função do referencial mostrado na Figura 3.5.

$$\beta = -\arcsen(\text{sen}(\theta) \cdot \cos(\phi)) \quad (3.25)$$

Pela ortogonalidade entre os ângulos longitudinal e transversal do trator, a equação do ângulo de inclinação transversal do trator pode ser determinada pela Equação 3.26.

$$\alpha = \arcsen(\text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(\phi)) \quad (3.26)$$

O AIP ( $\theta$ ) e o ATT ( $\phi$ ) podem ser obtidos, a partir das Equações 3.25 e 3.26, cuja divisão é dada pela 3.27.

$$\frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\beta)} = \frac{\text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(\phi)}{\text{sen}(\theta) \cdot \cos(\phi)} \quad (3.27)$$

A Equação 3.27 pode ser simplificada, gerando a Equação 3.28, que determina o ATT.

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\beta)}\right) \quad (3.28)$$

E voltando à Equação 3.26, determina-se o AIP, dado pela Equação 3.29.

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\phi)}\right) \quad (3.29)$$

No Capítulo 5, são mostrados testes simulados dos casos utilizados nos trabalhos de Demsar, Bernik e Duhovnik (2012) e Khoury Junior (2000), para efeito de validação do modelo, a partir da utilização das matrizes de rotação.

### 3.4 Hardware

O hardware desenvolvido neste projeto objetivou o baixo custo e simplicidade, de forma a possibilitar o alcance dessa tecnologia ao produtor rural de pequeno porte, aumentando a segurança, mas, de forma alguma, substituindo os dispositivos de proteção ao tombamento (EPC) e o cinto de segurança. Foram necessárias duas plataformas microcontroladas: o Arduino Due e o Arduino Mega 2560. O primeiro (chamado aqui de circuito Alfa) é responsável pela leitura e processamento dos sensores, já o segundo (chamado aqui de circuito Ômega) realiza a interface com o usuário, escrevendo os dados no display de cristal líquido (LCD) e lendo os comandos do teclado. O sistema eletrônico completo pode ser visto na Figura 3.9.

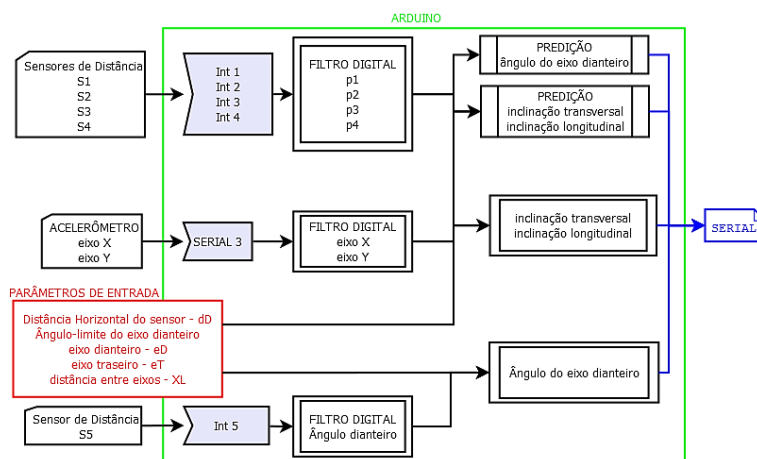
Figura 3.9 – Caixa do sistema eletrônico.



Fonte: Do autor (2017).

O fluxograma do software do Arduino Alfa é visto na Figura 3.10. Nesse fluxograma, são lidos os sinais PWM dos sensores ultrassônicos, que são filtrados.

Figura 3.10 – Fluxograma do circuito Alfa.

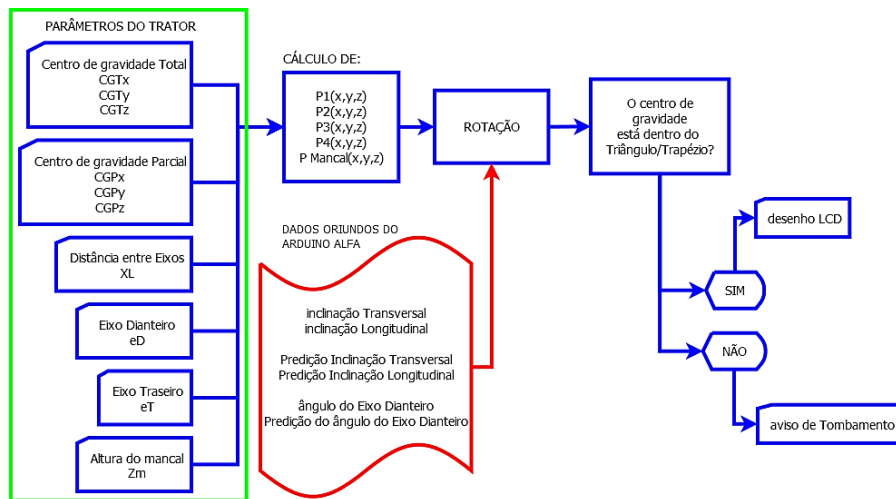


Fonte: Do autor (2017).

Os sinais do sensor de orientação, também, são filtrados após serem lidos pela porta serial. Com base nos dados filtrados, calculam-se os ângulos de predição do eixo dianteiro, predição da inclinação transversal e longitudinal, além do cálculo do ângulo do eixo dianteiro.

O fluxograma do circuito Ômega é mostrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Fluxograma do circuito Ômega.

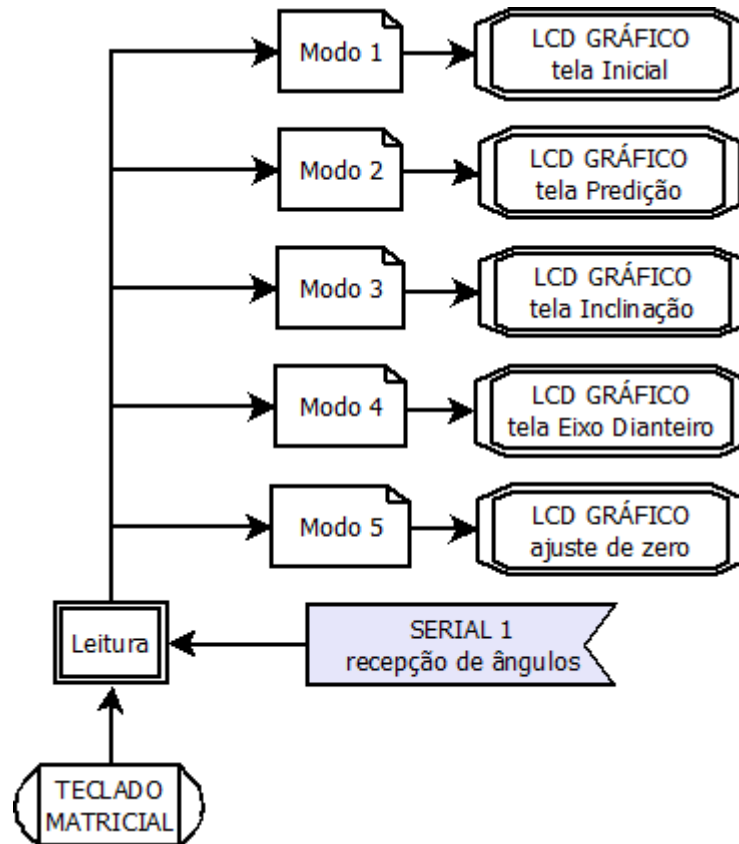


Fonte: Do autor (2017).

O aviso de tombamento é realizado visualmente, com o acionamento de LED e por um buzzer, para alerta sonoro, por corresponder a uma resposta mais eficiente para informar o operador (LLERAS et al., 2017). A utilização do teclado, para mudanças de tela do circuito Ômega, é visto na Figura 3.12.



Figura 3.12 – Telas do circuito Ômega.



Fonte: Do autor (2017).

### 3.4.1 Microcontrolador

Neste projeto, utilizou-se a plataforma Arduino Mega 2560, para a interface com LCD e teclado, cujas características técnicas são descritas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características técnicas do Arduino Mega 2560.

<b>Parâmetro</b>	<b>Características</b>
Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada recomendada	7 - 12 V
Limites de tensão de entrada	6 - 20 V
Portas digitais	54 (das quais 15 PWM)
Entradas analógicas	16
Saídas analógicas	—
Corrente máxima por pino	20 mA
Memória Flash	256 kB
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Clock	16 MHz
Portas Seriais	4
Pinos de Interrupção	2,3,18,19,20,21

Fonte: Arduino (2017).

Também foram desenvolvidas interfaces gráficas em ambiente Windows para visualização gráfica do modelo de rotação do chassi.

A aquisição de dados, a partir da leitura dos sensores, é realizada pelo Arduino Due, cujas características são descritas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características técnicas do Arduino Due.

(continua)

<b>Parâmetro</b>	<b>Características</b>
Microcontrolador	ATSAM3X8E
Tensão de operação	3,3 V
Tensão de entrada recomendada	7 - 12 V
Limites de tensão de entrada	6 - 20 V
Portas digitais	54 (das quais 12 PWM)
Entradas analógicas	12
Saídas analógicas	2

Tabela 3.5 – Características técnicas do Arduino Due.

(conclusão)

Parâmetro	Características
Corrente máxima por pino	20 mA
Memória Flash	512 kB
SRAM	96 kB
EEPROM	-
Clock	84 MHz
Portas Seriais	4
Pinos de Interrupção	Todas as portas digitais

Fonte: Arduino (2017).

### 3.4.2 Teclado matricial

O teclado é um dispositivo de entrada utilizado para seleção dos dados que são mostrados no LCD (visto na seção 3.4.5). Por meio do teclado, é possível iniciar o processo de calibração dos dispositivos, possibilitar a inserção dos parâmetros do trator e selecionar as informações mostradas no LCD. O teclado utilizado é mostrado na Figura 3.13. Utilizaram-se os pinos de entrada: 24, 26, 28 e 30; pinos de saída: 25, 27, 29 e 31.

Figura 3.13 – Teclado.



Fonte: Do autor (2017).

### 3.4.3 Medidor de distância

A medição de distância pode ser realizada por diversos tipos de sensores, como estereovisão, laser, sensor ultrassônico ou mesmo fita métrica.

Neste trabalho, optou-se pela utilização de sensores ultrassônicos os quais emitem pulsos sonoros, calculando o tempo de retorno do sinal refletido. Trabalham na faixa de frequência entre 40 kHz e 2 MHz. Podem ser utilizados em ambientes impregnados de umidade e de pó. Podem detectar qualquer tipo de material, desde que ele não absorva som (ROSÁRIO, 2005).

As características principais retiradas de Maxbotix (2014) são mostradas a seguir:

- a) 5 mm de resolução para leitura analógica;
- b) 1 mm de resolução para leitura PWM;
- c) Compensação de temperatura;
- d) Leitura estável, confiável e excelente rejeição de ruído;
- e) Saídas: analógica (10 bits), RS 232 (9600 baud), largura de pulso (1 $\mu$ s/mm);
- f) Alcance: 30 cm a 5 m;
- g) Detecção: 1 mm a 5 m, objetos até 30 cm são reconhecidos como estando a 30 cm;
- h) Período de medição: 100 ms;
- i) Temperatura de operação: -15°C a 65°C;
- j) Tensão de operação: 2,5 a 5,5 V;
- k) Corrente: 2,5 mA a 3,3 V e 3,1 mA a 5 V.

Os tipos de sensores ultrassônicos da família EZ são mostrados na Figura 3.14. O sensor de distância utilizado é o MB1043, cujos padrões de saída

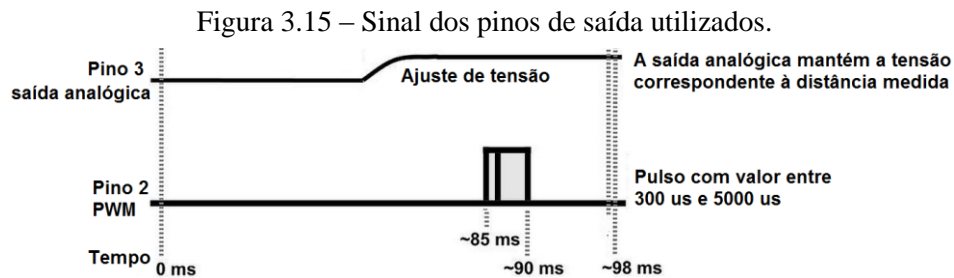
do sinal são: analógico (entre 0 e Vcc), serial assíncrono e PWM (MAXBOTIX, 2014).

Figura 3.14 – Tipos de sensores da família EZ e suas características.

HRLV-MaxSonar®-EZ™ Sensors				
Detecção de pessoas Feixe largo Alta sensibilidade	Melhor banceamento		Grandes alvos Feixe estreito Tolerância ao ruído	
MB1003	MB1013	MB1023	MB1033	MB1043

Fonte: Maxbotix (2014).

O sinal PWM é lido pela interrupção do Arduino, em que a relação entre o tempo do sinal alto e a distância medida é de 1  $\mu\text{s}/\text{mm}$ , em que o sinal varia entre 300  $\mu\text{s}$  e 5000  $\mu\text{s}$ , conforme a Figura 3.15.



Fonte: Maxbotix (2014).

A relação que governa o tempo medido do pulso PWM e a distância medida é dada pela Equação 3.30.

$$d_{mm} = t_{\mu\text{s}} \quad (3.30)$$

O sinal analógico do sensor é lido por um conversor AD. A equação de conversão entre o valor digital e a distância, em centímetros, é dada pela Equação 3.31.

$$d_{mm} = k \cdot V_{ADC} \quad (3.31)$$

O fator  $k$  depende da tensão de alimentação aplicada no sensor. A resolução da saída analógica é de 5 mm, mas se for lido, por meio da saída PWM do sensor, a resolução atinge o valor de 1 mm. A taxa de atualização do sensor ultrassônico é de 10 Hz (MAXBOTIX, 2014). O sensor MB1043 pode ser visto na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Sensor ultrassônico MB1043.



Fonte: Maxbotix (2014).

Ao projeto, utilizou-se, para a leitura do ângulo do eixo dianteiro, a saída PWM, em decorrência da precisão de 1 mm do sinal. Por outro lado, para a leitura das alturas dos obstáculos, pôde-se utilizar o sinal PWM ou mesmo a saída analógica. Um capacitor de 100  $\mu$ F foi inserido entre Vcc e GND para redução de ruído (MAXBOTIX, 2014).

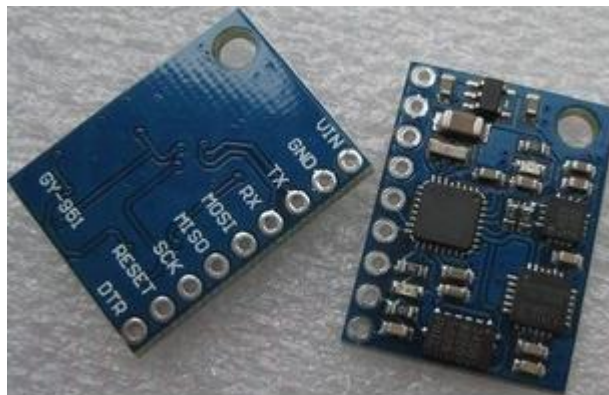
#### 3.4.4 Sensor de orientação

O sensor de orientação é composto por um microcontrolador e uma unidade de medição inercial (IMU - Inertial Measurement Unit). Uma IMU é um dispositivo dotado de acelerômetro e de giroscópio capaz de auxiliar na

navegação veicular a partir da detecção da aceleração e rotação dos três eixos X, Y e Z.

Pode ser citada uma infinidade de trabalhos utilizando uma IMU. As aplicações mais comuns são em veículos autônomos, drones, submersíveis autônomos, smartphones e na bioengenharia. O sensor de orientação possui um microcontrolador interno que processa os dados do acelerômetro e do giroscópio e envia os resultados dos ângulos dos três eixos de rotação por meio de comunicação serial assíncrona. Uma característica comum de uma IMU é o ruído do sinal, que deve ser filtrado. Em razão disso, neste projeto, foram testados diversos filtros digitais, descritos na seção 2.4. O sensor utilizado é o GY-951, mostrado na Figura 3.17, fornecendo os ângulos de Yaw-Pitch-Roll numa saída serial com baud rate de 57600. Possui giroscópio, acelerômetro e bússola, podendo ser alimentado com tensões entre 3 e 5 Volts.

Figura 3.17 – Sensor de orientação.



Fonte: Hackspark (2017).

### 3.4.5 Display de cristal líquido

A interface com o usuário pode ser realizada de diversas formas, seja por tablet, smartphone, seja com um sistema microcontrolado. Pode-se, por

exemplo, inserir, na saída serial do Arduino Due, um módulo Bluetooth (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

Utilizou-se um LCD gráfico para a projeção do chassi e do centro de gravidade, que são visualizados em tempo real. Esses mesmos gráficos também podem ser implementados para serem visualizados em Tablets. Os resultados são mostrados no Capítulo 5. O LCD utilizado é visto na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Display de cristal líquido.



Fonte: Do autor (2017).

Utiliza-se a biblioteca gráfica U8glib, escrita em C++, para sua utilização em ambiente embarcado (UNIVERSAL..., 2014). Os pinos de conexão desse LCD é mostrado na Tabela 3.6.



Tabela 3.6 – Esquema de conexão dos pinos.

<b>Pino LCD</b>	<b>Função</b>	<b>Conexão</b>
1	GND	GND
2	Vcc	5 V
3	Ajuste de contraste	Pino central potenciômetro
4	RS	Porta digital 4 Arduino
5	RW	Porta digital 5 Arduino
6	Enable	Porta digital 6 Arduino
15	Comunicação: paralela (1) / Serial (0)	GND
17	Reset	Porta digital 7 Arduino
19	Luz de fundo +	3,3 V
20	Luz de fundo -	GND

Fonte: Do autor (2017).

### 3.5 Software

A linguagem C++ permite que sejam criadas classes, que encapsulam o código, facilitando a programação. Biblioteca é uma parte do software que fornece algum tipo de funcionalidade (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

As bibliotecas reduzem as linhas de código da função principal. A programação em C++ no Arduino é limitada pela capacidade de armazenamento do programa (MONK, 2015). No caso do Arduino Mega 2560, a capacidade é de 256 kB de flash, e de 8 kB de SRAM (MONK, 2015). Já o Arduino Due possui 512 kB de flash e 96 kB de SRAM (ARDUINO, 2017). Realizou-se a implementação dos algoritmos de filtragem por meio de funções (MIZRAHI, 2008).

#### 3.5.1 Biblioteca circuitoAlfa

Esta biblioteca é responsável pela leitura e filtragem dos dados dos sensores ultrassônicos, leitura e filtragem do sensor de orientação, predição dos ângulos transversal e longitudinal e verificação do toque do eixo no chassi (o

que determina o início da fase 2 do tombamento lateral). Os dados de inclinação são enviados pela serial.

### **3.5.2 Biblioteca circuito Omega**

Essa biblioteca é responsável pela interface com o usuário por meio do LCD e do teclado. Como já discutido, inclui-se a biblioteca `u8glib` para a utilização do LCD gráfico. Quanto ao teclado, desenvolveu-se uma biblioteca específica. Os dados enviados pelo Arduino Alfa são os ângulos transversal, longitudinal, e do eixo dianteiro, além de utilizar pinos de interrupção para indicar condição de tombamento estático e de toque do eixo no chassi. Necessita-se, como parâmetros de entrada, dos dados relacionados à rotação do trator, que são mostrados na tela do LCD, como o centro de gravidade, largura do eixo traseiro, distância entre eixos, altura do mancal.

### **3.6 Resumo do capítulo**

Foi mostrado como o cálculo da predição da inclinação é realizado a partir da informação das inclinações transversal e longitudinal e da medição da altura dos obstáculos à frente dos pneus.

Posteriormente, foram mostradas as equações de transformação do sistema  $(\theta, \phi) \rightarrow (\alpha, \beta)$  e  $(\alpha, \beta) \rightarrow (\theta, \phi)$ . Os ângulos  $(\alpha, \beta)$  são obtidos por inclinômetros, ao passo que os ângulos  $(\theta, \phi)$  são oriundos de modelos teóricos (AIP e ATT), utilizados em trabalhos científicos.

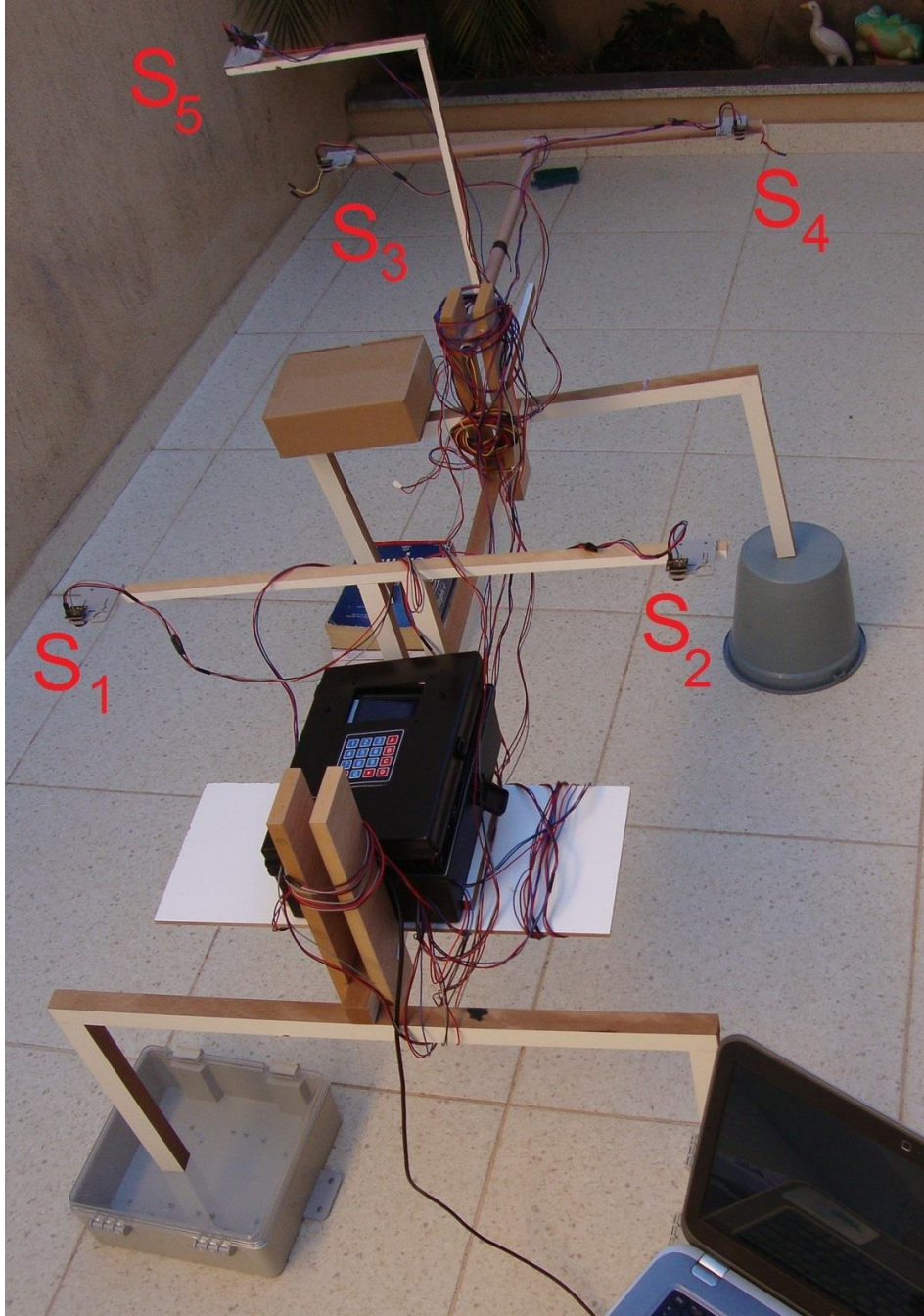
Foram mostrados os componentes que compõem o hardware, compostos por sensores ultrassônicos, sensor de orientação, LCD, teclado, microcontrolador e módulo bluetooth e o esquema de ligação do circuito.

No que tange ao software, foram mostrados filtros digitais, matrizes de rotação e as equações do cálculo de predição.

#### **4 TESTES COM OS SENSORES EM MAQUETE**

Neste capítulo, são apresentados dados de medição dos sensores utilizados, verificação da natureza do ruído dos sensores e verificação do comportamento do sinal diante de alguns filtros digitais. Para isso, foi construída uma maquete de um trator, que pode ser vista na Figura 4.1, em que podem ser vistos os sensores  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$ , posicionados à frente dos pontos de contato da maquete com o solo e o sensor de medição do ângulo do eixo dianteiro  $S_5$ . Ela foi construída para representar o chassi de um trator agrícola, com o eixo dianteiro móvel, para possibilitar a aquisição dos dados de inclinação e de predição. Ela permitiu o desenvolvimento do sistema eletrônico, realizando-se testes com os elementos do circuito, além do aprimoramento da metodologia dos ensaios experimentais com o trator.

Figura 4.1 – Maquete.



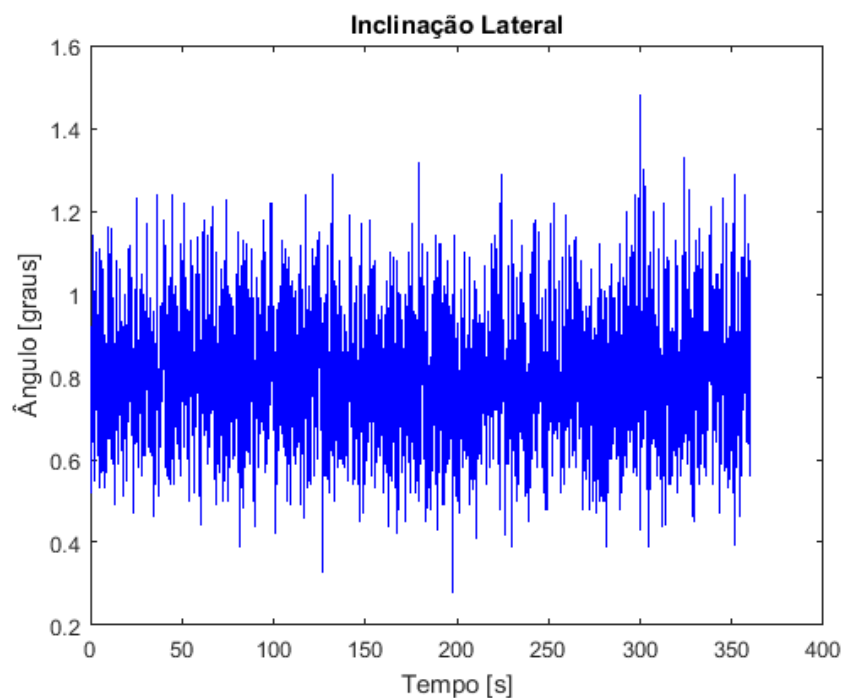
Fonte: Do autor (2017).

#### 4.1 Medições com sensor de orientação

Foram armazenados os dados oriundos do sensor de rotação por 360 segundos, de forma a verificar a estabilidade do sinal por um tempo prolongado. O protótipo encontrava-se em repouso, em plano horizontal. No total, foram obtidas 17.534 medições de inclinação transversal e a mesma quantidade de medições da inclinação longitudinal.

Os dados deste sensor, relativos à inclinação transversal, são apresentados no Gráfico da Figura 4.2.

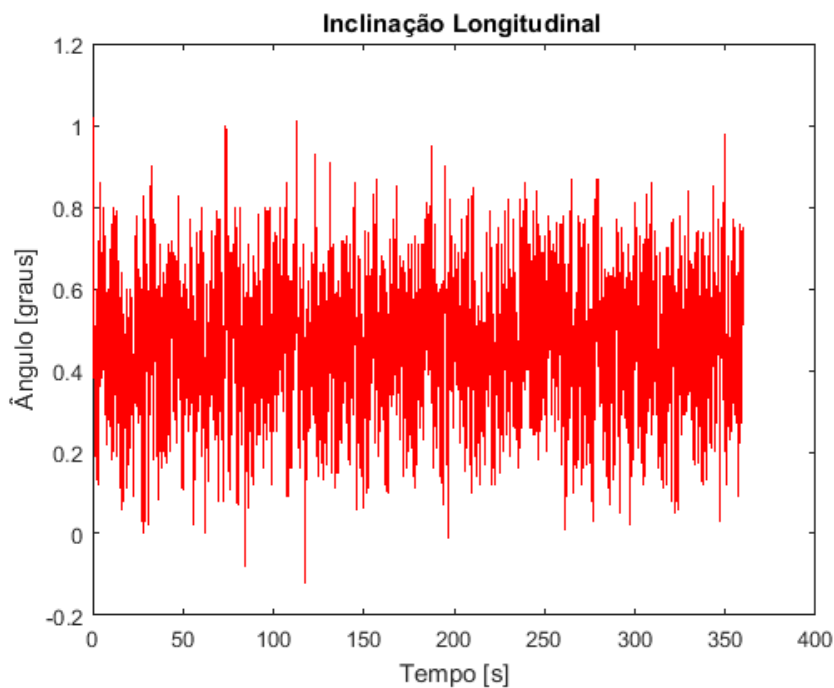
Figura 4.2 – Medição da inclinação transversal.



Fonte: Do autor (2017).

Os dados da inclinação longitudinal são mostrados no gráfico da Figura 4.3.

Figura 4.3 – Medição da inclinação longitudinal.



Fonte: Do autor (2017).

Os parâmetros de média e desvio padrão são listados na Tabela 4.1.

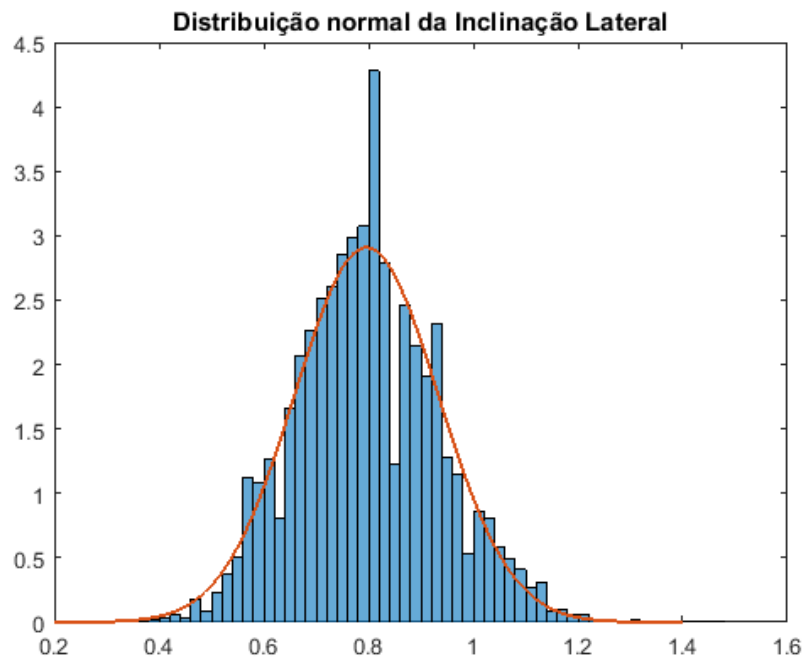
Tabela 4.1 – Dados estatísticos de medição do sensor de orientação.

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
$\bar{x}_{\text{Lat}} = 0,7960$	Média da inclinação transversal
$s_{\text{Lat}} = 0,1372$	Desvio padrão da inclinação transversal
$\bar{x}_{\text{Long}} = 0,4677$	Média da inclinação longitudinal
$s_{\text{Long}} = 0,1435$	Desvio padrão da inclinação longitudinal

Fonte: Do autor (2017).

A distribuição normal das medições da inclinação transversal é apresentada na Figura 4.4.

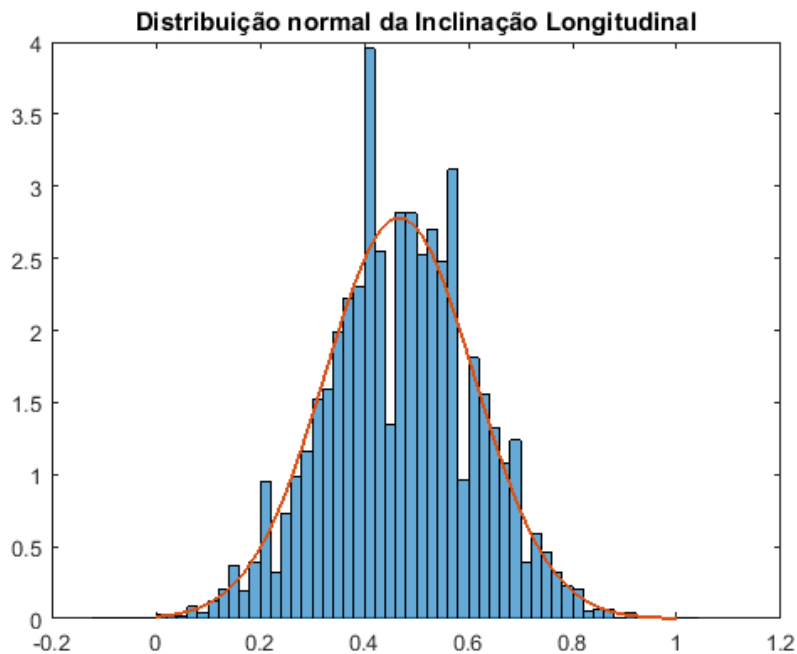
Figura 4.4 – Distribuição normal da inclinação transversal.



Fonte: Do autor (2017).

A distribuição normal das medições da inclinação longitudinal pode ser vista na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Distribuição normal da inclinação longitudinal.



Fonte: Do autor (2017).

A partir da observação das Figuras 4.4 e 4.5, nota-se que a origem do ruído do sensor de orientação é gaussiana.

#### 4.2 Medições com sensor ultrassônico

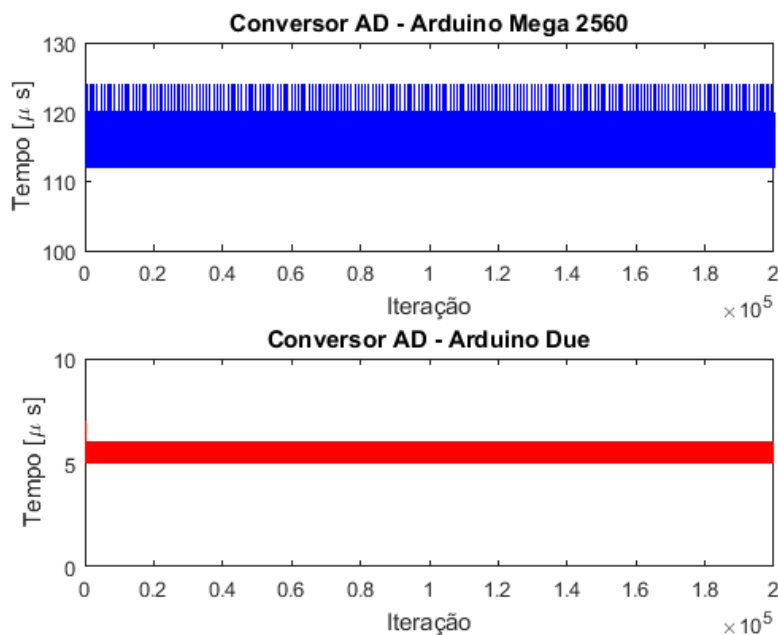
As medições foram realizadas por 360 segundos para verificar a estabilidade dos dados. O protótipo encontrou-se em repouso e em plano horizontal. Cada um dos sensores foi colocado 50 cm à frente de cada ponto de contato da maquete ao solo. É importante realçar que cada um dos sensores não precisa estar necessariamente à mesma altura do solo, mas, sim, à mesma distância horizontal do sensor  $S_i$  ao ponto  $P_i$ , com  $i = \{1,2,3,4\}$ . O ruído origina-se de várias fontes, cujas origens não são investigadas nesta análise, além da questão do comprimento do cabo. Os cabos utilizados para a



alimentação dos sensores e para a medição do sinal é de  $0,32 \text{ mm}^2$ , sem blindagem. Foram realizados testes em cabos utilizados na maquete (2 metros) e no trator (4 metros), para verificar o nível de ruído obtido no sinal.

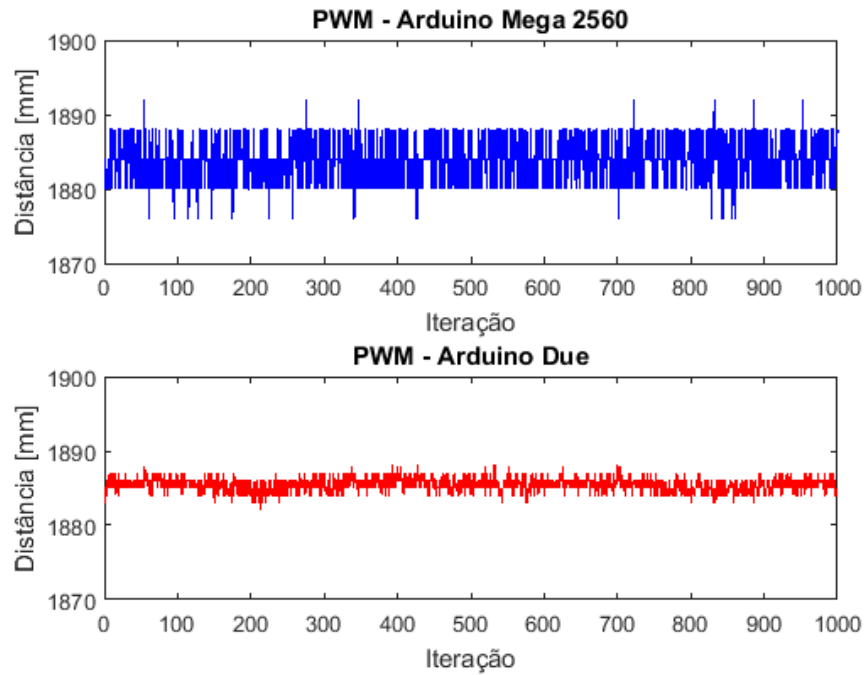
A Figura 4.6 mostra, no eixo X,  $2 \cdot 10^5$  iterações, para a medição da distância, utilizando o sinal analógico do sensor ultrassônico. No eixo Y, é mostrado o tempo de conversão do sinal analógico em digital. A leitura realizada pelo Arduino Due é cerca de 20 vezes mais rápida do que a leitura realizada pelo Arduino Mega 2560. A Figura 4.7 mostra, no eixo Y,  $2 \cdot 10^5$  iterações, para a medição da distância, utilizando o sinal PWM do sensor ultrassônico. No eixo Y, é mostrada a distância medida a partir do processamento do sinal PWM. O sinal processado pelo Arduino Due é mais preciso do que o processado pelo Arduino Mega 2560.

Figura 4.6 – Comparação do tempo de aquisição do sinal AD.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 4.7 – Comparação do poder de processamento do sinal PWM.



Fonte: Do autor (2017).

Durante os testes, verificou-se que o fator  $k$  da equação 3.31 não foi constante, variando de 5 a 6,8 (possivelmente por ruídos na tensão de alimentação). Dessa forma, preferiu-se utilizar o sinal PWM do sensor.

### 4.3 Filtragem

Neste tópico, são mostrados os resultados dos filtros descritos no Capítulo 3. Os dados apresentados dos sensores foram utilizados nos filtros, para verificação do seu comportamento e permitir a sua melhor seleção a ser utilizado em ambiente embarcado.

### 4.3.1 Filtragem do sensor de orientação

Os filtros descritos foram aplicados nos dados da inclinação transversal, mostrados na Figura 4.2. Na Figura 4.8(a), é mostrado o resultado do algoritmo de filtragem Média. A Figura 4.8(b) mostra o filtro Média Móvel. O parâmetro de simulação da equação 2.30 (pág. 51) é  $k = 50$ . A Figura 4.8(c) mostra o resultado do Filtro Passa-Baixa. O parâmetro de simulação da equação 2.31 (pág. 51) é  $\alpha = 0,95$ . A Figura 4.8(d) mostra o resultado da aplicação do Filtro de Kalman. Os parâmetros de simulação são:  $A = 1$ ,  $H = 1$ ,  $Q = 0.001$ ,  $R = 1$ ,  $x = 1$ ,  $P = 1$ .

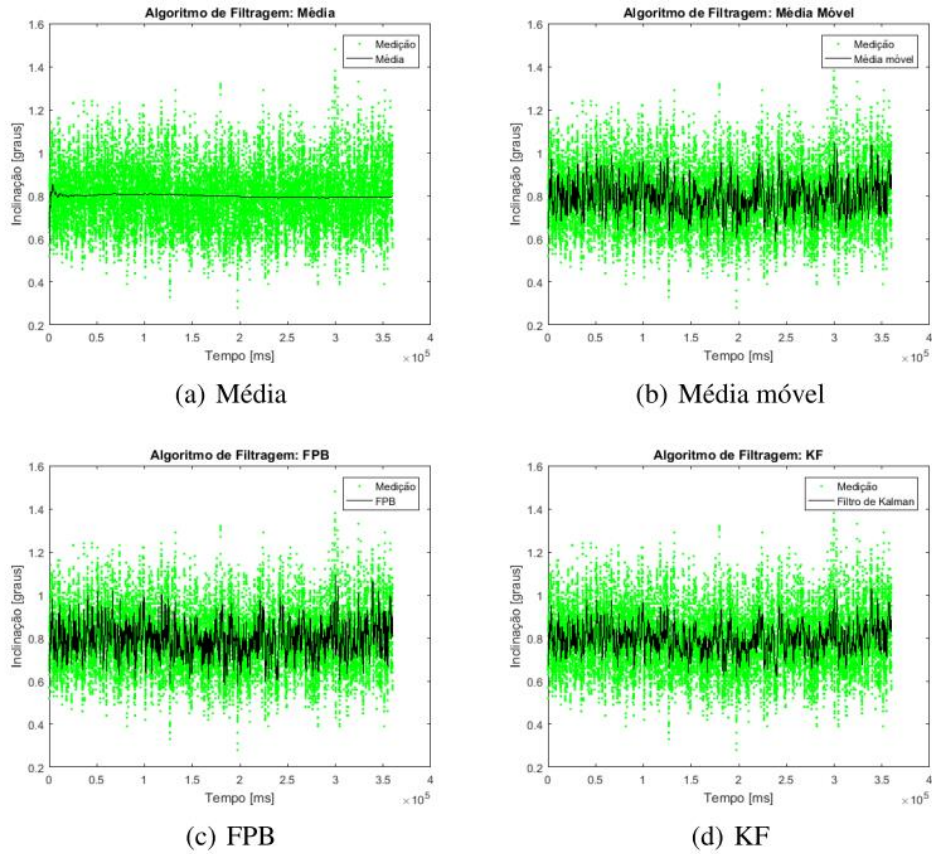
**Conclusões:** Percebeu-se que o algoritmo de filtragem Média estabiliza o sinal. Quanto aos outros três filtros (Média Móvel, Filtro Passa-Baixa e Filtro de Kalman), não apresentaram grandes diferenças, apesar de que o filtro de Kalman tenha oscilado um pouco menos.

### 4.3.2 Filtragem do sensor ultrassônico

Utilizando-se os mesmos parâmetros dos filtros utilizados nos dados de inclinação, filtraram-se os dados do sensor 1, cujos resultados são mostrados na Figura 4.9.

Analisando a Figura 4.9, o filtro Média sofre poucas oscilações, mas demora para se estabilizar num valor fixo. Dos demais, o filtro Média Móvel obteve resultados menos ruidosos.

Figura 4.8 – Algoritmos de filtragem do sensor de orientação.



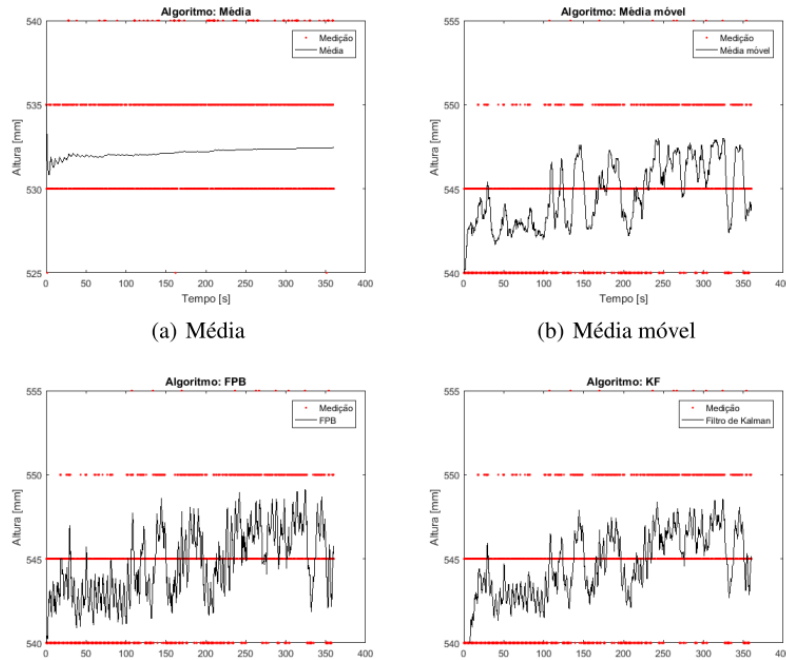
Fonte: Do autor (2017).

#### 4.4 Filtragem com mudança brusca

Para verificar o tempo de resposta do filtro, é necessário analisá-lo numa resposta a um degrau, ou seja, a uma mudança brusca. Dessa forma, realizou-se uma mudança brusca do ângulo do sensor de inclinação. A Figura 4.10(a) apresenta o resultado do algoritmo Média. A Figura 4.10(b) mostra os resultados do algoritmo Média Móvel, em que o parâmetro de simulação é  $k = 50$ . A Figura 4.10(c) mostra os resultados de simulação do FPB, em que o parâmetro de simulação é  $\alpha = 0,95$ . A Figura 4.10(d) mostra o resultado do filtro de Kalman

(KF), em que os parâmetros de simulação são:  $A = 1$ ,  $H = 1$ ,  $Q = 0.001$ ,  $R = 1$ ,  $x = 12$ ,  $P = 1$ .

Figura 4.9 – Algoritmos de filtragem do sensor ultrassônico.



Fonte: Do autor (2017).

Analisando os resultados dos filtros, nota-se a estabilidade do filtro Média. Entretanto, esse filtro não é capaz de perceber mudanças bruscas nos dados do sensor. Logo, esse filtro é descartado deste projeto. Quanto aos outros filtros, apresentaram resultados muito próximos.

#### 4.5 Desempenho dos algoritmos de filtragem

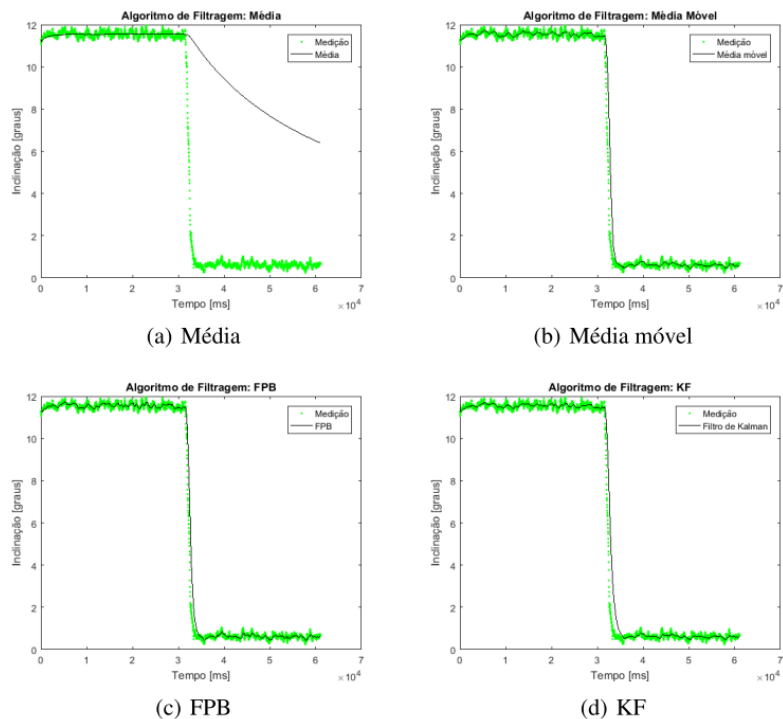
A implementação dos filtros em ambiente embarcado deve considerar o tempo de processamento e a quantidade de memória utilizada em cada filtro. Os experimentos, envolvendo a filtragem de dados dos sensores, foram

apresentados neste capítulo, destacando-se os algoritmos Média Móvel, Filtro Passa-Baixa e Filtro de Kalman.

A Figura 4.11 apresenta o desempenho de processamento dos algoritmos no quesito tempo de processamento, em  $\mu\text{s}$ . Utilizou-se o Arduino Mega 2560, de 8 bits, para processar os filtros digitais, em que o algoritmo é mostrado no apêndice A.

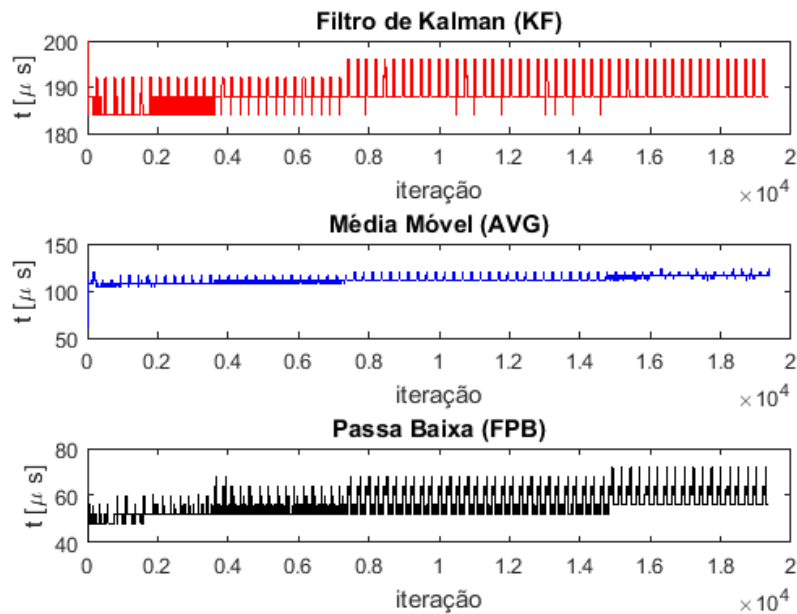
Analisando-se os gráficos da Figura 4.11, o filtro mais apto para a utilização em ambiente embarcado é o FPB, pois apresentou o menor tempo de processamento.

Figura 4.10 – Filtragem com mudança brusca do sensor de orientação.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 4.11 – Tempo de processamento dos filtros digitais - Mega 2560.

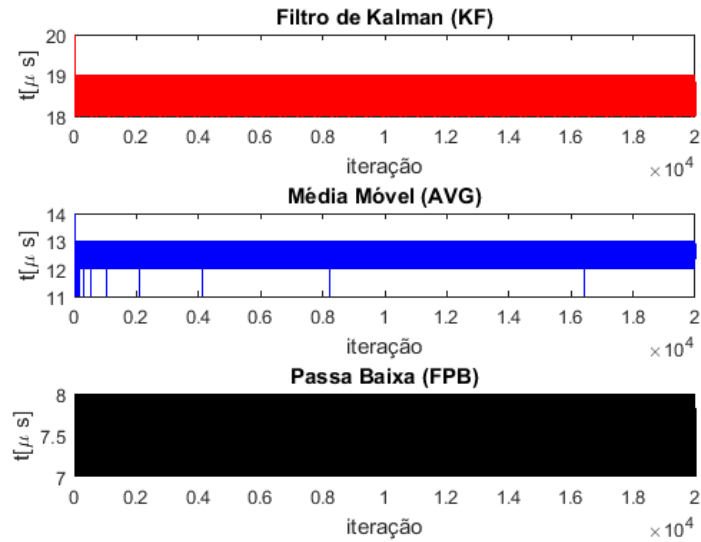


Fonte: Do autor (2017).

A Figura 4.12 apresenta o desempenho de processamento dos algoritmos no quesito tempo de processamento, em  $\mu s$ . Utilizou-se o Arduino Due, de 32 bits, para processar os filtros digitais.

Comparando-se a Figura 4.11 à Figura 4.12, o tempo de processamento dos algoritmos de filtragem no Arduino Due reforça a tomada de decisão de utilizá-lo para a aquisição e processamento dos sinais.

Figura 4.12 – Tempo de processamento dos filtros digitais - Arduino Due.



Fonte: Do autor (2017).

#### 4.6 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi apresentada uma série de testes com os principais componentes do sistema eletrônico. O sensor de orientação utilizado apresenta ruído gaussiano, o que torna necessária a utilização de filtros, como o FPB com  $\alpha$  elevado. O sensor ultrassônico possui baixo ruído, selecionando-se o sinal PWM, entre os três tipos de sinais disponíveis.

Foram analisados algoritmos de filtragem, em que o tempo de processamento tem que ser considerado pelo limitado poder de processamento dos microcontroladores, da quantidade de sensores utilizados e da taxa de amostragem de cada sensor. O Arduino Due foi selecionado para processamento dos sensores e dos filtros, pelo seu desempenho satisfatório, diante do Arduino Mega 2560. O filtro passa-baixa foi o selecionado por ser de fácil configuração, apesar de que podem ser utilizados os filtros Média Móvel e de Kalman.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO: ROTAÇÃO DO CHASSI

Neste capítulo, é mostrada a validação do modelo de rotação do eixo a partir dos dados obtidos pelos trabalhos de Demsar, Bernik e Duhovnik (2012) e Khoury Junior (2000). Os autores analisados realizaram experimentos para identificar os ângulos em que o trator perde a estabilidade. São mostrados neste capítulo: a) o modelo gráfico do ângulo de inclinação do plano em função do ângulo de trabalho do trator e; b) o desenho da vista superior do trator, obtido pelas matrizes de rotação.

### 5.1 Os experimentos de Demsar, Bernik e Duhovnik (2012)

Demsar, Bernik e Duhovnik (2012) desenvolvem, em seu trabalho, uma parte experimental e outra de simulação, para comparar o modelo estático apresentado à estabilidade. Os resultados estão mostrados na Tabela 5.1.

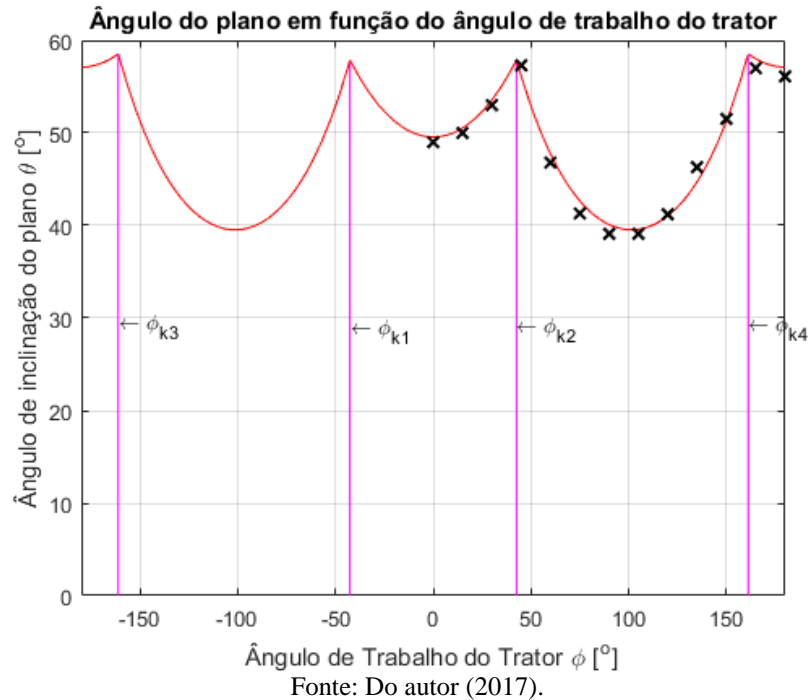
Tabela 5.1 – Parâmetros para cálculo de rotação.

Ponto	Descrição
$e_T = 96,0$ mm	ponto de contato do pneu traseiro esquerdo com o solo
$XL = 121,0$ mm	ponto virtual abaixo do mancal de contato com o solo
$X_{cgt} = 52,2$ mm	Abscissa do centro de gravidade total
$Y_{cgt} = 0,0$ mm	Ordenada centro de gravidade total
$Z_{cgt} = 44,5$ mm	Cota centro de gravidade total
$Z_M = 28,0$ mm	Cota do mancal

Fonte: Do autor (2017).

Na Figura 5.1 apresenta-se o gráfico obtido por meio das equações 2.21, 2.22, 2.23 e 2.24. O gráfico representa a região de estabilidade estática do trator com os parâmetros mostrados na Tabela 5.1. Os pontos marcados com "X" representam os experimentos mostrados desde a Figura 5.2 à Figura 5.15.

Figura 5.1 – Determinação da região de estabilidade estática.



Na Figura 5.2 representa-se o trator em plano horizontal. Na legenda da figura pode-se determinar a linha do estágio 1, que é a linha entre o ponto de contato dos pneus traseiros ao solo até o mancal. A linha em azul determina a região de estabilidade estática, mostrada por Demsar, Bernik e Duhovnik (2012). O ponto "O" representa o centro de gravidade do trator. Os pontos que determinam a região de estabilidade estática são:  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ , mostrados na Figura 2.6.

Na Tabela 5.2 apresentam-se os dados de  $\alpha$  e de  $\beta$  calculados, a partir de  $\phi$  e  $\theta$ , utilizando as equações 3.25 e 3.26. O sinal de  $\beta$  é positivo para declives e negativo para aclives. O sinal de  $\alpha$  é positivo para rotação horária e negativo para a rotação anti-horária.

Tabela 5.2 – Valores dos ângulos, em graus.

<b>Teste</b>	$\phi$	$\theta$	$\alpha$	$\beta$
1	0	0	0,0	0,0
2	0	49,0	0,0	-49,0
3	15	50,0	11,4	-47,7
4	30	53,0	23,5	-43,7
5	45	57,3	36,5	-36,5
6	60	46,8	39,1	-21,4
7	75	41,3	39,1	-9,8
8	90	39,1	39,1	0,0
9	105	39,1	37,5	9,4
10	120	41,2	34,8	19,2
11	135	46,3	30,7	30,7
12	150	51,5	23	42,7
13	165	57,0	12,5	54,1
14	180	56,1	0,0	56,1

Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.2 – Teste 1:  $\phi = 0^\circ, \theta = 0,0^\circ$ .

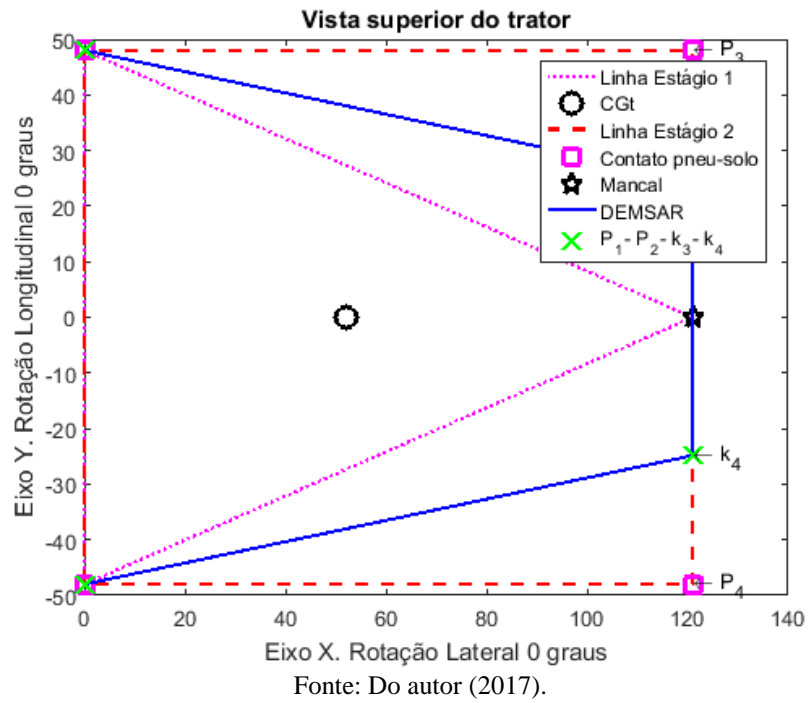


Figura 5.3 – Teste 2:  $\phi = 0^\circ, \theta = 49,0^\circ$ .

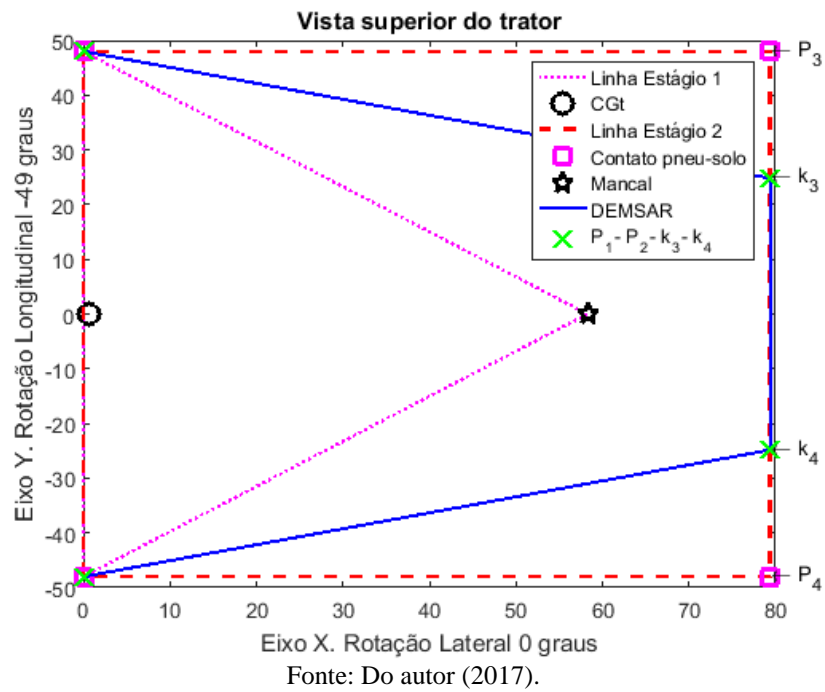
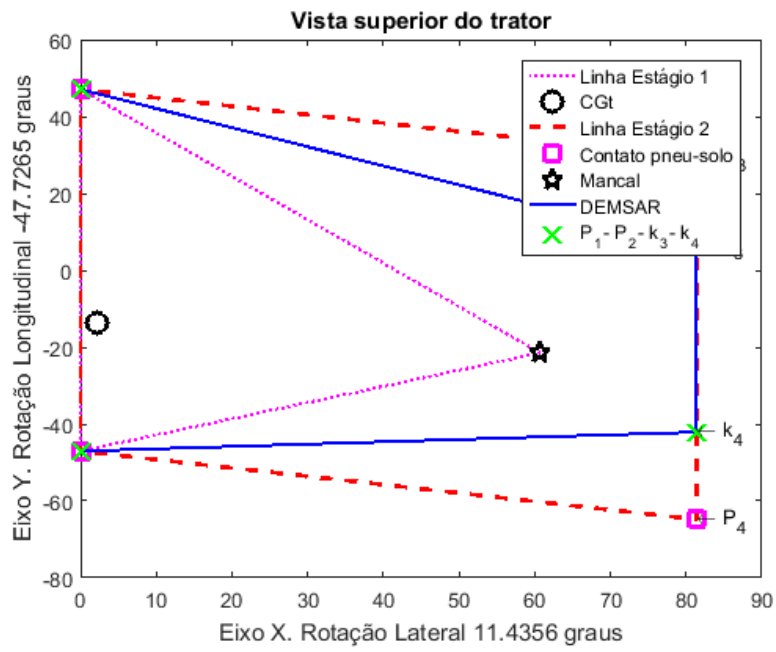


Figura 5.4 – Teste 3:  $\phi = 15^\circ, \theta = 50,0^\circ$ .



Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.5 – Teste 4:  $\phi = 30^\circ, \theta = 53,0^\circ$ .

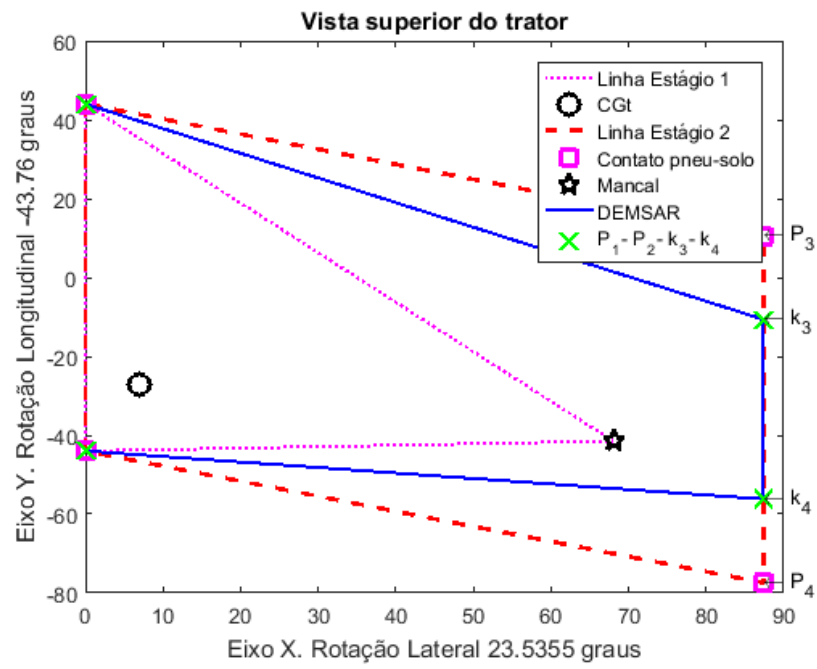
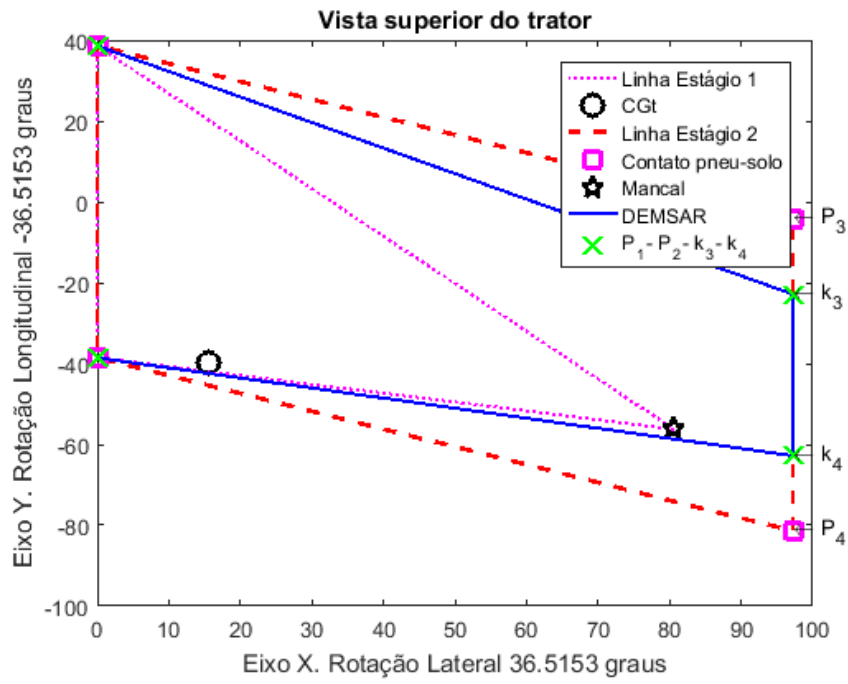


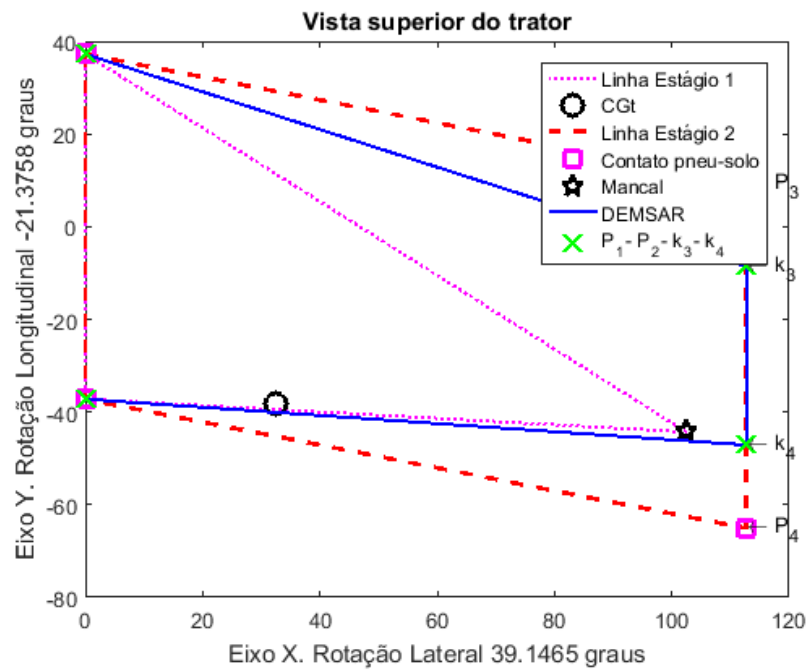
Figura 5.6 – Teste 5:  $\phi = 45^\circ, \theta = 57,3^\circ$ .



Fonte: Do autor (2017).

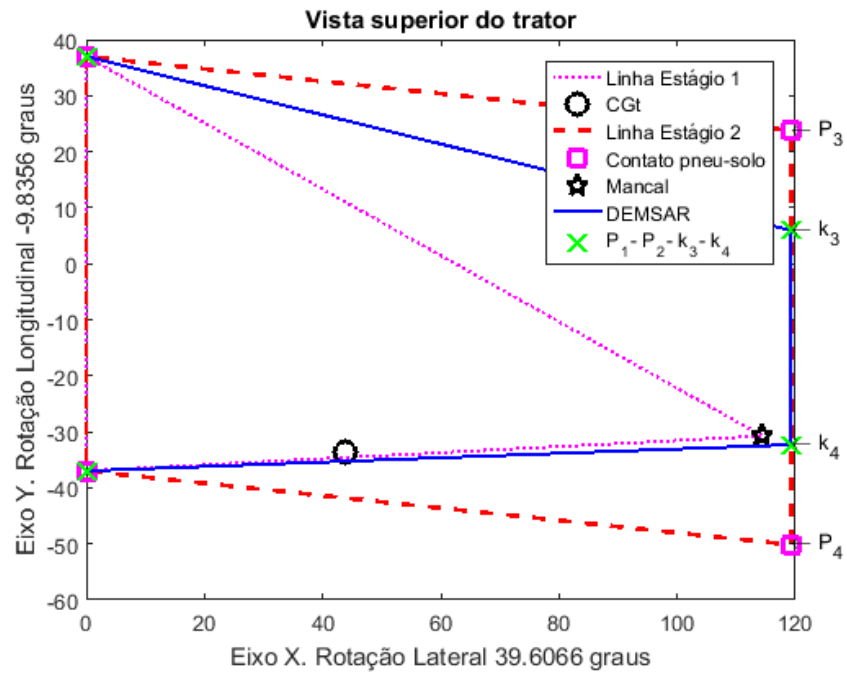


Figura 5.7 – Teste 6:  $\phi = 60^\circ, \theta = 46,8^\circ$



Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.8 – Teste 7:  $\phi = 75^\circ, \theta = 41,3^\circ$ .



Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.9 – Teste 8:  $\phi = 90^\circ, \theta = 39,1^\circ$ .

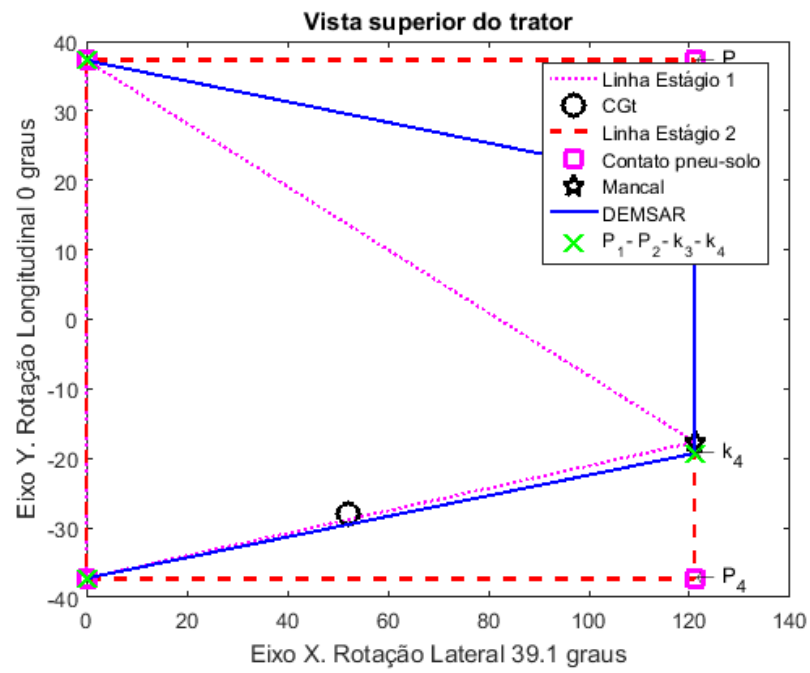
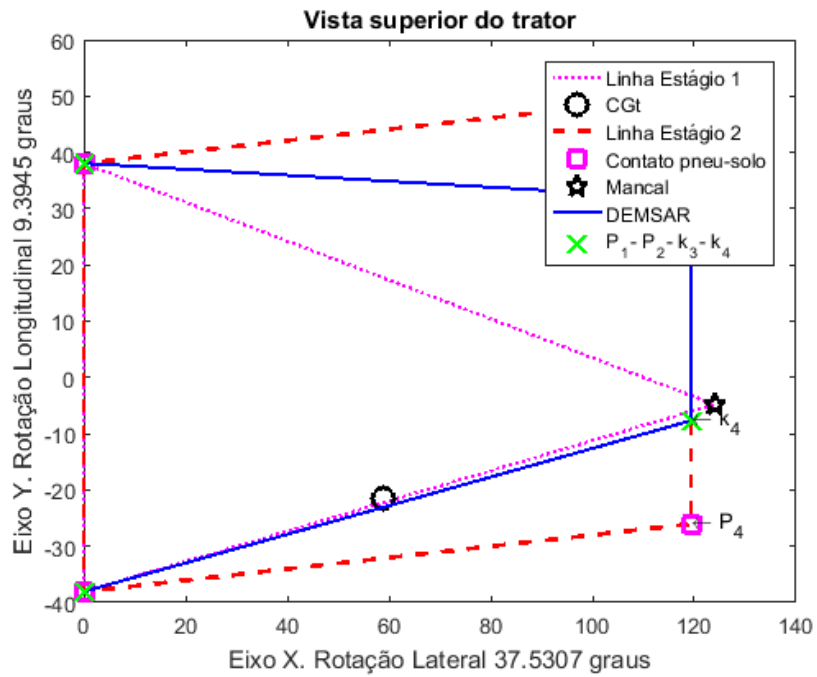
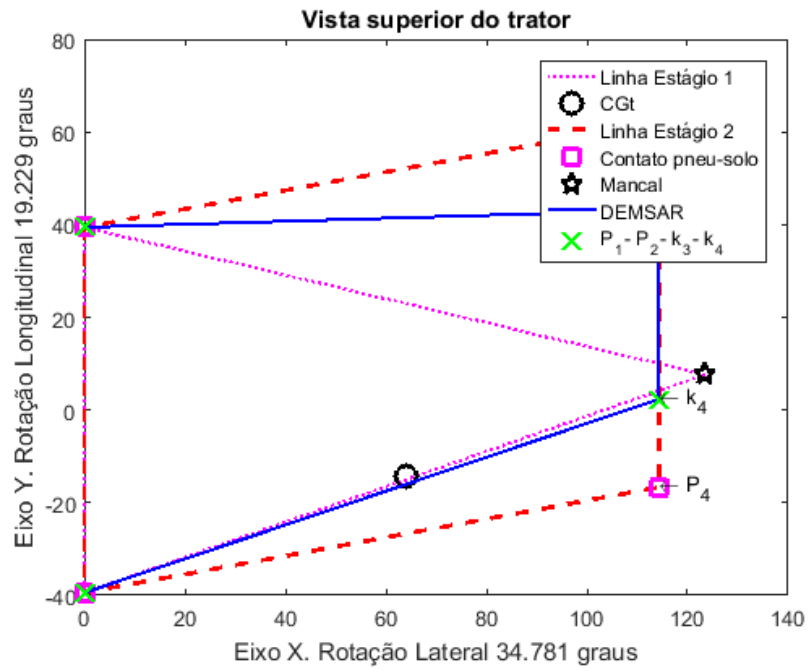


Figura 5.10 – Teste 9:  $\phi = 105^\circ, \theta = 39,1^\circ$



Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.11 – Teste 10:  $\phi = 120^\circ, \theta = 41,2^\circ$ .



Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.12 – Teste 11:  $\phi = 135^\circ, \theta = 46,3^\circ$

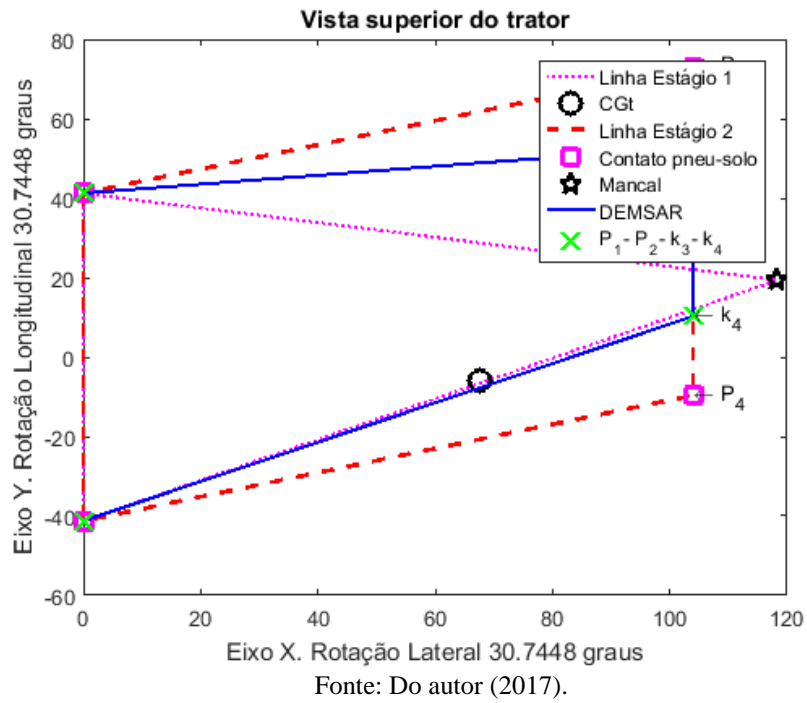
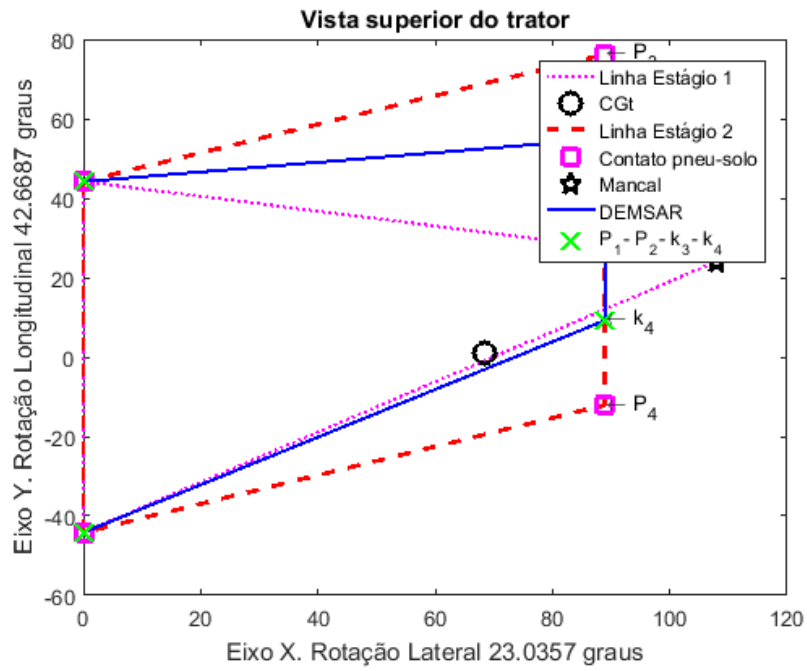


Figura 5.13 – Teste 12:  $\phi = 150^\circ, \theta = 51,5^\circ$ .



Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.14 – Teste 13:  $\phi = 165^\circ, \theta = 57,0^\circ$

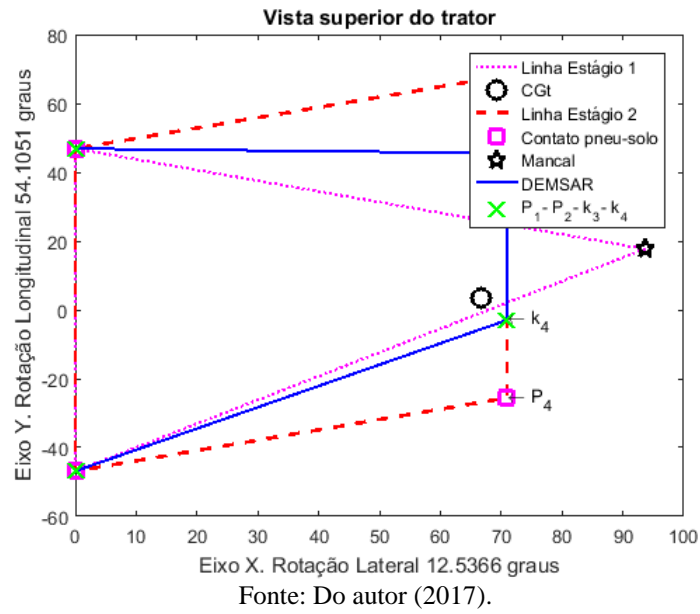
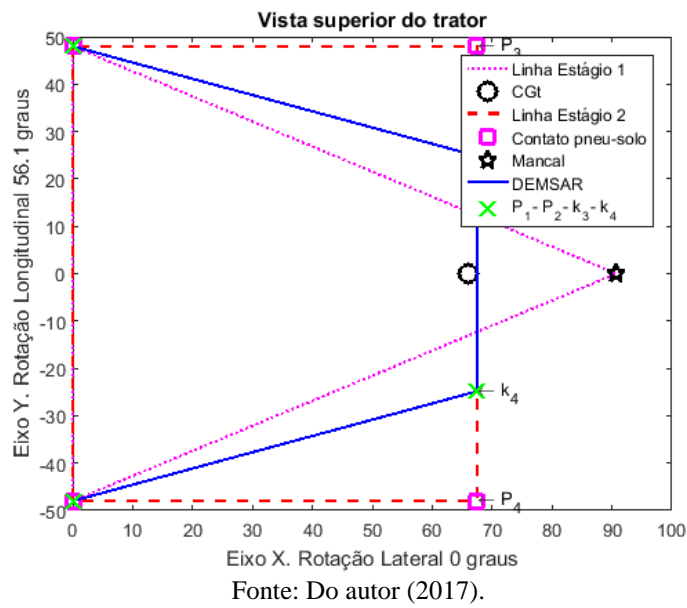


Figura 5.15 – Teste 14:  $\phi = 180^\circ, \theta = 56,1^\circ$





Na Figura 5.3, tem-se o trator inclinado longitudinalmente em  $49,0^\circ$ . Nota-se que o centro de gravidade encontra-se acima do eixo traseiro, na condição de perda da estabilidade. Na Figura 5.4, verifica-se o trator inclinado na condição de perda da estabilidade estática, na combinação de inclinação transversal e longitudinal. Nota-se que o centro de gravidade encontra-se próximo ao eixo traseiro (linha  $P_1P_2$ ).

A Figura 5.5 mostra o centro de gravidade um pouco mais interno à região de estabilidade. Entretanto, encontra-se numa região de transição em torno do ângulo  $P_1\widehat{P_2}k_4$ , o que mostra que o modelo de rotação do chassi da região estável (quadrangular) é apenas uma simplificação para a verificação da estabilidade estática.

Nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e Fig. 5.12, observa-se o centro de gravidade muito próximo da linha  $P_2k_4$ , o que mostra no limiar para a condição de perda da estabilidade estática. A Figura 5.15 mostra que, no limiar da condição de estabilidade estática, o centro de gravidade encontra-se muito próximo à linha  $k_3k_4$  (ou também definida pelos pontos  $P_3$  e  $P_4$ ).

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram o centro de gravidade muito próximo à linha  $P_2k_4$ . Entretanto pode-se notar que, à medida que o centro de gravidade se aproxima do ângulo  $P_2\widehat{k_4}k_3$ , o centro de gravidade deixa de tangenciar a linha  $P_2k_4$ , porém em menor escala do que o caso da Figura 5.5. A partir das figuras analisadas, percebe-se que a linha  $P_2P_M$  aproxima-se mais da verificação da estabilidade estática. Os experimentos mostram a correlação entre o modelo de rotação do chassi e a curva mostrada na Figura 5.1. A região do triângulo  $P_1P_2P_M$  mostrou-se mais fiável para análise do que o trapézio  $P_1P_2k_3k_4$  apresentado por Demsar, Bernik e Duhovnik (2012), para regiões de aclive, pois a projeção do mancal não ultrapassa a linha formada pelos pontos  $P_3$  e  $P_4$ . Em regiões de declive, a projeção do mancal ultrapassa a linha  $P_3P_4$ ; logo, a região

de estabilidade se transforma no trapézio  $P_1P_2k_3k_4$  em que o centro de gravidade deve permanecer em seu interior.

## 5.2 Os experimentos de Khoury Junior (2000)

Khoury Junior (2000) apresenta resultados de experimentos estáticos e dinâmicos. Os experimentos de números 7 ao 12 foram realizados com o trator encontrando-se parado. Os dados do trator estão listados na Tabela 5.3.

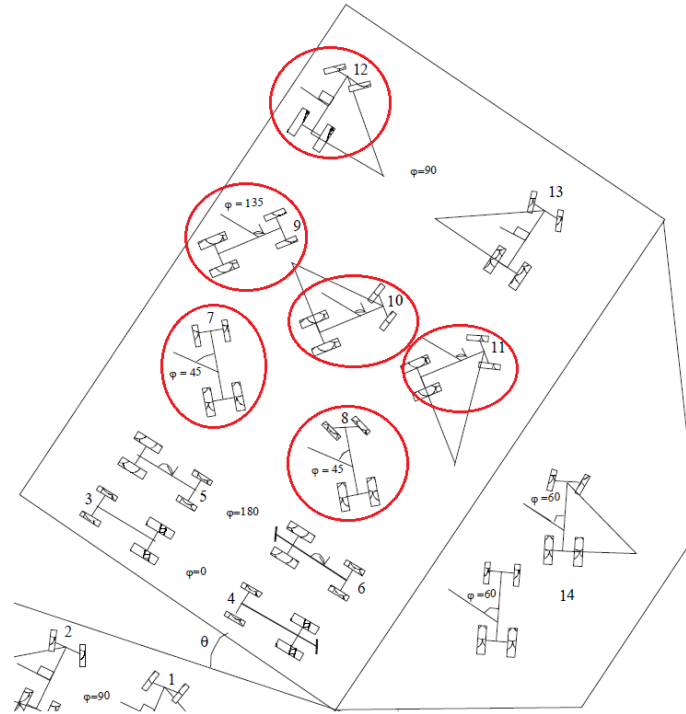
A Figura 5.16 apresenta os valores angulares do trator na condição da perda da estabilidade, cujos experimentos em condição estática estão marcados com círculos (experimentos de 7 a 12). A análise, a seguir, visa utilizar os ângulos encontrados no experimento de Khoury Junior (2000) no modelo de rotação do trator.

Tabela 5.3 – Parâmetros para cálculo de rotação.

Ponto	Descrição
$e_T = 1,44$ m	ponto de contato do pneu traseiro esquerdo com o solo
$e_D = 1,44$ m	ponto de contato do pneu traseiro direito com o solo
$XL = 1,95$ m	ponto virtual abaixo do mancal de contato com o solo
$X_{cgp} = 0,706$ m	Abscissa do centro de gravidade parcial
$Y_{cgp} = -0,024$ m	Ordenada centro de gravidade parcial
$Z_{cgp} = 0,945$ m	Cota do centro de gravidade parcial
$X_{cgt} = 0,798$ m	Abscissa do centro de gravidade total
$Y_{cgt} = -0,022$ m	Ordenada centro de gravidade total
$Z_{cgt} = 0,911$ m	Cota centro de gravidade total
$Z_M = 0,46$ m	Cota do mancal

Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.16 – Experimento de Khoury Junior.



Fonte: Khoury Junior (2000).

Figura 5.17 – Trecho dos resultados de Khoury Junior.

Testes	Ângulo de inclinação				Condição de apoio rodados	Ângulo de inclinação do chassis simulado e experimental (graus)
	tombamento experimental (graus)	limite simulado (graus)	limite pela equação ASHBURNER (graus)	limite pela equação de MIALHE (graus)		
7	39	36,70	34,38	38,30	B	40,5-44**
8	39	36,90	34,38	38,30	B	40,5-44**
9	38	34,65	34,38	38,30	B	40,5-44**
10	37,3	36,70	34,38	38,30	A	40,5-41**
11	36,4	36,90	34,38	38,30	A	40,5-42**
12	35,9	34,65	34,38	38,30	A	40,5-41**

Testes de 1 a 6 foram dinâmicos, e os de 7 a 12 estáticos.

Testes de 1 a 7 e 10,  $P_{fd}=165$ ,  $P_{re}=124$ ,  $P_{td}=76$ ,  $P_{te}=48$ , (kPa).

Testes 8 e 11,  $P_{fd}=165$ ,  $P_{re}=165$ ,  $P_{td}=83$ ,  $P_{te}=83$ , (kPa).

Testes 9 e 12,  $P_{fd}=165$ ,  $P_{re}=165$ ,  $P_{td}=28$ ,  $P_{te}=83$ , (kPa).

A = testes de tombamento com o trator apoiado com os rodados sobre uma pista de mesma inclinação.

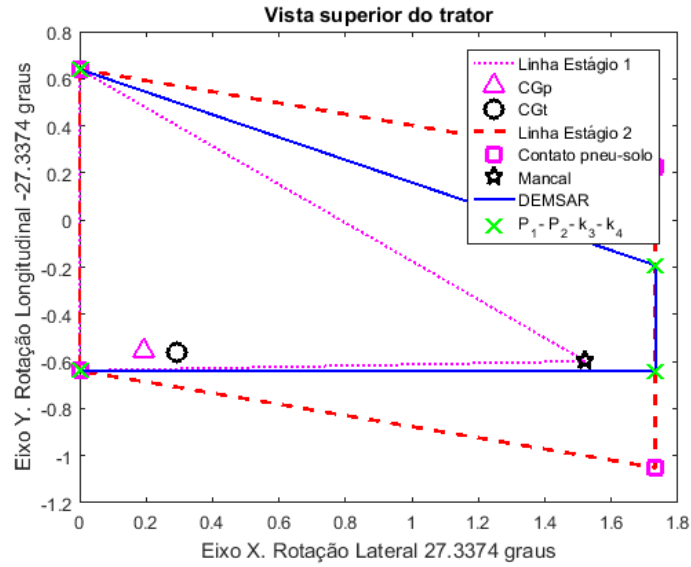
B = testes de tombamento com o trator apoiado com os rodados do lado do tombamento sobre pista plana, e os do outro, sobre pista inclinada.

\* = testes com os pneus frontais em linha reta.

\*\* = ângulos de inclinação do chassis medidos na iminência do tombamento.

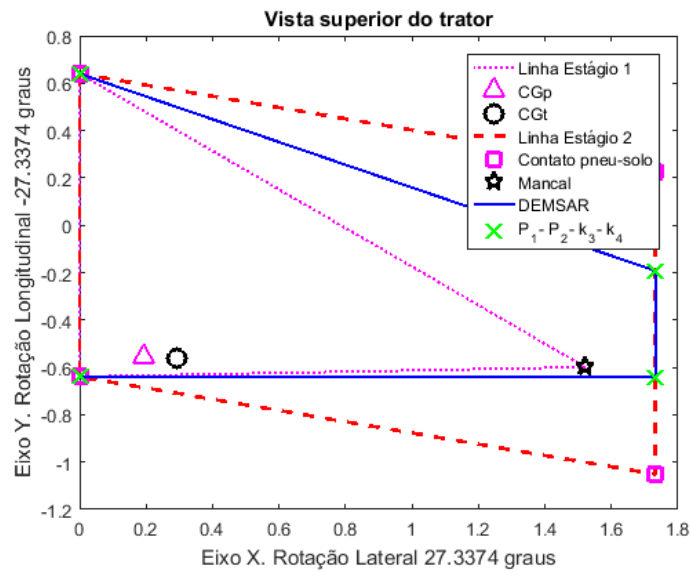
Fonte: Khoury Junior (2000).

Figura 5.18 – Experimento 7:  $\phi = 45^\circ, \theta = 39^\circ$ .



Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.19 – Experimento 8:  $\phi = 45^\circ, \theta = 39^\circ$ .



Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.20 – Experimento 9:  $\phi = 135^\circ, \theta = 38^\circ$ .

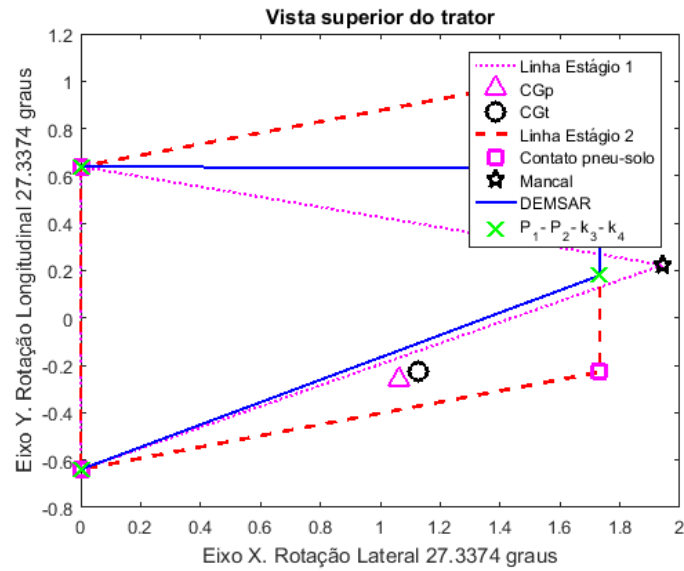


Figura 5.21 – Experimento 10:  $\phi = 135^\circ, \theta = 37,3^\circ$ .

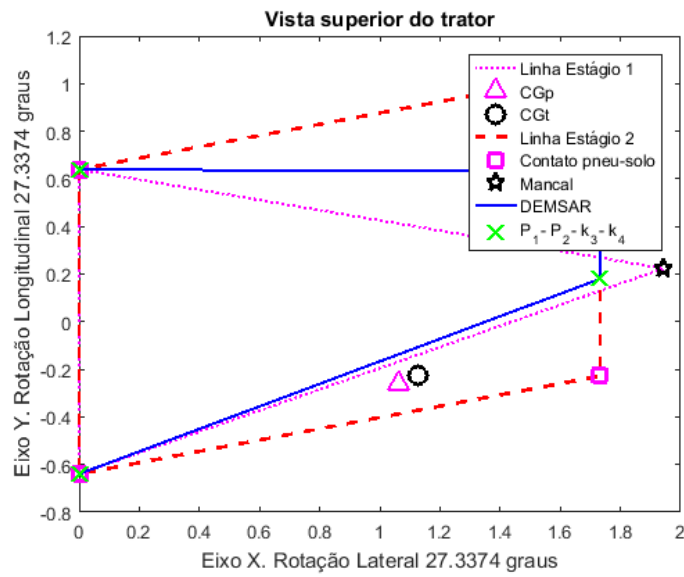
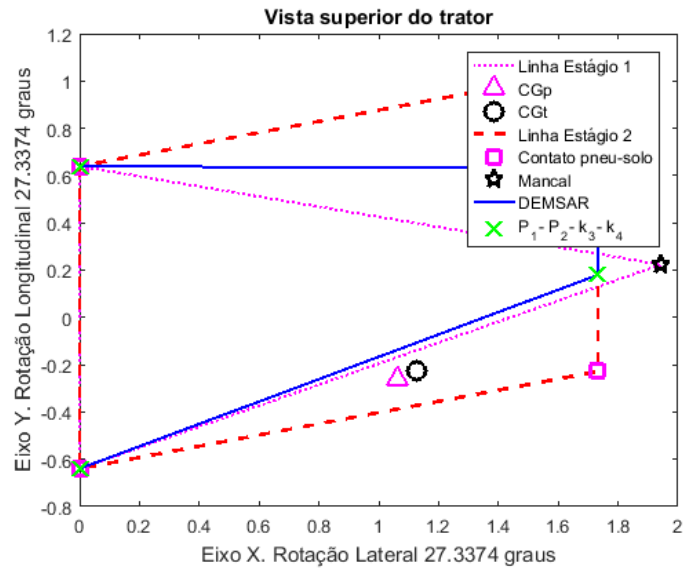
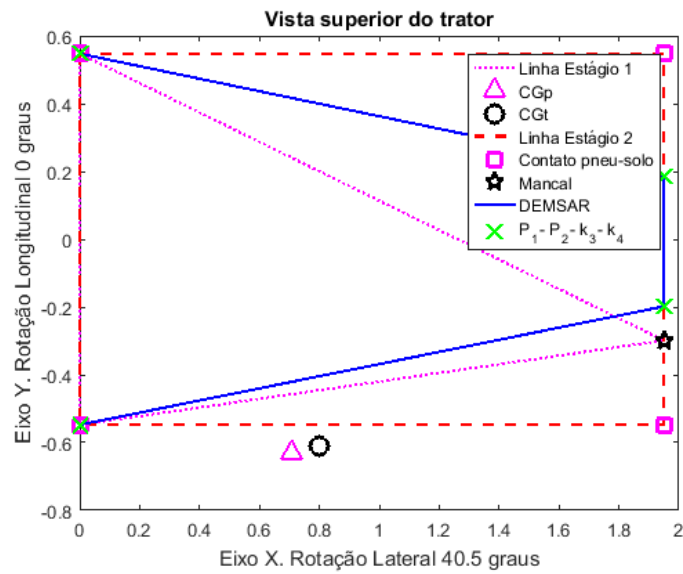


Figura 5.22 – Experimento 11:  $\phi = 135^\circ, \theta = 36,4^\circ$ .



Fonte: Do autor (2017).

Figura 5.23 – Experimento 12:  $\phi = 90^\circ, \theta = 35,9^\circ$ .



Fonte: Do autor (2017).

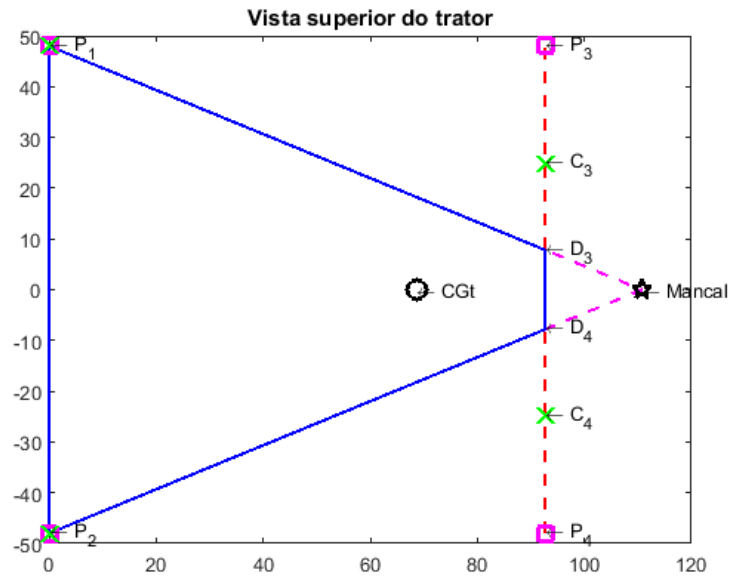
As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam a condição de tombamento. O centro de gravidade total e parcial encontra-se próximo da linha  $P_2P_M$ . O esterçamento dos pneus não influenciou os ângulos de tombamento, uma vez que o centro de gravidade encontra-se próximo ao pneu traseiro direito ( $P_2$ ).

As Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23 mostram os centros de gravidade acompanhando a linha  $P_2P_M$ . O fato de terem ultrapassado a região de estabilidade do trapézio  $P_1P_2k_3k_4$  pode ter ocorrido pela forma de constatação da perda da estabilidade estática, caracterizado pela ausência de força normal em, pelo menos, uma das rodas do trator, que, no caso experimental, foi constatada pelo tombamento.

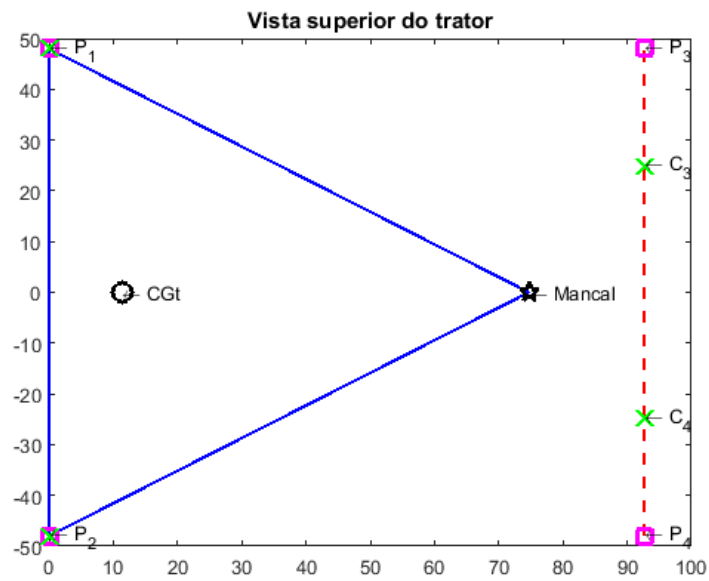
### **5.3 Algoritmo de verificação da estabilidade estática**

Observando os experimentos e os modelos expostos nos experimentos, adotou-se um modelo trapezoidal e outro triangular. O modelo de rotação trapezoidal ocorre em declives, visto na Figura 5.24(a). O modelo de rotação triangular ocorre em aclives, visto na Figura 5.24(b).

Figura 5.24 – Modelo gráfico de Rotação.



(a) declive



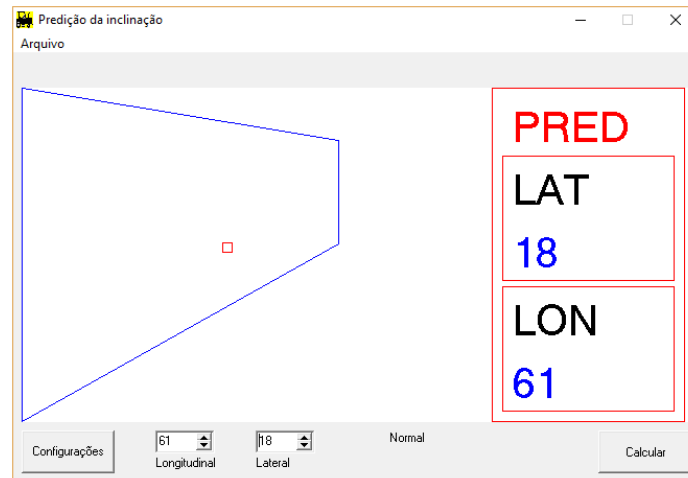
(b) active

Fonte: Do autor (2017).

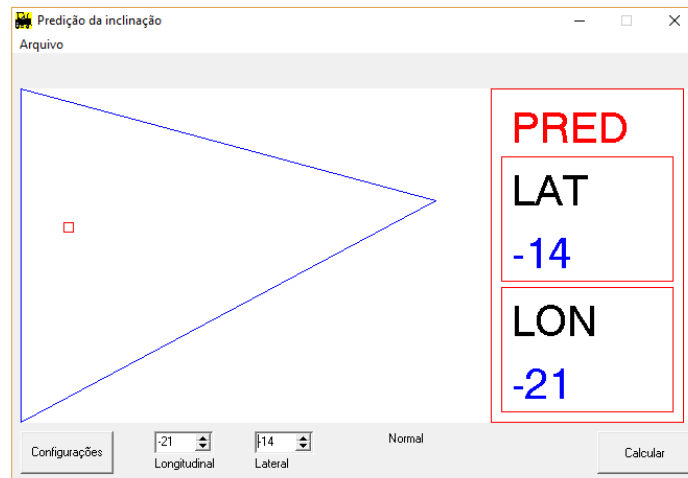


O algoritmo de verificação da estabilidade estática pode ser desenvolvido, em qualquer linguagem de programação, exigindo pouco processamento. Neste trabalho, o algoritmo foi escrito em Matlab, C++ e Object Pascal (Delphi).

Figura 5.25 – Interface gráfica.



(a) declive



(b) declive

Fonte: Do autor (2017).

A Figura 5.25(a) mostra a interface em declive. A Figura 5.25(b) mostra o modelo de rotação de verificação da estabilidade estática, em aclone, desenvolvido em Object Pascal, utilizando o componente Image (REISDORPH, 1999).

#### **5.4 Conclusões do capítulo**

Neste capítulo, foram utilizados dados de publicações, para a validação do modelo, apresentando gráficos que simplificam a visualização da estabilidade estática do trator, demonstrando que a estabilidade estática pode ser mostrada graficamente em ambiente embarcado, com baixo poder de processamento, por meio da utilização de resultados de trabalhos publicados por outros autores, testando-se dois modelos de representação da região de estabilidade estática, o modelo triciclo e o modelo trapezoidal. Realizou-se a validação do modelo de rotação do chassi do trator, mostrando, graficamente, a localização do centro de gravidade. Foi mostrado que os dois modelos gráficos apresentados funcionam satisfatoriamente como forma de visualizar a condição de estabilidade estática do trator, mas adotando-se o modelo triciclo por parecer visualmente mais prático, por diferenciar graficamente quando a máquina agrícola estiver em aclone ou em declive.

Foi constatado um desvio, quando o centro de gravidade se encontra na região próxima aos pneus traseiros, em que se perde a estabilidade sem que haja a saída do centro de gravidade da área de estabilidade estática. O modelo de rotação do chassi pode ser utilizado tanto para a verificação da estabilidade atual quanto para verificação da estabilidade estática futura, baseando-se nas previsões das inclinações transversal e longitudinal.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO: TESTES COM TRATOR

Neste capítulo, são apresentados os resultados de medição realizados com trator, os quais podem ser vistos na Figura 6.1. Dividiu-se o procedimento das medições em 4 ensaios, chamados de A, B, C e D. Cada ensaio consiste na medição que permite a predição da inclinação do próximo procedimento de medição, realizando-se 5 medições. No ensaio C, realizaram-se 6 medições por haver uma pequena mudança de inclinação e por se tratar de um procedimento em terreno plano. Os ensaios B e D foram realizados em rampas, para permitir a realização de medições com inclinações maiores. O procedimento A foi realizado em plano inclinado para permitir a medição e predição das inclinações transversal e longitudinal. Em cada procedimento de predição, foram medidas as distâncias dos sensores ao solo e as inclinações transversal, longitudinal e do eixo dianteiro. Inicialmente, deve-se realizar o ajuste de zero (*AjZ*), ou seja, o trator deve estar num plano horizontal, para verificar a distância dos sensores até o plano horizontal e as inclinações medidas que correspondem à inclinação residual, que deve ser subtraída pelas medições realizadas no experimento. O experimento consistiu na realização de medição manual e de medição eletrônica. A medição manual baseou-se em utilizar fita métrica para detectar a distância entre o sensor e o solo e em utilizar o inclinômetro para a medição das inclinações transversal, longitudinal e do ângulo do eixo dianteiro. A medição eletrônica baseou-se em adquirir os dados dos sensores ultrassônicos e os dados do sensor de orientação.

Deve-se ter ciência de que os ensaios realizados estiveram sujeitos a erros de medição, dos quais suas fontes podem ser citadas:

1. Desalinhamento entre o medidor de inclinação (sensor de orientação e inclinômetro) e os eixos do trator.

2. Desalinhamento dos sensores de distância. Os sensores podem não ter sido instalados ortogonalmente ao plano do trator. Não foi possível, durante o experimento, reproduzir uma linha ortogonal ao plano do trator para identificar a distância do sensor ao solo.
3. Superfície não plana na região de alcance dos sensores. Uma vez que os sensores ultrassônicos detectam uma região, com raio em cerca de 30 cm, a área de detecção pode ser irregular.
4. Deformação dos pneus do trator. A força estática aplicada nos pneus depende das inclinações do trator, havendo, portanto, deformações nos pneus com intensidades diferentes em cada procedimento.
5. Distância entre os sensores ultrassônicos e os eixos do trator. A distância do ponto de instalação dos sensores aos eixos não foram exatamente as mesmas, havendo uma diferença de distâncias de até 10 cm entre os sensores dianteiros e traseiros. Isso significa que os pontos de medição não coincidem com os pontos dos pneus do procedimento de predição posterior, como visto na Figura 3.1.
6. Capacidade de detecção do sinal PWM por parte do microcontrolador. Utilizou-se um microcontrolador de 84 MHz, 32 bits, para captação dos sinais PWM, podendo haver atrasos por interrupções concorrentes.
7. Impossibilidade de determinação do ponto de detecção do sensor ultrassônico para a medição da distância com a fita métrica. Uma vez que não é praticável identificar a exata região de detecção do solo pelo sensor, durante o procedimento, impossibilita-se a identificação do local exato para medir a altura do sensor com a fita métrica.
8. Irregularidades do plano horizontal no ajuste de zero. Qualquer imperfeição do local influencia nos cálculos de predição da inclinação do trator.

9. Desalinhamento entre o eixo dianteiro e a marcação no chão, como visto na Figura 6.2. Essas linhas são regiões de medição do sensor em que o pneu deverá estar na próxima medição.

Figura 6.1 – Trator utilizado no experimento.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 6.2 – Marcação do ponto de medição do sensor.



Fonte: Do autor (2017).



A Figura 6.3 mostra o ponto de medição da inclinação transversal do trator pelo inclinômetro.

Figura 6.3 – Ponto de medição da inclinação transversal.



Fonte: Do autor (2017).

A Figura 6.4 mostra o ponto de medição da inclinação longitudinal do trator pelo inclinômetro.

Figura 6.4 – Ponto de medição da inclinação longitudinal.



Fonte: Do autor (2017).

A Figura 6.5 mostra o ponto de medição da inclinação do eixo dianteiro do trator pelo inclinômetro. A chapa metálica é utilizada para refletir o sinal ultrassônico e detectar a distância pelo sensor  $S_5$ .



Figura 6.5 – Ponto de medição da inclinação do eixo dianteiro.



Fonte: Do autor (2017).

Os parâmetros do trator são mostrados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros do trator, em milímetros.

Parâmetro	Valor [mm]	Descrição
$e_T$	1730	Eixo traseiro
$e_D$	1730	Eixo dianteiro
$Z_M$	520	Altura do mancal
$d_D$	525	Distância transversal do sensor de medição do eixo dianteiro
$XL$	2380	Distância entre eixos

Fonte: Do autor (2017).

### 6.1 Os ensaios com trator

Foi utilizado o trator Massey Ferguson 290, visto na Figura 6.1. O procedimento do Ajuste de Zero foi realizado, no Galpão de Máquinas da UFLA, por possuir um terreno plano e horizontal, mostrado na Figura 6.6. Para comparar os resultados da medição manual e eletrônica, foi realizada uma

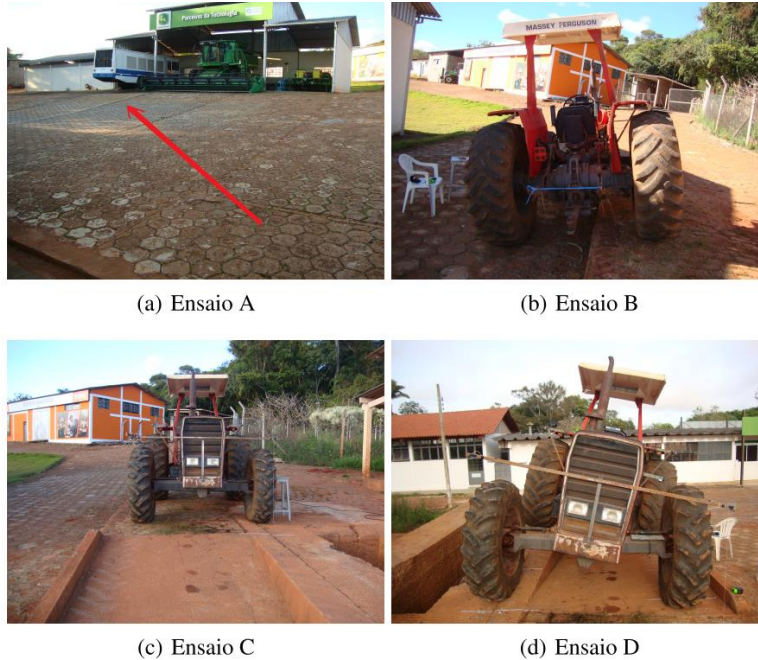
comparação estatística, cujos resultados encontram-se no Apêndice B. Algumas imagens dos ensaios podem ser vistas na Figura 6.7.

Figura 6.6 – Procedimento do Ajuste de Zero.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 6.7 – Fotos dos ensaios.



(a) Ensaio A

(b) Ensaio B

(c) Ensaio C

(d) Ensaio D

Fonte: Do autor (2017).

Na Figura 6.7(a) tem-se uma foto do pátio em que se realizou o Ensaio A, o qual se caracteriza por ser uma região inclinada plana, em que há pouca variação da inclinação. A seta indicada na figura mostra a direção do experimento, em que se obtêm as inclinações transversal e longitudinal negativas (ver Figura 3.5). Na Figura 6.7(b) tem-se uma foto em que o trator realiza o Ensaio B, em que a inclinação longitudinal é quase constante e negativa (aclive) e com variações da inclinação transversal (negativa, ver Figura 3.5). Na Figura 6.7(c) tem-se uma foto do ensaio C, em que se inicia no plano e a inclinação transversal é aumentada gradativamente. O ângulo do eixo dianteiro também aumenta gradativamente.

Na Figura 6.7(d) tem-se uma foto do ensaio D, em que se inicia com grande inclinação transversal e, aos poucos, vai sendo diminuída, assim como o ângulo dianteiro (ver Figura 3.4).

## 6.2 Medição manual

Os dados de ajuste de zero (AjZ) são mostrados na Tabela 6.2. Os dados dos sensores  $S_{iAjZ}$ ,  $\{i = 1,2,3,4,5\}$  estão em milímetros, e os dados dos ângulos  $\alpha_{AjZ}$ ,  $\beta_{AjZ}$  e  $\delta'_{AjZ}$  estão em graus.

Tabela 6.2 – Dados da medição manual do Ajuste de Zero.

Ensaio	$\rho_{1AjZ}$	$\rho_{2AjZ}$	$\rho_{3AjZ}$	$\rho_{4AjZ}$	$\rho_{5AjZ}$	$\beta_{AjZ}$	$\alpha_{AjZ}$	$\delta'_{AjZ}$
AjZ	1543	1535	1185	1195	620	-0,8	0	1,2

Fonte: Do autor (2017).

A Tabela 6.3 descreve os parâmetros utilizados, nas tabelas a seguir, a fim de facilitar a sua identificação.

Tabela 6.3 – Parâmetros utilizados nas tabelas de dados de medição.

Parâmetro	Descrição
$\rho_{iAjZ}$	Medição do ajuste de zero do sensor Si
$\rho_{iM}$	Medição bruta do sensor Si
$\rho_i$	Cálculo da medição do sensor Si (após ajuste de zero)
$\beta_{AjZ}$	Ajuste de zero da inclinação longitudinal
$\beta_M$	Medição bruta da inclinação longitudinal
$\beta$	Cálculo da inclinação longitudinal (após ajuste de Zero)
$\alpha_{AjZ}$	Ajuste de zero da inclinação lateral
$\alpha_M$	Medição bruta da inclinação lateral
$\alpha$	Cálculo da inclinação lateral (após ajuste de Zero)
$\delta'_{AjZ}$	Medição de ajuste de zero da inclinação do eixo dianteiro
$\delta'_M$	Medição da inclinação do eixo dianteiro
$\delta'$	Cálculo do ângulo entre o eixo dianteiro e o chassi por meio da diferença entre inclinação do chassi e do eixo dianteiro
$\delta$	Cálculo do ângulo entre o eixo dianteiro e o chassi por meio do sensor 5

Fonte: Do autor (2017).

Os dados de medição manual do trator são mostrados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Dados da medição manual do trator.

Ensaio	$\rho_{1M}$	$\rho_{2M}$	$\rho_{3M}$	$\rho_{4M}$	$\rho_{5M}$	$\beta_M$	$\alpha_M$	$\delta'_M$
A1	1548	1530	1205	1173	629	-7,9	-6,5	-6,7
A2	1559	1528	1203	1212	629	-8,1	-7,1	-7,1
A3	1545	1537	1198	1261	619	-7,9	-7,6	-6,5
A4	1524	1528	1151	1292	605	-7,1	-7,7	-5,1
A5	1520	1512	1150	1305	582	-6	-7,5	-2,3
B1	1515	1580	1085	1300	575	-2,3	-16,4	-10,7
B2	1515	1573	1088	1284	580	-2,5	-14,7	-9,1
B3	1526	1558	1112	1315	588	-2,8	-12,9	-7,9
B4	1514	1551	1087	1247	582	-2,4	-11,1	-5,6
B5	1522	1557	1087	1220	592	-2,8	-9,4	-4,9
C1	1542	1529	1178	1185	619	-0,8	0,5	1,7
C2	1543	1541	1195	1294	620	-1	0,5	1,8
C3	1543	1513	1118	1340	592	0,2	1	5,4
C4	1500	1527	1024	1367	547	1,8	0,7	9,5
C5	1470	1600	954	1380	528	3,3	2	13,4
C6	1470	1591	940	1360	530	3,7	6,6	18,1
D1	1487	1610	984	1441	521	-5,1	-17	-5,1
D2	1487	1613	1058	1418	528	-4,8	-12,8	-1,4
D3	1453	1580	1120	1353	549	-3,8	-8,7	0
D4	1445	1560	1156	1267	587	-2,3	-4,8	-0,3
D5	1540	1538	1183	1175	622	-0,8	-0,9	-0,1

Fonte: Do autor (2017).

Os experimentos A, B, C e D correspondem às medições obtidas em quatro ensaios, cada um com 4 ou 5 predições. As colunas 2, 3, 4 e 5 correspondem, respectivamente, às medições dos sensores  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$ , em milímetros. A coluna 6 corresponde ao sensor  $S_5$ , que mede o ângulo do eixo dianteiro, em milímetros. A coluna 7 corresponde à inclinação longitudinal; a

coluna 8, à inclinação transversal; e a coluna 9 corresponde à inclinação do eixo dianteiro, em graus.

A Tabela 6.5 corresponde aos valores da Tabela 6.4 subtraídos dos dados de ajuste de zero (AjZ), mostrados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Dados após ajuste de zero da medição manual.

Ensaio	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$\beta$	$\alpha$	$\delta$	$\delta'$
A1	-5	5	-20	22	-9	-7,1	-6,5	-1,0	-1,4
A2	-16	7	-18	-17	-9	-7,3	-7,1	-1,0	-1,2
A3	-2	-2	-13	-66	1	-7,1	-7,6	0,1	-0,1
A4	19	7	34	-97	15	-6,3	-7,7	1,6	1,4
A5	23	23	35	-110	38	-5,2	-7,5	4,1	4,0
B1	28	-45	100	-105	45	-1,5	-16,4	4,9	4,5
B2	28	-38	97	-89	40	-1,7	-14,7	4,4	4,4
B3	17	-23	73	-120	32	-2	-12,9	3,5	3,8
B4	29	-16	98	-52	38	-1,6	-11,1	4,1	4,3
B5	21	-22	98	-25	28	-2,0	-9,4	3,1	3,3
C1	1	6	7	10	1	0,0	0,5	0,1	0,0
C2	0	-6	-10	-99	0	-0,2	0,5	0,0	0,1
C3	0	22	67	-145	28	1,0	1,0	3,1	3,2
C4	43	8	161	-172	73	2,6	0,7	7,9	7,6
C5	73	-65	231	-185	92	4,1	2,0	9,9	10,2
C6	73	-56	245	-165	90	4,5	6,6	9,7	10,3
D1	56	-75	201	-246	99	-4,3	-17,0	10,7	10,7
D2	56	-78	127	-223	92	-4,0	-12,8	9,9	10,2
D3	90	-45	65	-158	71	-3,0	-8,7	7,7	7,5
D4	98	-25	29	-72	33	-1,5	-4,8	3,6	3,3
D5	3	-3	2	20	-2	0,0	-0,9	-0,2	-0,4

Fonte: Do autor (2017).

A Equação 6.1 é utilizada para os sensores  $i = 1,2,3,4,5$ .

$$\rho_i = \rho_{i_{Ajz}} - \rho_{i_M} \quad (6.1)$$

A equação 6.2 é utilizada nos dados da inclinação transversal; a equação 6.3 é utilizada para os dados da inclinação longitudinal; e a equação 6.4 é utilizada para calcular o ângulo do eixo dianteiro, a partir do sensor ultrassônico  $S_5$ .

$$\alpha = \alpha_M - \alpha_{Ajz} \quad (6.2)$$

$$\beta = \beta_M - \beta_{Ajz} \quad (6.3)$$

$$\delta = \text{atan}\left(\frac{\rho_5}{d_D}\right) \quad (6.4)$$

O ângulo do eixo dianteiro também pode ser calculado, a partir das medições do inclinômetro, utilizando-se a equação 6.5.

$$\delta' = \alpha - (\delta'_M - \delta'_{Ajz}) \quad (6.5)$$

A predição da inclinação transversal é calculada pela equação 3.5 reescrita pela equação 6.6.

$$\alpha_{pred} = \text{atan}\left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{e_T}\right) + \alpha \quad (6.6)$$

A predição da inclinação longitudinal é calculada pela equação 3.6, reescrita pela equação 6.7, equação 6.8 e equação 6.9.

$$\beta_{pred} = atan\left(\frac{\rho_0 - \rho_Z}{X_L}\right) + \beta \quad (6.7)$$

Em que:

$$\rho_Z = \frac{\rho_3 + \rho_4}{2} \quad (6.8)$$

$$\rho_0 = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad (6.9)$$

A predição do ângulo do eixo dianteiro é reescrita pela equação 6.10.

$$\delta_{pred} = atan\left(\frac{\rho_3 - \rho_4}{e_D}\right) - atan\left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{e_T}\right) \quad (6.10)$$

Os resultados da predição e medição do ângulo longitudinal, em graus, são mostrados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Cálculos da predição e Resultados da medição manual.

(Continua)

Ensaio	$\beta$	$\beta_{pred}$	$\alpha$	$\alpha_{pred}$	$\delta$	$\delta'$	$\delta_{pred}$
A1 - A2	-7,3	-7,12	-7,1	-6,83	-1,0	-1,2	-1,06
A2 - A3	-7,1	-6,99	-7,6	-7,86	0,1	-0,1	0,73
A3 - A4	-6,3	-6,2	-7,7	-7,6	1,6	1,4	1,75
A4 - A5	-5,2	-5,23	-7,5	-7,3	4,1	4,0	3,93
B1 - B2	-1,7	-1,64	-14,7	-13,98	4,4	4,4	4,34
B2 - B3	-2,0	-1,92	-12,9	-12,52	3,5	3,8	3,95
B3 - B4	-1,6	-1,51	-11,1	-11,58	4,1	4,3	5,04
B4 - B5	-2,0	-2	-9,4	-9,61	3,1	3,3	3,47



Tabela 6.6 – Cálculos da predição e Resultados da medição manual.

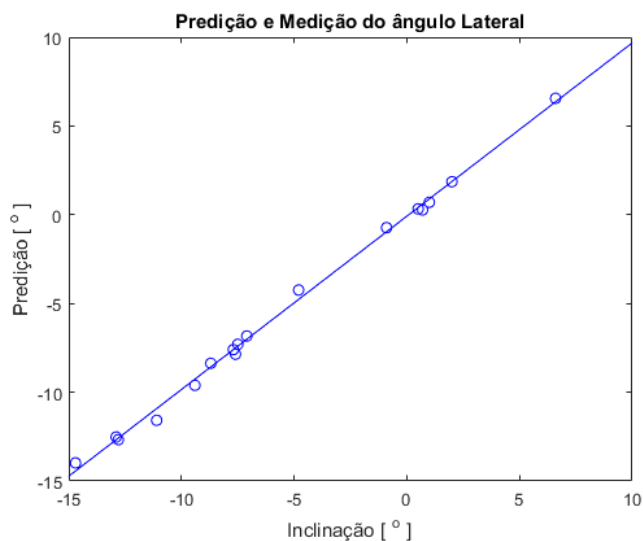
(Conclusão)

Ensaio	$\beta$	$\beta_{pred}$	$\alpha$	$\alpha_{pred}$	$\delta$	$\delta'$	$\delta_{pred}$
C1 - C2	-0,2	-0,12	0,5	0,33	0,0	0,1	0,07
C2 - C3	1,0	1,04	1,0	0,7	3,1	3,2	2,75
C3 - C4	2,6	2,2	0,7	0,27	7,9	7,6	7,71
C4 - C5	4,1	3,35	2,0	1,86	9,9	10,2	9,74
C5 - C6	4,5	3,64	6,6	6,56	9,7	10,3	8,96
D1 - D2	-4,0	-3,99	-12,8	-12,67	9,9	10,2	10,16
D2 - D3	-3,0	-3,11	-8,7	-8,37	7,7	7,5	7,01
D3 - D4	-1,5	-1,34	-4,8	-4,24	3,6	3,3	2,88
D4 - D5	0,0	-0,1	-0,9	-0,73	-0,2	-0,4	-0,73

Fonte: Do autor (2017).

O gráfico da Figura 6.8 apresenta os dados da inclinação transversal da Tabela 6.6. Os cálculos estatísticos são  $\alpha_{pred} = 0,97626 \cdot \alpha - 0,082998$ , correlação  $corr = 0,9987$  e  $R^2 = 0,997$ .

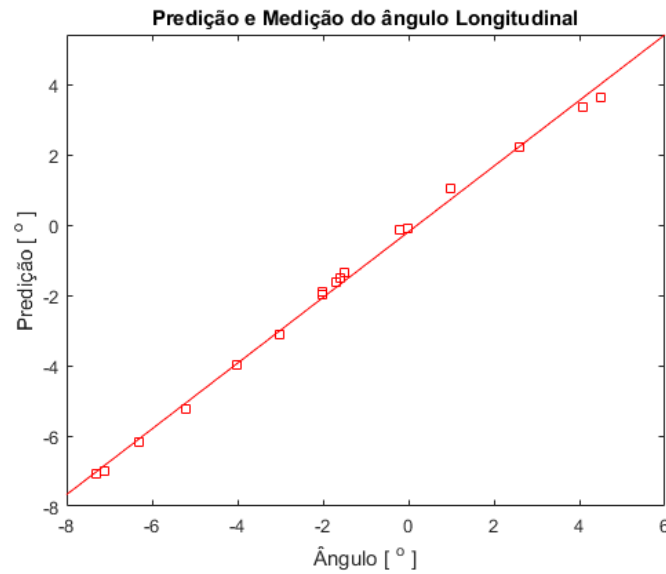
Figura 6.8 – Regressão da inclinação Lateral.



Fonte: Do autor (2017).

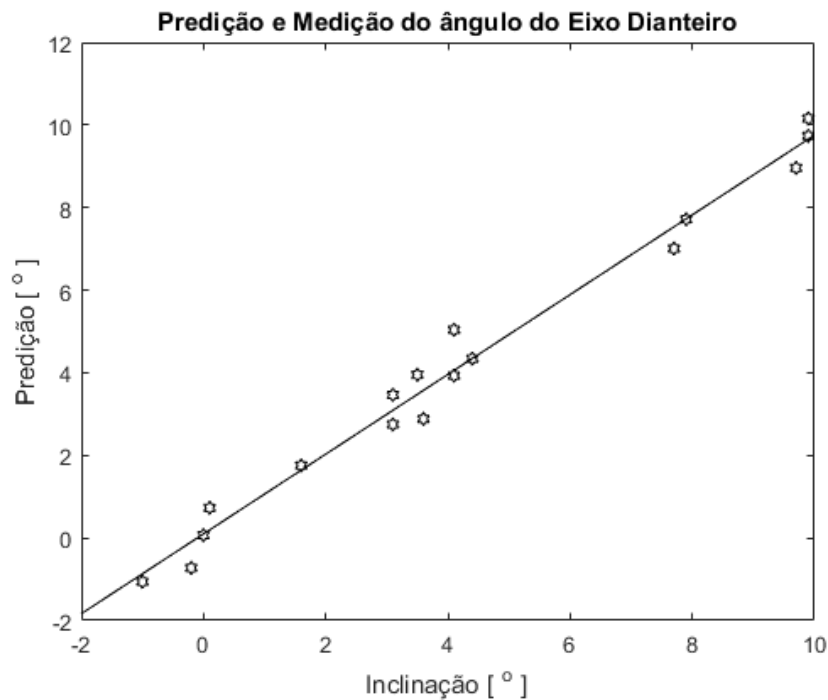
O gráfico da Figura 6.9 apresenta os dados da inclinação longitudinal da Tabela 6.6, cujos cálculos de regressão linear são  $\beta_{\text{pred}} = 0,93465 \cdot \beta - 0,19182$ , correlação corr = 0,9983 e  $R^2 = 0,996$ .

Figura 6.9 – Regressão da inclinação Longitudinal.



O gráfico da Figura 6.10 apresenta os dados do ângulo do eixo dianteiro da Tabela 6.6, cujos cálculos de regressão linear são  $\delta_{\text{pred}} = 0,96576 \cdot \delta + 0,097134$ , correlação corr = 0,9914 e  $R^2 = 0,982$ .

Figura 6.10 – Regressão do ângulo do Eixo Dianteiro.



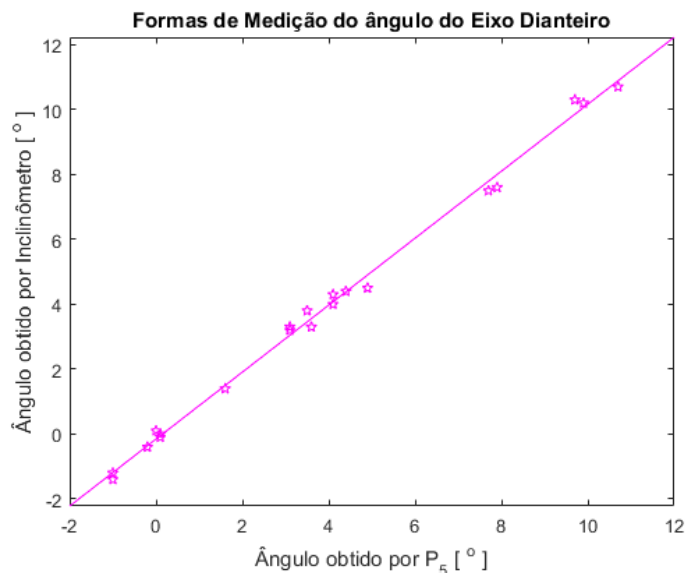
Fonte: Do autor (2017).

### 6.2.1 Comparando formas de medir o ângulo do eixo

Com base nos dados obtidos, é possível medir o ângulo do eixo dianteiro de duas formas, como mostrado nas equações 6.5 e 6.10. A primeira equação utiliza os dados do inclinômetro, enquanto a segunda utiliza os dados de medição de distância.

A Figura 6.11 mostra a regressão obtida pela comparação dos resultados alcançados pelas duas metodologias de obtenção do ângulo do eixo dianteiro. Os dados de regressão linear da Figura 6.11 são  $\delta'_{pred} = 1,032 \cdot \delta_{pred} - 0,155033$ , correlação  $\text{corr} = 0,9982$  e  $R^2 = 0,996$ , indicando que os dois métodos são equivalentes. Dessa forma, opta-se pela utilização dos dados de distância, pois podem ser melhor comparados com a medição manual.

Figura 6.11 – Regressão de comparação entre os dois métodos.



Fonte: Do autor (2017).

### 6.3 Medição eletrônica

A medição, por meio de microcontrolador e sensores, foi realizada paralelamente ao procedimento manual, com a finalidade de possibilitar o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico de predição da inclinação que possa ser instalado em um trator, que seja de custo acessível e possa complementar os sistemas

de proteção e de segurança existentes.

Nesta seção, são apresentados os resultados calculados, a partir dos dados obtidos pelo acelerômetro e a partir do inclinômetro – este por ser mais preciso e aquele por enviar dados ao microcontrolador, embora menos preciso.

#### 6.3.1 Utilizando ultrassônicos e sensor de orientação

Nesta etapa, foram utilizados os sensores ultrassônicos, para a medição de distância, e o sensor de orientação para a medição das inclinações.

A Tabela 6.7 apresenta os dados do Ajuste de Zero.

Tabela 6.7 – Dados do Ajuste de Zero da medição eletrônica.

<b>Ensaio</b>	$\rho_{1AjZ}$	$\rho_{2AjZ}$	$\rho_{3AjZ}$	$\rho_{4AjZ}$	$\rho_{5AjZ}$	$\beta_{AjZ}$	$\alpha_{AjZ}$
AjZ	1538,66	1525,17	1190,39	1191,77	622,26	8,05	0

Fonte: Do autor (2017).

Os dados obtidos pelo circuito eletrônico são apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Dados da medição eletrônica.

(Continua)

<b>Ensaio</b>	$\rho_{1M}$	$\rho_{2M}$	$\rho_{3M}$	$\rho_{4M}$	$\rho_{5M}$	$\beta_M$	$\alpha_M$
A1	1556,52	1533,30	1212,00	1179,98	634,36	-0,49	-6,36
A2	1567,40	1524,77	1212,41	1202,64	636,2	-0,65	-7,02
A3	1553,04	1541,01	1207,65	1272,17	619,72	-0,41	-7,91
A4	1531,11	1530,43	1151,00	1292,00	605,00	1,00	-8,09
A5	1513,45	1515,41	1165,57	1311,83	578,5	2,17	-7,89
B1	1507,70	1572,54	1069,55	1302,40	579,2	5,75	-17,70
B2	1492,50	1582,34	1071,5	1282,24	577,58	5,81	-16,04
B3	1520,90	1573,28	1094,85	1312,82	582,23	5,66	-14,18
B4	1490,18	1546,00	1071,69	1240,15	573,41	6,05	-12,06
B5	1507,23	1545,62	1080,13	1213,92	586,08	5,68	-10,13
C1	1545,77	1537,79	1191,21	1205,67	618,33	8,10	0,79
C2	1549,44	1543,87	1198,82	1293,08	617,10	8,06	0,81
C3	1534,64	1500,33	1125,49	1321,85	587,62	9,42	1,43
C4	1501,36	1541,54	1027,67	1361,36	545,26	11,04	1,35
C5	1462,92	1582,90	957,79	1381,00	515,74	12,48	2,84
C6	1459,62	1566,82	897,64	1345,08	512,36	13,10	7,34

Tabela 6.8 – Dados da medição eletrônica.

(Conclusão)

Ensaio	$\rho_{1M}$	$\rho_{2M}$	$\rho_{3M}$	$\rho_{4M}$	$\rho_{5M}$	$\beta_M$	$\alpha_M$
D1	1430,94	1549,00	958,02	1380,46	525,82	2,95	-17,66
D2	1460,97	1568,89	1077,1	1382,88	526,53	3,67	-13,03
D3	1447,49	1555,26	1125,77	1351,04	551,33	4,48	-8,94
D4	1451,72	1546,21	1166,78	1292,41	590,68	6,20	-4,81
D5	1666,00	1530,47	1283,30	1199,58	630,77	8,03	-0,51

Fonte: Do autor (2017).

Ao utilizarem-se as equações 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, tem-se a Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Dados após ajuste de zero da medição eletrônica.

(Continua)

Ensaio	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$\beta$	$\alpha$	$\delta$
A1	-17,9	-8,1	-21,6	11,8	-12,1	-8,5	-7,3	-1,3
A2	-28,7	0,4	-22,0	-10,9	-13,9	-8,7	-7,9	-1,5
A3	-14,4	-15,8	-17,3	-80,4	2,5	-8,5	-8,8	0,3
A4	7,6	-5,3	39,4	-100,2	17,3	-7,0	-9,0	1,9
A5	25,2	9,8	24,8	-120,1	43,8	-5,9	-8,8	4,8
B1	31,0	-47,4	120,8	-110,6	43,1	-2,3	-18,6	4,7
B2	46,2	-57,2	118,9	-90,5	44,7	-2,2	-17,0	4,9
B3	17,8	-48,1	95,5	-121,0	40,0	-2,4	-15,1	4,4
B4	48,5	-20,8	118,7	-48,4	48,8	-2,0	-13,0	5,3
B5	31,4	-20,4	110,3	-22,1	36,2	-2,4	-11,0	3,9
C1	-7,1	-12,6	-0,8	-13,9	3,9	0,1	-0,1	0,4
C2	-10,8	-18,7	-8,4	-101,3	5,2	0,0	-0,1	0,6
C3	4,0	24,8	64,9	-130,1	34,6	1,4	0,5	3,8
C4	37,3	-16,4	162,7	-169,6	77,0	3,0	0,4	8,3
C5	75,7	-57,7	232,6	-189,2	106,5	4,4	1,9	11,5
C6	79,0	-41,7	292,8	-153,3	109,9	5,1	6,4	11,8

Tabela 6.9 – Dados após ajuste de zero da medição eletrônica.

(Conclusão)

Ensaio	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$\beta$	$\alpha$	$\delta$
D1	107,7	-23,8	232,4	-188,7	96,4	-5,1	-18,6	10,4
D2	77,7	-43,7	113,3	-191,1	95,7	-4,4	-13,9	10,3
D3	91,2	-30,1	64,6	-159,3	70,9	-3,6	-9,9	7,7
D4	86,9	-21,0	23,6	-100,6	31,6	-1,8	-5,7	3,4
D5	-127,3	-5,3	-92,9	-7,8	-8,5	0,0	-1,4	-0,9

Fonte: Do autor (2017).

Os dados de predição e medição das inclinações transversal, longitudinal e ângulo do eixo dianteiro são mostrados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Cálculos da predição e Resultados da medição eletrônica.

(Continua)

Ensaio	$\beta$	$\beta_{pred}$	$\alpha$	$\alpha_{pred}$	$\delta$	$\delta_{pred}$
A1 - A2	-8,7	-8,7	-7,9	-6,8	-1,5	-0,8
A2 - A3	-8,5	-8,6	-8,8	-8,1	0,3	0,6
A3 - A4	-7,0	-7,7	-9,0	-7,6	1,9	2,0
A4 - A5	-5,9	-6,3	-8,8	-7,3	4,8	4,2
B1 - B2	-2,2	-2,6	-17,0	-13,8	4,9	5,0
B2 - B3	-2,4	-2,7	-15,1	-11,3	4,4	3,5
B3 - B4	-2,0	-2,4	-13,0	-10,7	5,3	5,0
B4 - B5	-2,4	-2,5	-11,0	-8,8	3,9	3,2
C1 - C2	0,0	0,0	-0,1	0,7	0,6	0,3
C2 - C3	1,4	1,0	0,5	0,8	3,8	2,8
C3 - C4	3,0	2,5	0,4	0,3	8,3	7,1
C4 - C5	4,4	3,3	1,9	2,5	11,5	9,1
C5 - C6	5,1	4,1	6,4	6,4	11,8	9,3

Tabela 6.10 – Cálculos da predição e Resultados da medição eletrônica.

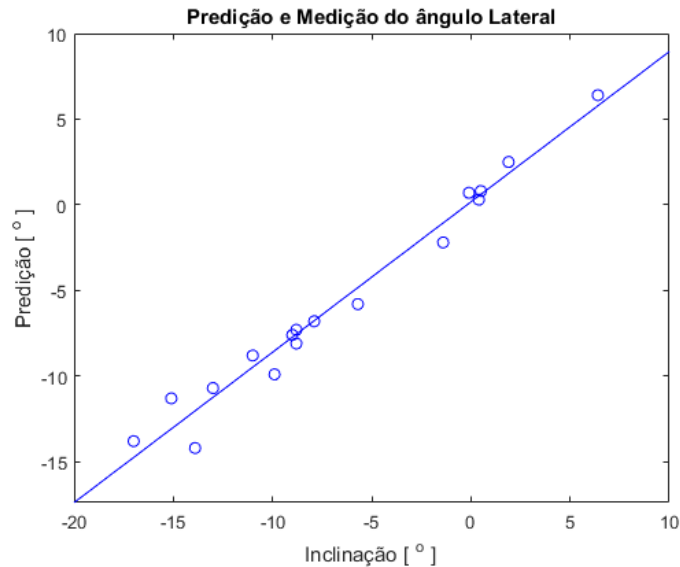
(Conclusão)

Ensaio	$\beta$	$\beta_{pred}$	$\alpha$	$\alpha_{pred}$	$\delta$	$\delta_{pred}$
D1 - D2	-4,4	-4,6	-13,9	-13,3	10,3	9,3
D2 - D3	-3,6	-3,0	-9,9	-9,0	7,7	6,0
D3 - D4	-1,8	-1,7	-5,7	-4,9	3,4	3,4
D4 - D5	0,0	-0,1	-1,4	-1,2	-0,9	0,5

Fonte: Do autor (2017).

O gráfico da Figura 6.12 apresenta os dados da inclinação transversal da Tabela 6.10, cujos cálculos de regressão linear são  $\alpha_{pred} = 0,87753 \cdot \alpha + 0,16674$ , correlação corr = 0,9867 e  $R^2 = 0,972$ .

Figura 6.12 – Regressão da Inclinação Lateral.

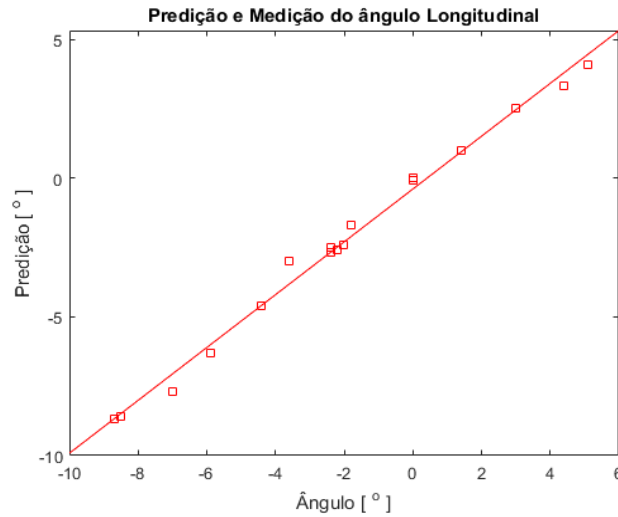


Fonte: Do autor (2017).

O gráfico da Figura 6.13 apresenta os dados da inclinação longitudinal da Tabela 6.10, cujos cálculos de regressão linear são  $\beta_{pred} = 0,95218 \cdot \beta - 0,39257$ , correlação corr = 0,9959 e  $R^2 = 0,991$ .

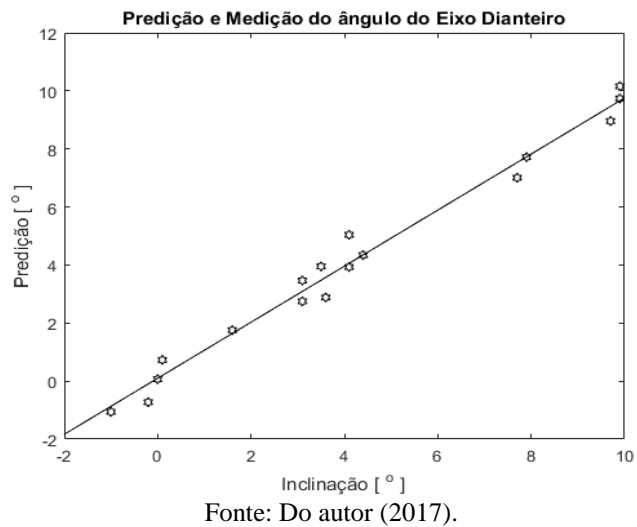


Figura 6.13 – Regressão da Inclinação Longitudinal.



O gráfico da Figura 6.14 apresenta os dados do ângulo do eixo dianteiro da Tabela 6.10, cujos cálculos de regressão linear são  $\delta_{\text{pred}} = 0,77645 \cdot \delta + 0,47034$ , correlação  $\text{corr} = 0,9893$  e  $R^2 = 0,977$ .

Figura 6.14 – Regressão do ângulo do Eixo Dianteiro.



Comparando-se os resultados da medição manual e eletrônica, notou-se que houve uma perda da precisão, quando analisados o fator  $R^2$  e as equações da reta obtidas (idealmente deveriam ser  $\text{Pred} = 1 \cdot \text{Med} + 0$ ). Uma hipótese para isso se deve ao sensor de orientação, que variou em quase  $1^\circ$  em medições em repouso, ao passo que o inclinômetro digital encontrou-se invariável, com resolução de  $0,1^\circ$ . Diante disso, fez-se necessário utilizar os dados do inclinômetro em vez do sensor de orientação, cujos dados são mostrados no item 6.3.2.

### 6.3.2 Utilizando ultrassônicos e inclinômetro

Para verificar se a precisão do medidor de inclinação pode influenciar na precisão da predição, utilizaram-se os dados de medição da inclinação obtidos pelo inclinômetro em vez do sensor de orientação. A Tabela 6.11 apresenta os dados do ajuste de zero, já vistos.

Tabela 6.11 – Dados do Ajuste de Zero da medição.

Ensaio	$\rho_{1AjZ}$	$\rho_{2AjZ}$	$\rho_{3AjZ}$	$\rho_{4AjZ}$	$\rho_{5AjZ}$	$\beta_{AjZ}$	$\alpha_{AjZ}$
AjZ	1538,66	1525,17	1190,39	1191,77	622,26	-0,8	0,0

Fonte: Do autor (2017).

A Tabela 6.12 apresenta os resultados de medição utilizando-se os sensores ultrassônicos. As inclinações apresentadas são do inclinômetro (as mesmas do procedimento manual).

Tabela 6.12 – Dados da medição.

Ensaio	$\rho_{1M}$	$\rho_{2M}$	$\rho_{3M}$	$\rho_{4M}$	$\rho_{5M}$	$\beta_M$	$\alpha_M$
A1	1556,52	1533,3	1212	1179,98	634,36	-7,9	-6,5
A2	1567,4	1524,77	1212,41	1202,64	636,2	-8,1	-7,1
A3	1553,04	1541,01	1207,65	1272,17	619,72	-7,9	-7,6
A4	1531,11	1530,43	1151	1292	605	-7,1	-7,7
A5	1513,45	1515,41	1165,57	1311,83	578,5	-6	-7,5
B1	1507,7	1572,54	1069,55	1302,4	579,2	-2,3	-16,4
B2	1492,5	1582,34	1071,5	1282,24	577,58	-2,5	-14,7
B3	1520,9	1573,28	1094,85	1312,82	582,23	-2,8	-12,9
B4	1490,18	1546	1071,69	1240,15	573,41	-2,4	-11,1
B5	1507,23	1545,62	1080,13	1213,92	586,08	-2,8	-9,4
C1	1545,77	1537,79	1191,21	1205,67	618,33	-0,8	0,5
C2	1549,44	1543,87	1198,82	1293,08	617,1	-1	0,5
C3	1534,64	1500,33	1125,49	1321,85	587,62	0,2	1
C4	1501,36	1541,54	1027,67	1361,36	545,26	1,8	0,7
C5	1462,92	1582,9	957,79	1381	515,74	3,3	2
C6	1459,62	1566,82	897,64	1345,08	512,36	3,7	6,6
D1	1430,94	1549	958,02	1380,46	525,82	-5,1	-17
D2	1460,97	1568,89	1077,1	1382,88	526,53	-4,8	-12,8
D3	1447,49	1555,26	1125,77	1351,04	551,33	-3,8	-8,7
D4	1451,72	1546,21	1166,78	1292,41	590,68	-2,3	-4,8
D5	1666	1530,47	1283,3	1199,58	630,77	-0,8	-0,9

Fonte: Do autor (2017).

Após o ajuste de zero (A jZ ), tem-se a Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Dados após ajuste de zero.

Ensaio	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$\beta$	$\alpha$	$\delta$
A1	-17,9	-8,1	-21,6	11,8	-12,1	-7,1	-6,5	-1,3
A2	-28,7	0,4	-22,0	-10,9	-13,9	-7,3	-7,1	-1,5
A3	-14,4	-15,8	-17,3	-80,4	2,5	-7,1	-7,6	0,3
A4	7,6	-5,3	39,4	-100,2	17,3	-6,3	-7,7	1,9
A5	25,2	9,8	24,8	-120,1	43,8	-5,2	-7,5	4,8
B1	31,0	-47,4	120,8	-110,6	43,1	-1,5	-16,4	4,7
B2	46,2	-57,2	118,9	-90,5	44,7	-1,7	-14,7	4,9
B3	17,8	-48,1	95,5	-121,0	40,0	-2,0	-12,9	4,4
B4	48,5	-20,8	118,7	-48,4	48,8	-1,6	-11,1	5,3
B5	31,4	-20,4	110,3	-22,1	36,2	-2,0	-9,4	3,9
C1	-7,1	-12,6	-0,8	-13,9	3,9	0,0	0,5	0,4
C2	-10,8	-18,7	-8,4	-101,3	5,2	-0,2	0,5	0,6
C3	4,0	24,8	64,9	-130,1	34,6	1,0	1,0	3,8
C4	37,3	-16,4	162,7	-169,6	77,0	2,6	0,7	8,3
C5	75,7	-57,7	232,6	-189,2	106,5	4,1	2,0	11,5
C6	79,0	-41,7	292,8	-153,3	109,9	4,5	6,6	11,8
D1	107,7	-23,8	232,4	-188,7	96,4	-4,3	-17,0	10,4
D2	77,7	-43,7	113,3	-191,1	95,7	-4,0	-12,8	10,3
D3	91,2	-30,1	64,6	-159,3	70,9	-3,0	-8,7	7,7
D4	86,9	-21,0	23,6	-100,6	31,6	-1,5	-4,8	3,4
D5	-127,3	-5,3	-92,9	-7,8	-8,5	0,0	-0,9	-0,9

Fonte: Do autor (2017).

Os dados de predição e medição das inclinações transversal, longitudinal e ângulo do eixo dianteiro são mostrados na Tabela 6.14.

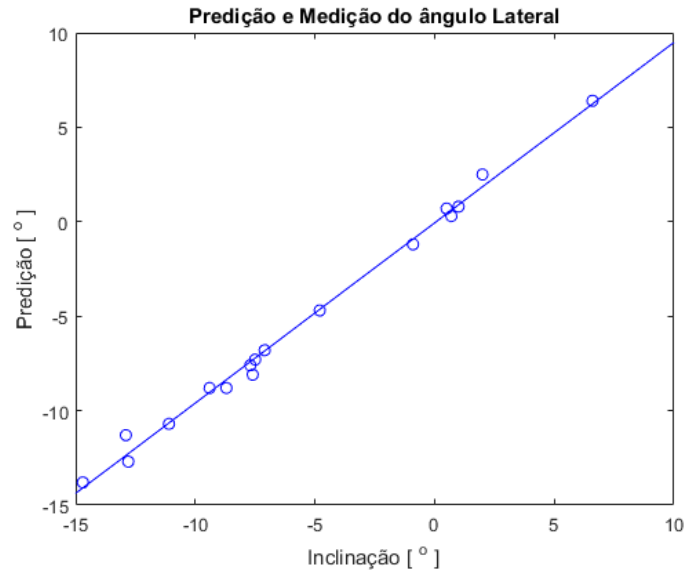
Tabela 6.14 – Cálculos da predição e Resultados da medição.

Ensaio	$\beta$	$\beta_{pred}$	$\alpha$	$\alpha_{pred}$	$\delta$	$\delta_{pred}$
A1 - A2	-7,3	-7,3	-7,1	-6,8	-1,5	-0,8
A2 - A3	-7,1	-7,2	-7,6	-8,1	0,3	0,6
A3 - A4	-6,3	-6,3	-7,7	-7,6	1,9	2
A4 - A5	-5,2	-5,5	-7,5	-7,3	4,8	4,2
B1 - B2	-1,7	-1,8	-14,7	-13,8	4,9	5
B2 - B3	-2	-2,2	-12,9	-11,3	4,4	3,5
B3 - B4	-1,6	-2,1	-11,1	-10,7	5,3	5
B4 - B5	-2	-2,1	-9,4	-8,8	3,9	3,2
C1 - C2	-0,2	-0,1	0,5	0,7	0,6	0,3
C2 - C3	1	0,8	1	0,8	3,8	2,8
C3 - C4	2,6	2,1	0,7	0,3	8,3	7,1
C4 - C5	4,1	2,9	2	2,5	11,5	9,1
C5 - C6	4,5	3,8	6,6	6,4	11,8	9,3
D1 - D2	-4	-3,8	-12,8	-12,7	10,3	9,3
D2 - D3	-3	-2,7	-8,7	-8,8	7,7	6
D3 - D4	-1,5	-1,1	-4,8	-4,7	3,4	3,4
D4 - D5	0	0,2	-0,9	-1,2	-0,9	0,5

Fonte: Do autor (2017).

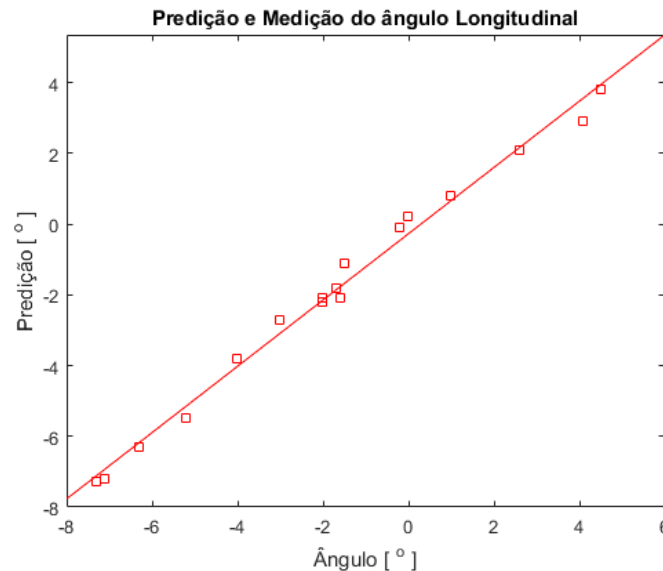
O gráfico da Figura 6.15 apresenta os dados de inclinação transversal da Tabela 6.14, cujos cálculos de regressão linear são  $\alpha_{pred} = 0,95457 \cdot \alpha - 0,058178$ , correlação  $corr = 0,9973$  e  $R^2 = 0,994$ .

Figura 6.15 – Regressão da Inclinação Lateral.



O gráfico da Figura 6.16 apresenta os dados de inclinação longitudinal da Tabela 6.14, cujos cálculos de regressão linear são  $\beta_{\text{pred}} = 0,93745 \cdot \beta - 0,26811$ , correlação  $\text{corr} = 0,9952$  e  $R^2 = 0,99$ .

Figura 6.16 – Regressão da Inclinação Longitudinal.



Os resultados, para o cálculo do ângulo do eixo dianteiro, são os mesmos dos dados com sensor de orientação, uma vez que estão relacionados diretamente às medidas dos sensores ultrassônicos, independentemente dos sensores de inclinação.

#### 6.4 Resumo e comentário dos resultados

Neste capítulo, foram apresentados os resultados dos ensaios de predição das inclinações transversal e longitudinal e do ângulo do eixo dianteiro. Os experimentos foram realizados com duas formas de medição das distâncias dos sensores ao solo, duas formas de medição das inclinações do chassi e, também, duas formas de medição do ângulo do eixo dianteiro (ângulo esse em relação ao plano do chassi). Uma comparação estatística foi realizada, para verificar a relação entre as medições manuais e eletrônicas, cujos resultados encontram-se no Apêndice B, mostrando uma forte correlação entre as medições manuais e as eletrônicas.

As medições manuais mostraram-se as mais precisas, alcançando-se grande correlação entre predição e medição dos ângulos. As medições com dispositivos eletrônicos (com sensores ultrassônicos e de orientação), também, mostraram-se satisfatórias, entretanto mostraram uma precisão inferior à medição manual. Para explicar essa diminuição da correlação, a hipótese levantada foi a imprecisão do sensor de orientação (cujos resultados foram mostrados no Capítulo 4). Diante disso, foram utilizados os dados dos sensores ultrassônicos e do inclinômetro, obtendo-se uma melhora na correlação dos dados de predição e de medição. Ainda assim, esses resultados mostraram-se levemente inferiores aos dados de medição manual. Hipóteses podem explicar o ocorrido: 1) o alinhamento não ortogonal dos sensores ultrassônicos ao plano do chassi e; 2) a natureza de aquisição do sensor ultrassônico, que capta a distância de um raio de 30 cm do solo.

Em todos os casos, a correlação entre predição e medição foi sempre superior a 0,9, o que demonstra que o sistema de predição da inclinação funciona de forma satisfatória.



## **7 CONCLUSÃO**

Neste trabalho, foi construído um sistema eletrônico capaz de antecipar as inclinações transversal e longitudinal de uma máquina agrícola.

Foram desenvolvidos algoritmos para o cálculo da inclinação atual e futura a partir dos dados de sensores.

Foi apresentada uma interface gráfica em ambiente embarcado que fornece as informações de inclinação (atual e predita) em tempo real.

O sistema, também, é capaz de determinar o ângulo atual e futuro do eixo dianteiro.

Ensaios com um trator agrícola foram realizados para validar o modelo de predição descrito neste trabalho.

Os resultados encontrados mostram que há uma forte correlação entre os resultados de medição e de predição.

### **7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

- a) Adequar o modelo de predição da estabilidade estática para outros veículos;
- b) Contemplar o modelo da deformação dos pneus, tanto para o cálculo da inclinação do chassi atual quanto para a predição da inclinação;
- c) Modelar o sistema para condição, em que houver o toque do eixo dianteiro no chassi, determinando-se, dentre outros, qual dos pneus deixará de tocar o solo;
- d) Reduzir a quantidade de sensores;
- e) Utilizar outros sensores para comparar os resultados.



## REFERÊNCIAS

ABU-HAMDEH, N. H.; AL-JALIL, H. F. Computer simulation of stability and control of tractor-trailed implement combinations under different operating conditions. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 1, p. 149-162, 2004.

ABUBAKAR, M. S.; AHMAD, D.; AKANDE, F. B. A review of farm tractor overturning accidents and safety. **Pertanika Journal of Science & Technology**, Selangor, v. 18, n. 2, p. 377-385, 2010.

AHMADI, I. Development of a tractor dynamic stability index calculator utilizing some tractor specifications. **Tourkish Journal of Agriculture and Forestry**, Yakutiye, v. 37, p. 203-211, 2013.

AHMADI, I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances: model development. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 48, n. 5, p. 339-346, 2011.

ARDUINO. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 3 jul. 2017.

BARGER, E. L. et al. **Tractors and their power units**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: J. Wiley, 1979.

BARGER, E. L. et al. **Tratores e seus motores**. Rio de Janeiro: E. Blucher, 1966. 398 p.

BARROS, P. R. P. **Simulação da capacidade de tração dianteira auxiliar em diferentes condições de superfície**. 2012. 78 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

BORDINI, G. **Method and device for longitudinally balancing an agricultural vehicle**. Patent US n. 2009/0043461 A1, 6 Mar. 2012.

CORRÊA, I. M.; YAMASHITA, R. Y. **Acidentes com tratores e a estrutura de proteção na capotagem**. 2009. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2009\\_1/Tratores/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2009_1/Tratores/index.htm)>. Acesso em: 15 mar. 2017.

CRAIG, J. J. **Robótica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

DEMSAR, I.; BERNIK, R.; DUHOVNIK, J. A mathematical model and numerical simulation of the static stability of a tractor. **Agriculturae Conspectus Scientificus**, Zagreb, v. 77, n. 3, p. 143-150, 2012.

DIAS, J. A. M. P. **Acidentes com tratores agrícolas**: a importância do arco e do cinto de segurança. Lisboa: Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2016. Disponível em: <[http://www.act.gov.pt/\(pt-PT\)/Campanhas/Campanhasrealizadas/PrevencaodeRiscosProfissionaisemMaquinaeEquipamentosdeTrabalho/Documents/14.00\\_Jo%C3%A3o%20Dias.pdf](http://www.act.gov.pt/(pt-PT)/Campanhas/Campanhasrealizadas/PrevencaodeRiscosProfissionaisemMaquinaeEquipamentosdeTrabalho/Documents/14.00_Jo%C3%A3o%20Dias.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2017.

EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. **Arduino em ação**. São Paulo: Novatec, 2013. 424 p.

FERNANDES, H. C. et al. Acidentes com tratores agrícolas: natureza, causas e consequências. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 22, p. 361-371, 2014.

FONSECA, A. **Curso de mecânica**: estática. 3. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1969. v. 1.

FRIEND, P. R. **Inclination determination system**. Patent US n. 2014/0067318 A1, 6 Mar. 2014.

GRAVALOS, I. et al. An experimental study on the impact of the rear track width on the stability of agricultural tractors using a test bench. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 48, n. 4, p. 319-323, 2011.

GRZEBIETA, R.; RECHNITZER, G.; SIMMONS, K. **Static stability test results**. Sydney: Transport and Road Safety, University of New South Wales, 2015. Disponível em: <[http://www.tars.unsw.edu.au/research/Current/Quad-Bike\\_Safety/Reports/Quad\\_Project\\_Final\\_Report1\\_Static\\_Stabilty\\_Test\\_Results\\_Jan-2015.pdf](http://www.tars.unsw.edu.au/research/Current/Quad-Bike_Safety/Reports/Quad_Project_Final_Report1_Static_Stabilty_Test_Results_Jan-2015.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2017.

HACKSPARK. Disponível em: <<http://hackspark.fr/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

HIBBELER, R. C. **Estática**: mecânica para engenharia. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 528 p.

KHOURY JUNIOR, C. R. **Estabilidade lateral de tratores agrícolas 4x2**. 2000. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

KHOURY JUNIOR, J. K. et al. Simulação da estabilidade de tratores agrícolas 4x2. **Bragantia**, Campinas, v. 68, p. 257-267, 2009.

KIM, P. **Kalman filter for beginners**. Seoul: A-JIN, 2010.

KISE, M.; ZHANG, Q. Sensor-in-the-loop tractor stability control: look-ahead attitude prediction and field tests. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 52, n. 1/2, p. 107-118, 2006.

KISE, M.; ZHANG, Q.; MÁŠ, F. R. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. **Biosystems Engineering**, London, v. 90, p. 357-367, 2004.

LEITE, F.; SANTOS, J. E. G. dos; LANÇAS, K. P. Acidentes com tratores agrícolas: natureza, causas e consequências. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, p. 40-51, 2010.

LI, Z. **Analysis and improvement of tractor lateral stability against rollover**. 2016. 94 p. Thesis (Ph.D. in Philosophy)-Kyushu University, Fukuoka, 2016.

LI, Z. et al. Parameter sensitivity for tractor lateral stability against phase 1 overturn on random road surfaces. **Biosystems Engineering**, London, v. 150, p. 10-23, 2016.

LI, Z. et al. Prediction of tractor sideslipping behavior using a quasi-static model. **Journal of the Faculty of Agriculture**, Fukuoka, v. 60, n. 1, p. 215-218, 2015.

LIMA, J. S. S. et al. Estimativa das estabilidades longitudinal e transversal de tratores florestais utilizados na colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 839-844, nov./dez. 2004.

LIU, J.; AYERS, P. D. Application of a tractor stability index for protective structure deployment. **Journal of Agricultural Safety and Health**, Saint Joseph, v. 4, p. 171-181, May 1998. Special issue.

LLERAS, N. O. et al. Assessing perceptions and alerts of tractor instability. **Chemical Engineering Transactions**, Milano, v. 58, p. 7-12, 2017.

MADEIRA, N. G. **Segurança no trabalho nas operações com tratores agrícolas em regiões de Minas Gerais**. 2011. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

MAXBOTIX. **HRLV-MaxSonar**: EZ series. 2014. Disponível em: <<http://www.maxbotix.com/>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EPU/EDUSP, 1980. v. 2, 367 p.

MINAKAWA, M. et al. Method for measuring force transmitted from road surface to tires and its applications. **JSAE Review**, Tokyo, v. 20, n. 4, p. 479-485, 1999.

MIZRAHI, V. V. **Treinamento em linguagem C**. 2. ed. São Paulo: Makron, 2008. 432 p.

MONK, S. **Programação com Arduino II**: passos avançados com sketches. Porto Alegre: Bookman, 2015. 247 p.

MONTEIRO, L. A.; ARBEX, P. R. **Acidentes com tratores**. 2012. Disponível em: <[https://acidentestrator.files.wordpress.com/2013/03/ufc\\_artigo\\_revista-agricola.pdf](https://acidentestrator.files.wordpress.com/2013/03/ufc_artigo_revista-agricola.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2017.

NAM, K.; FUJIMOTO, H.; HORI, Y. Lateral stability control of in-wheel-motor-driven electric vehicles based on sideslip angle estimation using lateral tire force sensors. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, New York, v. 61, n. 5, p. 1972-1985, June 2012.

OLIVEIRA, M. V. M. de et al. Declividade máxima permitida para uma colhedora de café trabalhando em regiões montanhosas. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 8., 2013, Salvador. **Anais...** Viçosa, MG: Ed. UFV, 2013. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/3859>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

PEREIRA, D. P. et al. Lateral stability limits of farm tractors for forest plantations in steep areas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 92, p. 433-439, dez. 2011.

RAZAVI, B. **Fundamentos de microeletrônica**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

REINA, G.; MILELLA, A. Towards autonomous agriculture: automatic ground detection using trinocular stereovision. **Molecular Diversity Preservation International**, Basel, v. 12, n. 9, p. 12405-12423, 2012.

REIS, A. V. **Acidentes com máquinas agrícolas**: texto de referência para técnicos e extensionistas. Pelotas: Ed. UFPel, 2009. 103 p.

REIS, G. L. dos; SILVA, V. V. da. **Geometria analítica**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

REISDORPH, K. **Delphi 4**: aprenda em 21 dias. São Paulo: M. Fontes, 1999.

ROSÁRIO, J. M. **Princípios de mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

SANTOS NETO, C. R. **Análise experimental da estabilidade direcional de veículos de rodas em terrenos declivosos**. 2012. 101 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

SCHLOSSER, J. F. et al. Caracterização dos acidentes com tratores agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 977-981, nov./dez. 2002.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. **Springer handbook of robotics**. Berlin: Springer, 2008. 1611 p.

SILVEIRA, G. M. de. **Os cuidados com o trator**. 2. ed. Rio de Janeiro: Globo Rural, 1988.

SORIANO AZORIN, J. J. **Automatic anti-rollover device**. Patent PCT WO, n. 2009/030797 A1, 13 Mar. 2009.

SPIANDORELLO, F. de M. et al. **Dispositivo eletrônico para avaliação do equilíbrio dinâmico operacional em veículos**. Patente INPI, n. BR10 2013 020302-5 A2, 8 mar. 2015.

STEINBRUCH, A.; WINTERLE, P. **Geometria analítica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

SUN, D. et al. A dynamic instability detection and prediction system for high clearance tractor. **IFAC-PapersOnLine**, Madrid, v. 49, n. 16, p. 50-54, 2016.

UNIVERSAL graphics library for 8 bit embedded systems. 2014. Disponível em: <<https://forum.arduino.cc>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

VARELLA, C. A. A.; KHOURY JUNIOR, J. K. **Estabilidade de tratores agrícolas de pneus**. Rio de Janeiro: Ed. UFRRJ, 2008. Disponível em: <[http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154\\_motores\\_e\\_tratores/Aulas/estabilidade%20de%20tratores%20agricolas.htm](http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/estabilidade%20de%20tratores%20agricolas.htm)>. Acesso em: 10 mar. 2017.

WHITEHEAD, R. et al. **A study of the effect of various vehicle properties on rollover propensity**. Warrendale: SAE International, 2004. 10 p.

YISA, M. G.; TERAOKA, H.; KUBOTA, M. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes: part II, computer simulation of directional dynamics. **Journal of the Faculty of Agriculture**, Sapporo, v. 66, n. 2, p. 263-275, 1995.



**APÊNDICE A – TESTE DOS ALGORITMOS DOS FILTROS DIGITAIS**

```

//----- AvgFilter
float prevAvg, kAVG;
float firstRunAVG;
//----- KF
float AKF, HKF, Q, R;
float xKF, P;
float firstRunKF;
//----- FPB
float prevX;
float firstRunFPB;
float alpha = 0.99;
unsigned long tI, tF;
float valor = 100.1;
float valor2;
void setup() {
  firstRunAVG = true;
  firstRunKF = true;
  firstRunFPB = true;
  Serial.begin(115200);
  tI = micros();
  valor2 = AvgFilter(valor);
  tF = micros();
  Serial.print("AvgFilter");
  Serial.write(9);
  Serial.print("KF");
  Serial.write(9);
  Serial.println("FPB");
  Serial.print(tF-tI);
  Serial.write(9);
  tI = micros();
  valor2 = SimpleKalman(valor);
  tF = micros();
  Serial.print(tF-tI);
  Serial.write(9);
  tI = micros();
  valor2 = FPB(valor);
  tF = micros();
  Serial.println(tF-tI);
  Serial.println("-----");
}
void loop() {
  tI = micros();
  valor2 = AvgFilter(valor);
  tF = micros();
  Serial.print(tF-tI);
  Serial.write(9);
  tI = micros();
  valor2 = SimpleKalman(valor);
  tF = micros();
  Serial.print(tF-tI);
  Serial.write(9);
  tI = micros();
  valor2 = FPB(valor);
  tF = micros();
  Serial.println(tF-tI);
  valor+=1.1;
}
float AvgFilter(float x){
  float avg;
  if(firstRunAVG==true){
    kAVG = 1;
    prevAvg = 0;
    firstRunAVG =false;
  }
  alpha = (kAVG - 1)/kAVG;
  avg = alpha*prevAvg+(1-alpha)*x;
  prevAvg = avg;
  kAVG = kAVG+1;
  return(prevAvg);
}
float SimpleKalman(float z){
  float xp, Pp, K;
  if(firstRunKF==true){
    AKF = 1;
    HKF = 1;
    Q = 0.001;
    R = 1;
    xKF = 1;
    P = 1;
    firstRunKF = 1;
  }
  //--- Prediction
  xp = AKF*xKF;
  Pp = AKF*P*AKF + Q;
  //--- Estimation
  K = Pp*HKF/(HKF*Pp*HKF + R);
  xKF = xp + K*(z - HKF*xp);
  P = Pp - K*HKF*Pp;
  return(xKF);
}
float FPB(float x){
  float xF;
  if(firstRunFPB==true){
    prevX = x;
    firstRunFPB = 1;
  }
  xF = alpha*prevX + (1-alpha)*x;
  prevX = xF;
  return(prevX);
}

```

## APÊNDICE B – VERIFICANDO RELAÇÃO ENTRE MEDIÇÃO MANUAL E ELETRÔNICA

Ao se comparar as tabelas 6.5 e 6.9, nota-se que houve uma diferença entre as duas formas de medição. Sendo assim, necessita-se de uma comparação estatística entre as duas tabelas. Verificou-se, então, a relação entre as medições da medição de distância ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ,  $\rho_4$  e  $\rho_5$ ), a relação entre as medições de inclinação ( $\alpha$  e  $\beta$ ).

Para comparar os dados, agrupou-se os dados de medição de distância em um vetor de dados para a medição manual e outro para a medição eletrônica. A seguir, foram utilizados os comandos do Matlab: **corrcoef** e **fitlm**.

Os resultados da comparação entre os dados com ajuste de zero da medição manual e eletrônica da distância são  $\rho_{\text{Elet}} = 1,0095 \cdot \rho_{\text{Manual}} + 0,0049798$ , correlação  $\text{corr} = 0,9653$  e  $R^2 = 0,9631$ .

Os resultados da comparação entre os dados brutos das medições manual e eletrônica da distância são  $A_{jZ\text{Elet}} = 0,99775 \cdot A_{jZ\text{Manual}}$  e correlação  $\text{corr} = 0,9999$ .

Da mesma forma, agrupou-se os dados oriundos dos sensores de inclinação. Um vetor para as medições com inclinômetro e outro para as medições do sensor de inclinação. Os resultados da comparação entre os dados com ajuste de zero das medições de inclinação manual e eletrônica são  $\text{Ang}_{\text{Elet}} = 1,1154 \cdot \text{Ang}_{\text{Manual}} - 0,25838$ , correlação  $\text{corr} = 0,9988$  e  $R^2 = 0,997$ .