

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC **Centro Tecnológico**
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Piloto Automático para Veículos Agrícolas

*Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:*

DAS 5511: Projeto de Fim de Curso

Luiz Felipe Raupp

Florianópolis, março de 2012

Piloto Automático para Veículos Agrícolas

Luiz Felipe Raupp

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Banca Examinadora:

Eng. Geovany Voi Filho
Orientador Empresa

Prof. Julio Elias Normey-Rico
Orientador do Curso

Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia
Responsável pela disciplina

Prof. Alexandre Trofino Neto, Avaliador

José Ricardo Sanchez Filho, Debatedor

Felipe Valdir Buzzi, Debatedor

Agradecimentos

Agradeço ao meu falecido pai, exemplo de coragem e força, que por um infortúnio da vida não poderá estar presente para contemplar mais esta etapa finalizada em minha vida, pela qual ele tanto lutou, apoiou e sonhou, não esquecendo de minha mãe e irmão que compartilham seus anseios para o meu futuro, me fornecendo total apoio e suporte nos momentos difíceis.

Um agradecimento especial a Mariana, pelo seu companheirismo e sábios conselhos em momentos oportunos.

Aos professores do Departamento de Automação e Sistemas, em especial, aos professores Augusto H. Bruciapaglia, Leandro B. Becker e Julio Normey-Rico, pela dedicação com o ensino, sem os quais, a completude deste trabalho seria impossível.

Aos colaboradores da Arvus Tecnologia, em especial ao Geovany e Adriano, pela confiança depositada e auxílio, além de me colocarem no caminho correto com suas valiosas sugestões e idéias.

Resumo

Descrevem-se neste trabalho as atividades desenvolvidas pelo autor na Arvus Tecnologia, no período de maio de 2011 a março de 2012, no contexto da disciplina Projeto de Fim de Curso, do curso de Engenharia de Controle e Automação.

As atividades estão concentradas no desenvolvimento de um piloto automático para veículos agrícolas, que visa melhorar o trabalho no campo nas mais diversas atividades, visando economia e ganhos de produtividade.

Desta forma, têm-se enfoque na pesquisa e desenvolvimento de soluções viáveis, especificações de projeto, análise de atuadores, sensores e algoritmos de controle visando o correto funcionamento do produto.

Abstract

This report describes activities developed by the author during his internship at Arvus Tecnologia, realized between May 2010 and March 2011, as part of the Control and Automation Engineer undergraduate course.

Activities are focused on development of an automatic guidance system for farm vehicles, aiming to improve the work realized at the farm, which leads to increased productivity and economy.

Our purpose is to research and develop viable solutions, project specifications, analysis or actuators, sensors and control algorithms.

Sumário

Lista Figuras	ix
Simbologia.....	xi
1 Introdução.....	11
1.1 Agricultura de Precisão.....	11
1.1 Arvus Tecnologia.....	12
1.2 O Piloto Automático	12
1.2.1 Motivação	12
1.2.2 Especificações de projeto	14
1.2.3 Funcionamento	15
1.3 Contextualização com o curso de Engenharia de Controle e Automação	16
1.4 Conclusão.....	17
2 Tecnologias Relacionadas	18
2.1 Sistemas de Navegação por Satélites (GNSS).....	18
2.1.1 GPS.....	19
2.1.2 DGPS.....	20
2.1.3 RTK.....	20
2.2 Modelagem Matemática do Veículo.....	21
2.3 Lei de Controle	22
2.4 Conclusão.....	24
3 Sensores.....	25
3.1 GPS	25
3.1.1 Sensores Inclinação Trator.....	25
3.1.2 Filtragem Do Sinal	26
3.3 Sensores ângulo roda.....	28
3.3.1 Piloto Elétrico.....	28

3.3.2	Piloto Hidráulico	29
3.4	Conclusão	30
4	Atuadores.....	31
4.1	Motor Elétrico.....	31
4.1.1	Descrição	31
4.1.2	Levantamento Modelo Motor CC	32
4.1.3	Lei de Controle	33
4.2	Válvula Hidráulica.....	36
4.2.1	Descrição	36
4.2.2	Modelo Válvula Hidráulica	37
4.2.3	Lei de Controle	39
4.2	Conclusão.....	42
5	Controlador de Posição e Orientação	43
5.1	Malha de controle	43
5.2	Controladores Propostos	43
5.3	Detalhamento	45
5.3.1	Adição PI.....	45
5.3.2	Uso de anti-windup.....	47
5.3.3	Saturação Dinâmica.....	47
5.3.4	Escalonador de ganhos	48
5.3.5	Malha saturação Motor Elétrico	48
5.4	Conclusão.....	50
6	Resultados.....	51
6.1	Testes Práticos	51
6.2	Piloto Elétrico	51
6.2.1	Análise Desvio Lateral para Trajetórias Retas	51
6.3	Piloto Hidráulico.....	53

6.3.1	Análise Desvio Lateral Para Trajetórias Retas	53
6.3.2	Conclusões Testes Trajetórias Retas	55
6.3.3	Análise Desvio Lateral para trajetórias Curvas	55
6.3.4	Conclusões Testes Trajetórias Curvas	56
6.4	Conclusão.....	58
7	Conclusões e Perspectivas	59
	Referências	60

Lista Figuras

Figura 1 - Sistema de barra de luz desenvolvido pela Arvus Tecnologia. Repare nas setas no topo da tela de operação.	13
Figura 2 - Motor acoplado ao volante, Piloto Elétrico.	15
Figura 3 - Fluxo básico de informações no funcionamento do piloto	16
Figura 4 - Sistema GPS, composto por 24 satélites e rotas configuradas para que em qualquer ponto do planeta, no mínimo, 4 satélites estejam visíveis no céu. Fonte: http://informatica.hsw.uol.com.br/receptores-gps.htm	19
Figura 5 - Funcionamento DGPS. Fonte: http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/topics/survey/procs/gps.html	20
Figura 6 - Sistema RTK. Fonte: http://www.deere.com/pt_BR/ag/products/ams/base_rtk.html	21
Figura 7 - Modelo trator	21
Figura 8 - Erro na leitura do GPS com a inclinação do veículo	25
Figura 9 - Ângulos de roll, pitch e yaw. Adaptado de: http://fifthpostulate.net/roll_pitch_and_yaw.htm	26
Figura 10 - Espectro de Fourier do sinal coletado. Acelerômetro Y (cima) e Giro X (baixo) .	27
Figura 11 - Sinal do Giro X sem filtro (azul) e com filtro aplicado	28
Figura 12 - Exemplo de funcionamento de um encoder incremental. Fonte: http://www.inf.ufrgs.br/pet/robopet/doku.php?id=eletronica:robopet_2.0:hardware:pid	29
Figura 13 - Sensor Rotação Piloto Hidráulico.....	29
Figura 14 - Instalação sensor roda Piloto Hidráulico	30
Figura 15 - Motor elétrico	31
Figura 16 - Ponte H	32
Figura 17 - Entrada aplicada para levantamento do modelo do motor CC	32
Figura 18 – Saída ensaio MA motor CC	33
Figura 19 - Malha Motor CC para leitura da posição.....	33
Figura 20 - Saída Controlador Proporcional Motor CC	34
Figura 21 - Sinal de controle Motor CC	34
Figura 22 – Saída Malha Controle Motor CC (em rad) com constante relação motor-roda	36
Figura 23 - Sinal Controle Motor CC com constante relação motor-roda	36

Figura 24 - Esquemático válvula hidráulica	36
Figura 25 - Orbitrol e o cilindro de direção. Adaptado de: http://www.unimogmania.com/t3061-fuite-d-huile	37
Figura 26 - Malha ensaio MF válvula hidráulica	38
Figura 27 - Ensaio MF Válvula Hidráulica	38
Figura 28 - Comparação entre a planta real e o modelo levantado	39
Figura 29 - Saída Controlador Válvula Hidráulica.....	40
Figura 30 - Sinal Controle Válvula Hidráulica.....	41
Figura 31 - Saída controlador válvula hidráulica com filtro para referência.....	41
Figura 32 - Sinal Controle com a inclusão no filtro na referência	42
Figura 33 - Malha final controlador válvula.....	42
Figura 34 - Malha controle geral	43
Figura 35 - Estrutura de controle PI cascata. V corresponde à velocidade, l a distância entre eixos e u o sinal de entrada do bloco.	44
Figura 36 - Malhas de controle do erro e da orientação	46
Figura 37 - Controlador com adição do PI	46
Figura 38 - Comparativo controlador com anti-windup (linha cheia) e sem anti-windup (pontilhado)	47
Figura 39 - Comparativo saídas com o controle de saturação do motor cc (tracejado) e sem (contínuo), simulação realizada a 3Km/h	49
Figura 40 - Sinal controle para os sistemas com e sem monitoramento de saturação do motor	50
Figura 41 - Desvio Lateral Piloto Elétrico	52
Figura 42 - Variação do erro em baixa velocidade para a trajetória 2.....	52
Figura 43 - Desvio Lateral. Velocidade entre 4km/h e 8km/h. As setas indicam o início de operação.....	53
Figura 44 - Variação do erro em baixa velocidade para a trajetória 1.....	54
Figura 45 - Análise do desvio lateral. Velocidades entre 8Km/h e 12Km/h. As setas indicam o início de operação.....	54
Figura 46 - Erro em Relação a Guia - Trajetória Curva	56
Figura 47 - Variação do erro para a trajetória curva.....	56
Figura 48 - Diferenças entre a orientação interpolada e real.....	57

Simbologia

CAN – Controller Area Network.

FK – Filtro de Kalman

GNSS – Global Navigation Satellite Systems (Sistema de navegação via satélite).

GPS – Global Position System.

INS – Inertial Navigation Systems (Sistema Navegação Inercial).

LS – Load Sense

MA – Malha Aberta

MF – Malha Fechada

PPR – Pulsos Por Revolução

PWM - Pulse-Width Modulation (Modulação por largura de pulso).

RPM- Rotações por Minuto

RTK – Real Time Kinematic

1 Introdução

1.1 Agricultura de Precisão

A agricultura de precisão é um método de administração cuidadosa e detalhada do solo e da cultura para adequar as diferentes condições encontradas no mesmo (física, química ou biológica), diminuindo suas variabilidades e objetivando economia (mão-de-obra, insumos), melhores práticas de manejo (sustentabilidade) e aumento de produtividade [1].

A técnica consiste de um ciclo de análise da produtividade e características do solo, sensoriamento, manipulação dos dados (geoestatística, ferramentas de suporte a decisão), controle e localização através de informações geográficas precisas, inaugurando assim, uma nova forma de gestão e gerenciamento do espaço agrícola [2].

Os primeiros relatos acadêmicos de técnicas que buscavam lidar com a variabilidade espacial do solo (nutrientes e minerais existentes) datam da década de 1920, contudo, o conceito agricultura de precisão, somente surgiu nos Estados Unidos por volta da década de 80, através da geração e estudo de mapas de recomendações. Esses mapas possibilitaram que, por exemplo, a quantidade de fertilizantes a ser aplicada em uma dada área fosse prescrita, ao se estudar e determinar a quantidade de nutrientes exigidos pela cultura e a parcela disponível em cada região da lavoura, reduzindo assim, os custos com insumos, melhora no nível de produção e menores riscos de contaminação ambiental [1].

Contudo, o grande avanço para o setor somente ocorreu através da disseminação, barateamento e aumento de precisão dos sistemas de posicionamento via satélite, em especial o GPS, bem como a popularização dos microprocessadores, que permitiram o levantamento de dados precisos, seu correto processamento em tempo hábil e o surgimento dos sistemas embarcados no maquinário agrícola (tratores, colheitadeiras, plantadeiras, pulverizadores e outros implementos) [1].

No Brasil, apesar de sua importância no cenário agrícola, os conceitos de agricultura de precisão somente foram introduzidos em meados da década de 90, através da importação total de tecnologia, fruto da indústria de máquinas agrícolas [1].

1.1 Arvus Tecnologia

Fundada em 2004, é considerada a primeira empresa brasileira na fabricação e desenvolvimento de equipamentos de Agricultura e Silvicultura de precisão. As principais tecnologias desenvolvidas pela empresa são controladores eletrônicos de aplicação de insumos, sistemas georreferenciados por GPS/DGPS, softwares para gestão de dados de aplicação, geração de relatórios de operações e visualização de mapas [2].

Atualmente, possui parceiros nas principais fronteiras agrícolas do Brasil, contando com um corpo funcional engajado e qualificado, destacando-se pela assistência técnica personalizada e no efetivo resultado para o cliente, baseando seus negócios nos pilares (políticas) abaixo destacados [2]:

- Formação de parcerias: A empresa busca e cultiva a formação de parcerias estratégicas, com ganhos mútuos, em esforços comerciais, tecnológicos ou institucionais.
- Respeito ao meio ambiente: Não somente nas tecnologias e produtos oferecidos pela Arvus, que permitem explorar os benefícios da Agricultura e Silvicultura de Precisão, mas também nas operações da empresa, como a fabricação dos equipamentos e nos serviços prestados.
- Resultados para o cliente: Todas as iniciativas, desenvolvimentos e negócios da empresa são focados no alcance de resultados para os clientes.

1.2 O Piloto Automático

1.2.1 Motivação

O Piloto Automático para veículos agrícolas surgiu, no escopo estratégico da Arvus Tecnologia, como um produto para fazer frente a modelos já existentes no mercado, além de, promover maior integração e funcionalidades ao seu portfólio de produtos do segmento agrícola.

Técnicas visuais, como a utilização de barras dotadas com cordas fixadas na dianteira do veículo ou sistemas de bandeiras, podem ser utilizados para determinar áreas já trabalhadas pelo agricultor durante a realização de suas funções.

Sistemas mais modernos, utilizando eletrônica embarcada e o sinal de alguma fonte GNSS, denominados barras de luz, como se mostra na Figura 1, têm se destacado no campo no últimos anos. A simplicidade no manuseio é umas das grandes vantagens neste tipo de solução. O operador apenas necessita marcar uma trajetória de referência e o sistema se encarrega de gerar as rotas auxiliares. Indicadores visuais informam ao motorista para onde deve ser feita a correção na direção, objetivando seguir a guia.



Figura 1 - Sistema de barra de luz desenvolvido pela Arvus Tecnologia. Repare nas setas no topo da tela de operação.

Contudo, as técnicas de condução manuais, são extremamente desgastantes para o condutor, requerendo um nível de atenção e concentração elevado durante a realização de todo o serviço. A qualidade do trabalho também fica demasiadamente dependente da perícia e experiência do motorista, dificultando obter uma isonomia no mesmo, o que acarreta em maiores custos para o produtor rural.

Sendo assim, o sistema de piloto automático tem sua importância para o trabalho realizado no campo e para a agricultura de precisão, apresentando as seguintes funções e vantagens:

- Menor estresse para operador, que pode monitorar de forma mais segura e precisa outros equipamentos utilizados em sua jornada de trabalho [3].
- Maior produtividade, ao permitir, maiores velocidades de operação, inclusive durante a noite [3].
- Maior acurácia no seguimento das trajetórias previamente definidas, durante todo o dia, reduzindo custos e melhora na utilização do solo [3].

Na literatura, encontram-se duas vertentes para o desenvolvimento da tecnologia que viabilizou o sistema proposto [4]:

- Informação relativa através de integrações sucessivas de variáveis de interesse (velocidade e/ou aceleração) para determinação da posição corrente do veículo, podendo haver correção dos dados através de sensores, como câmeras, marcos, sistemas INS, entre outros, além do uso de algoritmos para fusão sensorial, como Filtro de Kalman. Por utilizar integração numérica, está suscetível ao acúmulo de erros ao longo do tempo o que prejudica sua exatidão após longos períodos.
- Uso de informação absoluta através de sistemas GNSS, com capacidade de garantir precisão de centímetros.

Este trabalho é focado nos sistemas de informação absoluta, em especial, os com sinal DGPS, que garantem maior precisão, tanto para o seguimento de trajetórias retilíneas como em curvas.

1.2.2 Especificações de projeto

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

- Ser capaz de seguir qualquer tipo de trajetória existente no campo (restas, curvas, pivô) com erro inferior a 5 (cinco) centímetros.
- Operar nas faixas de velocidades compreendidas entre 3 (três) Km/h e 25 (vinte e cinco) Km/h.
- Tempo de aproximação a trajetória inferior a 10 segundos, com baixa sobrepassagem.
- Zelar pela segurança do condutor.
- Robustez, sendo capaz de operar nos mais variados modelos de máquinas agrícolas e em qualquer tipo de solo (planos e acidentados).
- Fácil instalação e manutenção.

1.2.3 Funcionamento

Existem duas versões do piloto automático para máquinas agrícolas, que diferem, basicamente, no modo de atuação e no sensor responsável pela leitura do ângulo das rodas do veículo.

Primeiramente foi iniciado o desenvolvimento do Piloto Elétrico. O modo de atuação no sistema corresponde a um motor elétrico de corrente contínua diretamente acoplada ao volante do veículo, como se mostra na Figura 2, sendo a posição das rodas obtidas através da leitura do encoder do motor (existe uma relação entre a posição do volante e das rodas do veículo que será detalhada posteriormente). Optou-se por iniciar o seu desenvolvimento primeiramente, devido as seguintes características:

- Maior praticidade para montagem dos protótipos
- Menores custos de instalação e manutenção



Figura 2 - Motor acoplado ao volante, Piloto Elétrico.

Problemas inerentes ao Piloto Elétrico levaram ao início do desenvolvimento do Piloto Hidráulico. No primeiro, percebeu-se dificuldade em utilizar o produto em certos tipos de veículos, que possuíam grandes folgas na direção, além da existência de problemas de elevado escorregamento entre o motor e o volante com o desgaste da borracha de contato, e em algumas situações, tempo de resposta elevado para manobras bruscas, como o início de uma curva mais acentuada.

No Piloto Hidráulico, uma válvula hidráulica é diretamente conectada ao cilindro de direção do trator, sendo a responsável pela atuação no sistema. Um sensor (rotativo e absoluto) é instalado em uma das rodas do veículo para obtenção do ângulo das mesmas.

Para ambos os modelos a posição absoluta do veículo é obtida via receptores GPS instalados sobre a cabine (ou na área mais elevada e livre de obstáculos do veículo) enviando continuamente as informações de localização geográfica (latitude e longitude), orientação em

relação ao norte geográfico da Terra e a velocidade (em módulo) do veículo, para o computador de bordo, Titanium, instalado no interior da cabine do trator.

Essas informações são então decodificadas pelo equipamento que calcula o erro em relação à trajetória de referência armazenada em memória e a orientação do veículo em relação à mesma. Juntamente com a informação de velocidade esses dados são repassados para o controlador via protocolo CAN.

O controlador deve então realizar a leitura do sensor de posição das rodas, e calcular a lei de controle em tempo hábil, enviando o sinal de comando para os atuadores. Além destas funções, o circuito do controlador deve obter a inclinação do veículo (ângulos de roll e pitch), além de gerenciar rotinas de segurança, enviando esses dados, e qualquer outra informação que seja de interesse do agricultor ou de projeto, continuamente para o Titanium (ver Figura 3).

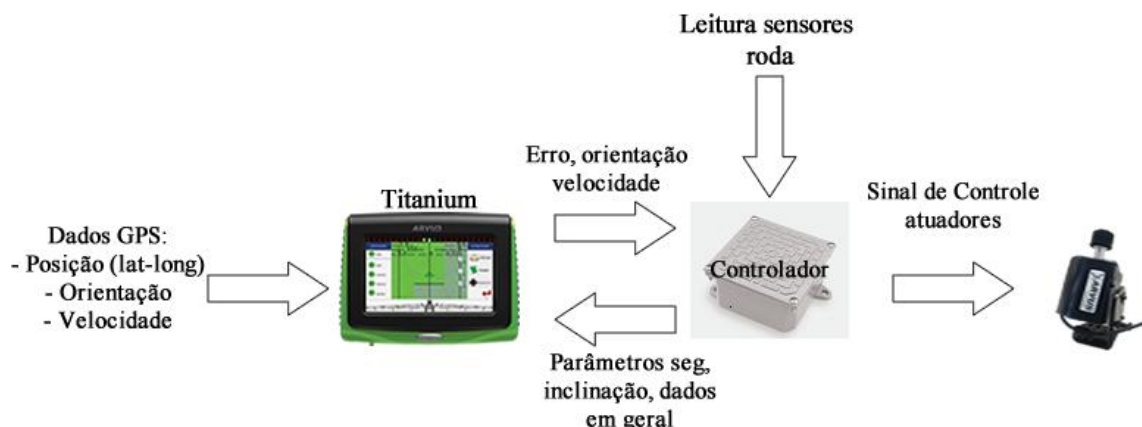


Figura 3 - Fluxo básico de informações no funcionamento do piloto

1.3 Contextualização com o curso de Engenharia de Controle e Automação

O trabalho desenvolvido está diretamente relacionado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina.

Utilizar-se-á os conceitos adquiridos nas disciplinas, DAS-5112 (Sinais e Sistemas Lineares I), DAS-5113 (Sinais e Sistemas Lineares II), para o processamento de sinais e projeto de filtros. As Disciplinas, DAS-5121 (Sistemas Realimentados), DAS-5131 (Controle multivariável) e DAS-5141 (Sistemas Não-lineares), serão necessárias para a correta

modelagem do problema, estudo de possíveis algoritmos de controle utilizados na solução, bem como análise de sua robustez e conformidade com as especificações.

As disciplinas relacionadas à Informática Industrial e a área de TI, destacando-se DAS-5332 (Arquitetura e Programação de Sistemas Microcontrolados), DAS-5305 (Informática Industrial I), DAS-5312 (Metodologia de Desenvolvimento de Sistemas), DAS-5314 (Redes de Computadores), para o entendimento de lógicas de programação e de protocolos de comunicação.

Destacam-se ainda, as disciplinas DAS-5151 (Instrumentação em controle e Automação), EMC-5467 (Acionamentos Hidráulicos e Pneumáticos) e EEL-5191 (Acionamentos Elétricos para Automação) no que tange a escolha e calibração de sensores, bem como o correto acionamento e projeto dos atuadores utilizados.

1.4 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado um breve histórico sobre a agricultura de precisão e da Arvus tecnologia, bem como uma breve descrição da problemática do funcionamento do piloto automático visando uma melhor contextualização do leitor com os assuntos futuramente abordados neste documento.

2 Tecnologias Relacionadas

Visando fornecer ao leitor melhor conhecimento teórico sobre as práticas, métodos e ferramentas futuramente explicitadas neste documento e utilizadas no desenvolvimento do piloto automático, este capítulo visa discorrer sobre os temas tecnológicos de interesse e que possuem alguma relevância na concepção do produto.

2.1 Sistemas de Navegação por Satélites (GNSS)

Os sistemas de navegação por satélite transmitem sinais que podem ser utilizados em terra para determinação de posição, altitude, velocidade e informação horária de um determinado corpo na superfície terrestre.

Surgiu de uma necessidade do campo militar, visando melhorar a precisão no uso de armamento, aumentando seu potencial destrutivo e reduzindo os efeitos colaterais, como baixas civis e “fogo-amigo”. Seu uso foi progressivamente liberado para uso civil, contudo, por razões estratégicas dos países detentores da tecnologia, erros são inseridos no sinal, degradando sua qualidade e precisão.

Estão em operação, ou em fase de desenvolvimento, os seguintes sistemas [6]:

- GPS (Global Position System): De autoria do governo dos Estados Unidos da América é o sistema mais utilizado no mundo, com cobertura por todo o globo.
- Galileo: Projeto da União Européia em conjunto com a Agência Espacial Européia iniciado em 2002. A previsão inicial era que o mesmo estivesse em operação em 2010, contudo o prazo foi postergado para 2014, a completude da cobertura mundial somente será alcançada, segundo estimativas, em 2020.
- Glonass: Sistema Russo (desenvolvido pela extinta União Soviética), com o objetivo de fazer frente ao sistema americano. Com o desmantelamento do socialismo, o sistema foi esquecido, perecendo de manutenção, voltando a operar, dentro de certas limitações, em 2011.
- Compass: Também denominado de Beidu, é uma solução chinesa para reduzir sua dependência da tecnologia americana e européia. Projeto iniciado em 2000 possui limitado campo de operação, sobre a China e algumas regiões vizinhas.

Para a captação do sinal para uso civil, basta possuir um decodificador para o sistema correspondente. Algumas aplicações já exploram a possibilidade de integração de múltiplos sistemas, principalmente o GPS e o Galileu, aumentando a gama de satélites disponíveis para a estimativa de posição obtendo ganhos consideráveis de precisão.

2.1.1 GPS

Projeto do Governo Americano, através do seu Departamento de Defesa, DoD, iniciado no início da década 70. Sua funcionalidade consiste em determinar a localização de qualquer objeto, bem como sua velocidade e tempo, 24 horas por dia, sendo declarado totalmente operacional em 1995 (toda a constelação de satélites colocados em órbita) e liberado para uso civil a partir de 1980.

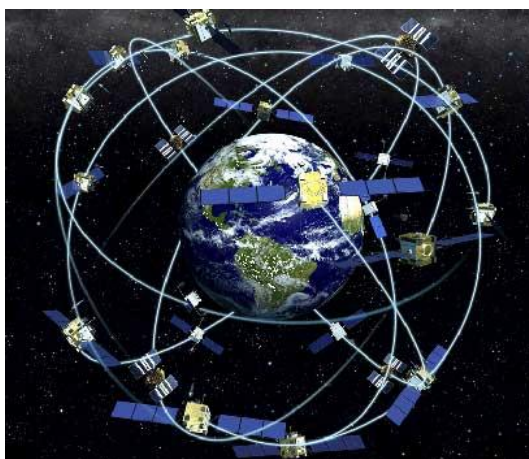


Figura 4 - Sistema GPS, composto por 24 satélites e rotas configuradas para que em qualquer ponto do planeta, no mínimo, 4 satélites estejam visíveis no céu. Fonte: <http://informatica.hsw.uol.com.br/receptores-gps.htm>

Os satélites que compõem o sistema de navegação, como podem ser observados na Figura 4, transmitem sinais de radiofrequência, os quais são suficientes para que o receptor compute sua posição e velocidade. O receptor utiliza de técnica de triangulação para calcular sua latitude, longitude e altitude, sendo necessários três satélites para tal feito. Como, por razões práticas, dificilmente os temporizadores dos satélites e do receptor estão sincronizados (além de questões do tempo de deslocamento da onda no espaço), faz-se o uso de um quarto satélite para reduzir a parcela correspondente ao erro na estimação da posição devido ao tempo.

Para uso civil, o sistema é parcialmente aberto. Componentes propositais de erros são inseridos no sinal para redução de sua precisão, precaução tomada pelo governo americano

para evitar o uso ilegal da tecnologia para fins militares. Questões como condições atmosféricas e relevo também interferem negativamente no desempenho da solução, devido à perda de informações ou até mesmo de satélites visíveis no horizonte.

2.1.2 DGPS

O DGPS é um sistema capaz de corrigir parte dos erros existentes no sinal do GPS comum aumentando a sua precisão.

Estações de referência em terra que possuem sua localização conhecida, realizam a leitura do sinal aberto do GPS e, através de relações matemáticas, obtêm a correção do sinal que então é transmitida via rádio (em esquema deste sistema é mostrado na Figura 5) para os receptores.

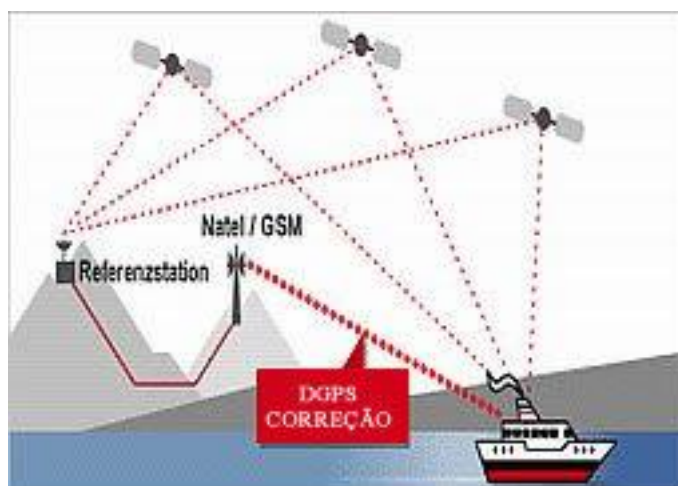


Figura 5 - Funcionamento DGPS. Fonte: <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/topics/survey/procs/gps.html>

2.1.3 RTK

Possui funcionamento semelhante ao sistema DGPS, utilizando uma base receptora móvel, diferenciando-se na forma em que a correção é calculada.

Enquanto no DGPS a correção é realizada com base na pseudodistância entre satélite e base receptora, no sistema RTK usa-se a fase da onda da portadora, possibilitando alcançar precisão centimétrica, ideal para as operações de plantio no campo (ver Figura 6).

Além do sistema GPS, existem bases receptoras capazes de operar em conjunto com o GLONASS e futuramente com o Galileo.

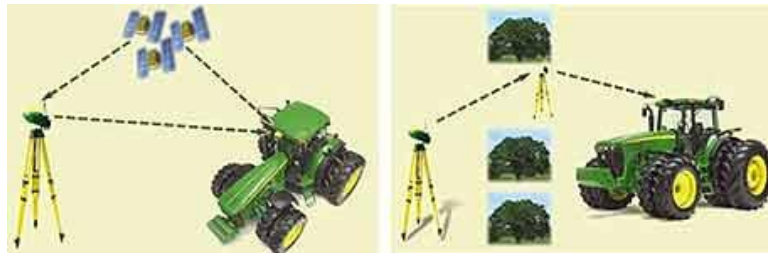


Figura 6 - Sistema RTK. Fonte: http://www.deere.com/pt_BR/ag/products/ams/base_rtk.html

2.2 Modelagem Matemática do Veículo

O modelo matemático de um sistema dinâmico é um conjunto de equações capazes de representar perfeitamente, ou pelo menos razoavelmente, o comportamento dinâmico do sistema. Em geral, o modelo não é único para a planta em estudo, podendo considerar ou omitir certas variáveis, dependendo da perspectiva do estudo a ser considerada [7].

O modelo utilizado para representar o trator no seguimento de trajetórias (retilíneas ou curvas) a baixas velocidades (desconsiderando resistência do ar, escorregamento e outras incertezas) pode ser obtido em [4] e será brevemente descrito neste capítulo.

No modelo, o trator e o implemento, para efeitos de simplificação, são considerados um triciclo de comprimento l atuado pela roda dianteira (ver Figura 7).

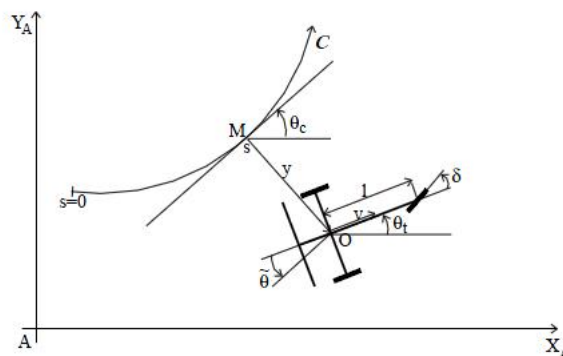


Figura 7 - Modelo trator

O modelo matemático é obtido com base na trajetória C a ser seguida e não em relação ao referencial absoluto (plano cartesiano A , $[X_A, Y_A]$). O ponto O representa o centro de giro do veículo e o ponto M a menor distância entre o centro veículo e a referência. A variável S

representa a abscissa do ponto M sobre C , Y o erro existente (distância) entre o veículo e a curva, $\tilde{\Theta}$ o ângulo (orientação) entre a curva e o trator, V representa a velocidade do veículo e δ a orientação da roda dianteira.

Assumindo que, trator e implemento representam um único corpo rígido (com centro de giro em O) e inexistência de escorregamento do veículo (deslizamento devido à inclinação do terreno), pode-se chegar ao seguinte conjunto de equações que representam o comportamento dinâmico da planta em estudo:

$$\dot{s} = v \frac{\cos(\tilde{\Theta})}{1 - c(s) * y}$$

$$\dot{y} = v \sin(\tilde{\Theta})$$

$$\dot{\tilde{\Theta}} = v \left(\frac{\tan(\delta)}{l} - \frac{c(s) \cos(\tilde{\Theta})}{1 - c(s)y} \right)$$

2.3 Lei de Controle

A lei de controle que serviu de ponto de partida para início do estudo do sistema é descrita em [4] e [8].

Segundo [8], e o teorema de Brockett [9], modelos que representam veículos (claramente não-lineares), não podem ser estabilizados por simples realimentações de estados, ou possuem desempenho deficitário para os casos em que se realiza linearização em torno do ponto de operação. Nos últimos anos, técnicas utilizando realimentação linearizante, e a possibilidade de colocar os modelos na forma canônica têm ganhando força e destaque no controle dos sistemas propostos [8].

A forma geral de sistemas no Espaço de Estados com três estados e duas entradas é mostrado abaixo (veja [8]):

$$\begin{cases} \dot{a}_1 = m_1 \\ \dot{a}_2 = a_3 m_2 \\ \dot{a}_3 = m_2 \end{cases} \quad (1)$$

Com a_1 , a_2 , a_3 representando os estados e m_1 , m_2 os vetores de controle. Visando deixar o sistema (1) em sua forma canônica realizamos a seguinte substituição de variáveis,

alterando a derivada em relação ao tempo por uma derivação em relação ao estado a_1 , usando as notações:

$$\frac{da_i}{da_1} = a'_i \quad \text{e} \quad m_3 = \frac{m_2}{m_1}$$

Obtêm-se o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{cases} a'_1 = 1 \\ a'_2 = a_3 \\ a'_3 = m_3 \end{cases} \quad (2)$$

Trazendo para a problemática do modelo do veículo levantado no capítulo anterior, podemos considerar $a_1 = s$ e $a_2 = y$ o que nos leva:

$$m_1 \triangleq \dot{a}_1 = \frac{v \cos(\tilde{\theta})}{1 - c(s)y} \quad (3)$$

$$a_3 \triangleq \frac{\dot{a}_2}{m_1} = (1 - c(s)y) \tan(\tilde{\theta}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} m_2 \triangleq \dot{a}_3 = & -c(s)v \sin(\tilde{\theta}) \tan(\tilde{\theta}) - \frac{dc(s)}{ds} \frac{v \cos(\tilde{\theta})}{1 - c(s)y} \tan(\tilde{\theta}) y \\ & + v \frac{(1 - c(s)y)}{\cos^2(\tilde{\theta})} \left(\frac{\tan(\delta)}{l} - c(s) \frac{\cos(\tilde{\theta})}{1 - c(s) * y} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Considerando:

$$m_3 = -K_d a_3 - K_p a_2 \quad (6)$$

E substituindo (6) em (2), obtemos a seguinte lei de controle genérica:

$$a_2'' + k_d a_2' + k_p a_2 = 0 \quad (7)$$

O que implica que a_2 e a_3 convergem à zero, o que também pode ser estendido para y e $\tilde{\theta}$, na análise da equação (4) e nas considerações feitas anteriormente para as variáveis $a_1 = s$ e $a_2 = y$, garantindo o seguimento a trajetória.

A lei de controle final pode ser obtida substituindo (6), em (3) e (5), através da relação $m_3 = \frac{m_2}{m_1}$, nos levando a seguinte expressão para a lei de controle:

$$\delta(y, \tilde{\Theta}) = \arctang \left(l \left[\frac{\cos^3(\tilde{\Theta})}{(1 - c(s)y)^2} \left(\frac{dc(s)}{ds} y \tan(\tilde{\Theta}) - K_d(1 - c(s)y) \tan(\tilde{\Theta}) - K_p y + c(s)(1 - c(s)y) \tan^2(\tilde{\Theta}) + \frac{c(s)\cos(\tilde{\Theta})}{1 - c(s)y} \right) \right] \right) \quad (8)$$

2.4 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se a revisão bibliográfica de modelos matemáticos utilizados no desenvolvimento do controlador do piloto automático, bem como uma descrição de tecnologias utilizadas (GPS).

3 Sensores

3.1 GPS

O receptor GPS utilizado é fornecido pela empresa Hemisphere, com uma taxa de atualização de 10Hz, garantindo uma precisão de 10cm (67% do tempo) para o sinal DGPS, trabalhando com o sistema RTK a precisão é de 10mm + 1ppm (67% do tempo).

3.1.1 Sensores Inclinação Trator

Os terrenos, pelos quais o trator trafegará pelo campo, não são completamente planos. A existência de fendas, aclives e declives pode interferir no desempenho do piloto.

A leitura de posição, por parte da antena GPS, pode sofrer oscilações com as constantes passagens do veículo por regiões acidentadas do solo, que provocam tremores na antena localizada no topo da cabine do trator.

Outro problema inerente ao tipo de solo por onde o veículo trafega, é o fornecimento de posição errônea por parte do sistema GPS em terrenos inclinados (aclives e declives). Quando ocorre inclinação do trator, este acaba por deslocar a antena do GPS lateralmente gerando um erro na determinação de posição proporcional a altura em que a mesma está localizada (ver Figura 8).

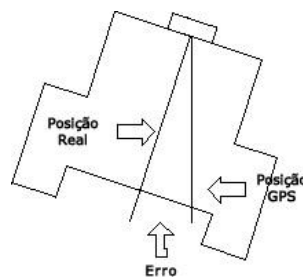


Figura 8 - Erro na leitura do GPS com a inclinação do veículo

O ângulo de inclinação do veículo pode ser determinado através de acelerômetros e giroscópios instalados na placa de controle do piloto. Por se tratarem de dispositivos de baixo custo e volume baseados na tecnologia MEMS (Micro Electro Mechanical System), sua medida é de baixa qualidade, estando sujeitos a fontes de erros aleatórios, como drifts, movimento de rotação da Terra, força de Coriolis, entre outros, o que degrada sua saída

consideravelmente com o tempo (devido as sucessivas integrações para se obter os ângulos de roll e pitch) [12].

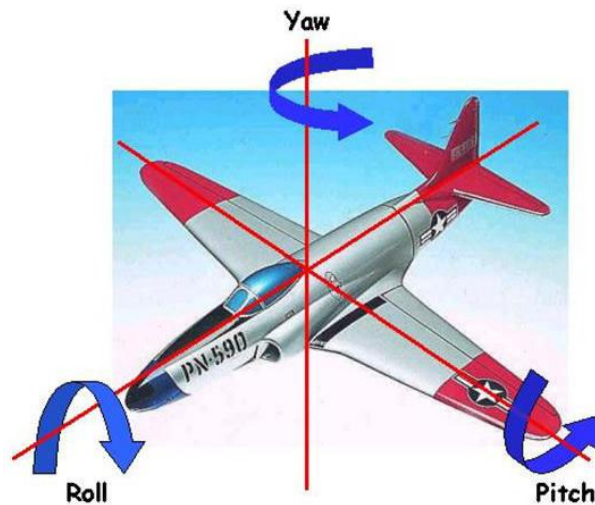


Figura 9 - Ângulos de roll, pitch e yaw. Adaptado de: http://fifthpostulate.net/roll_pitch_and_yaw.htm

Visando minimizar os erros na determinação de inclinação do veículo, uma solução muito adotada, é a fusão sensorial dos acelerômetros e giroscópios via Filtro de Kalman. O FK é um algoritmo de variância mínima para a estimação dos estados de um sistema dinâmico, através de medições ruidosas e de um modelo do sistema. Para seu correto ajuste a covariância dos erros e ruídos devem ser devidamente conhecidos e representados, caso contrário, a estimação fornecida apresentará discrepâncias com os valores reais [5].

3.1.2 Filtragem Do Sinal

Testes realizados em campo nos levaram a realizar vários ajustes na forma de aquisição dos dados dos acelerômetros e giroscópios. Por não possuir nenhum amortecimento em sua estrutura, toda a vibração gerada pelo trator durante sua operação, como, trepidação do motor, solavancos, entre outros, eram integralmente transferidos para a cabine e conseqüentemente para a placa controladora.

Como esses sinais não estavam devidamente modelados nas matrizes de covariância utilizadas no FK, à estimação de inclinação do veículo ficou prejudicada e sua utilização inviável em um primeiro momento, afetando todo o funcionamento do sistema.

Analisando os dados obtidos em campo, primeiramente, constatamos *aliasing* do sinal amostrado, o que impossibilita a reconstrução do sinal correto. Para contornar o problema a frequência de amostragem tanto do acelerômetro, quanto do giroscópio foram alteradas de 50Hz para 200Hz.

No que tange a o ruído presente nas leituras, decidiu-se que modelá-lo e adicionar sua componente nas matrizes de covariância do FK, seria um solução inviável, já que, o sinal modifica-se com a variação de rotação do motor ou velocidade dos tratores e até mesmo entre veículos suas características são alteradas.

Passou-se então, a estudar a componente de Fourier dos dados coletados, visando identificar as possíveis frequências dos ruídos presentes na amostra (ver Figura 10).

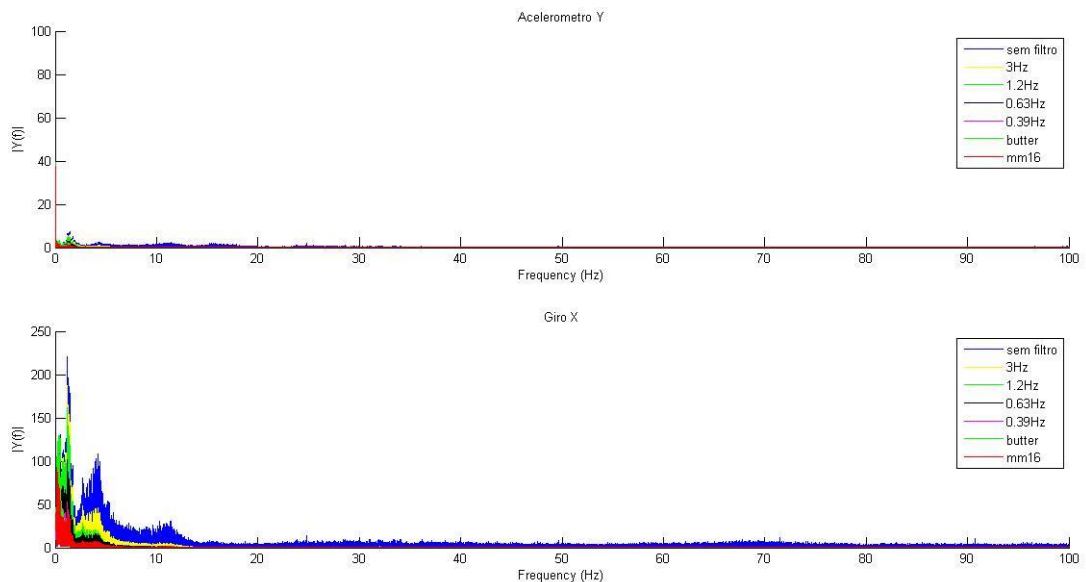


Figura 10 - Espectro de Fourier do sinal coletado. Acelerômetro Y (cima) e Giro X (baixo)

Observando a Figura 10, podemos constatar que a frequência dos ruídos presentes na amostra estão entre 0 e 15Hz. Isso motivou o desenvolvimento de filtros com frequências de corte de 3Hz, 1.2Hz, 0.63Hz e 0.39Hz, além de filtros das médias das últimas 16 (chamado de mm16) e 8 leituras (menor custo computacional), que se mostraram adequados para o propósito. A seleção de qual tipo de filtro utilizar fica a cargo do instalador no momento da calibração do piloto, já que dependendo das condições de uso (velocidade, tipo de trator e terreno) uma configuração pode apresentar melhores resultados que outra, contudo, recomenda-se o uso dos filtros baseado nas médias das ultimas leituras devido ao menor esforço computacional (a operações de divisão pode ser realizada com um simples

deslocamento de bits). Pela Figura 11, podemos observar as características do sinal do Giroscópio do eixo X, sem filtro (azul) e com filtros (demais cores).

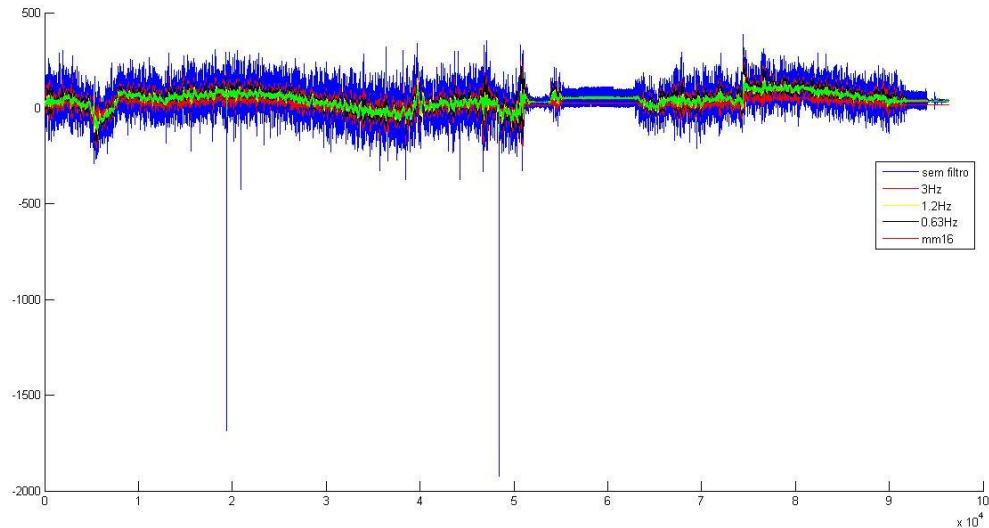


Figura 11 - Sinal do Giro X sem filtro (azul) e com filtro aplicado

Deve-se atentar para o fato de que a filtragem adiciona um atraso no sinal. Este atraso não deve ser elevado a ponto de deixar a dinâmica de estimação da inclinação do trator mais lenta que a dinâmica do GPS, o que levaria a novos erros por parte do algoritmo de correção da posição com a inclinação.

3.3 Sensores ângulo roda

3.3.1 Piloto Elétrico

No piloto elétrico a posição das rodas é determinada através da leitura do encoder relativo instalado no motor elétrico e através de uma relação matemática é possível obter o ângulo de esterçamento das rodas.

O encoder converte o movimento angular do motor em uma série de pulsos digitais (ver Figura 12). Esses pulsos são então contabilizados viabilizando a obtenção de velocidade, aceleração e posição do movimento realizado pelo motor. Possui dois canais de pulsos quadrados defasados em 90° possibilitando identificar o sentido de rotação.

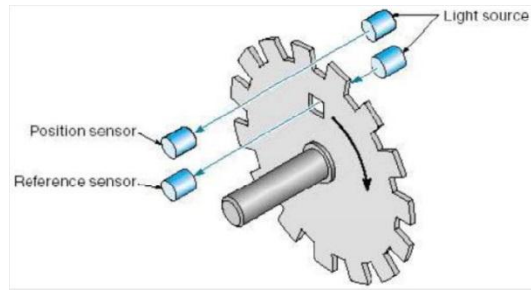


Figura 12 - Exemplo de funcionamento de um encoder incremental. Fonte: http://www.inf.ufrgs.br/pet/robopet/doku.php?id=eletronica:robopet_2.0:hardware:pid

A resolução, também denominada PPR, é dada por pulsos/revolução (quantidade de pulsos gerados em uma volta completa), para o piloto, dispomos de um encoder com PPR de 60 pulsos/revolução, fornecendo uma resolução de 6 graus. A taxa de amostragem é de 20ms, período levado pelo encoder para fornecer uma nova leitura com o motor na velocidade nominal de 50RPM (velocidade média de atuação durante a operação).

3.3.2 Piloto Hidráulico

Para determinação do ângulo da roda no Piloto Hidráulico, decidiu-se por utilizar um sensor absoluto e rotativo (ver Figura 13).



Figura 13 - Sensor Rotação Piloto Hidráulico

Possui como saída um sinal PWM proporcional ao ângulo medido, com uma resolução de 12 bits (largura de pulso de 4096 μ s), podendo fornecer uma nova leitura em intervalos de 4096 μ s. Sua precisão é de 0.08°, sendo capaz de realizar leituras de ângulos entre 0° a 360°, sem fim de curso, adequado para os propósitos do piloto.

Seu funcionamento baseia-se na variação do campo magnético devido à rotação de um ímã de pequeno porte instalado sobre o CI do sensor.

A instalação no trator exige que o sensor seja envolto por uma robusta caixa protetora, já que o mesmo é posicionado na parte externa do trator, próximo à roda. Como é inviável o

acoplamento direto entre sensor e a roda, utiliza-se um braço de alavanca para fazer a ligação entre os elementos rotativos da roda e o sensor, como pode ser observado na Figura 14.



Figura 14 - Instalação sensor roda Piloto Hidráulico

3.4 Conclusão

Neste capítulo descreveu-se toda a parte de sensoriamento do projeto, GPS utilizado, sensores para determinação da inclinação do veículo e de posição das rodas do veículo, tanto para o piloto elétrico quanto para o hidráulico.

4 Atuadores

Este capítulo está focado na descrição física e matemática dos atuadores utilizados no projeto. Serão apresentadas a modelagem dos equipamentos, leis de controle utilizadas e testes/simulações realizados.

4.1 Motor Elétrico

4.1.1 Descrição

No piloto elétrico, o motor de corrente contínua utilizado é fornecido pela Bodine Electric Company.



Figura 15 - Motor elétrico

É alimentado via sinal PWM de 10bits (largura de pulso de 0 a 1024) com tensões máximas de $\pm 12V$. Seu circuito alimentador é do tipo Ponte H, esquema exibido na Figura 16, o que possibilita seu giro nos 2 (dois) sentidos (direita e esquerda). O nome Ponte H advém da forma em que o circuito é montado, sendo constituído por 4 (quatro) chaves acionadas de forma alternadas (S1 com S4 e S2 com S3). As chaves de cada configuração, S1-S4 e S2-S3 não podem ser acionadas em conjunto, podendo ocorrer curto-circuito.

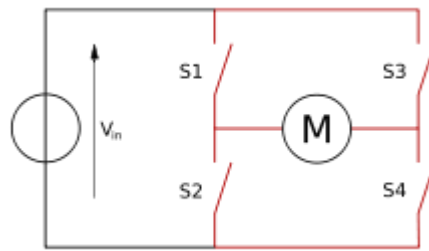


Figura 16 - Ponte H

O acoplamento com o volante é realizado via borracha de contato instalado no topo do eixo do motor, devendo ser periodicamente substituída para minimizar o escorregamento entre as partes. A base do motor possui uma mola de resistência elevada, que fornece pressão auxiliar para manter o motor sempre em contato com o volante.

4.1.2 Levantamento Modelo Motor CC

Para o levantamento do modelo dinâmico do atuador, aplicou-se uma série de degraus na entrada do sistema, exibidos na Figura 17, e mediu-se a velocidade de rotação do motor (em RPM), mostrados na Figura 18.

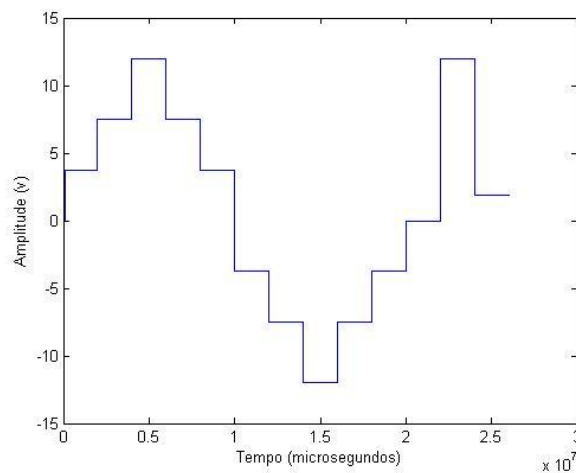


Figura 17 - Entrada aplicada para levantamento do modelo do motor CC

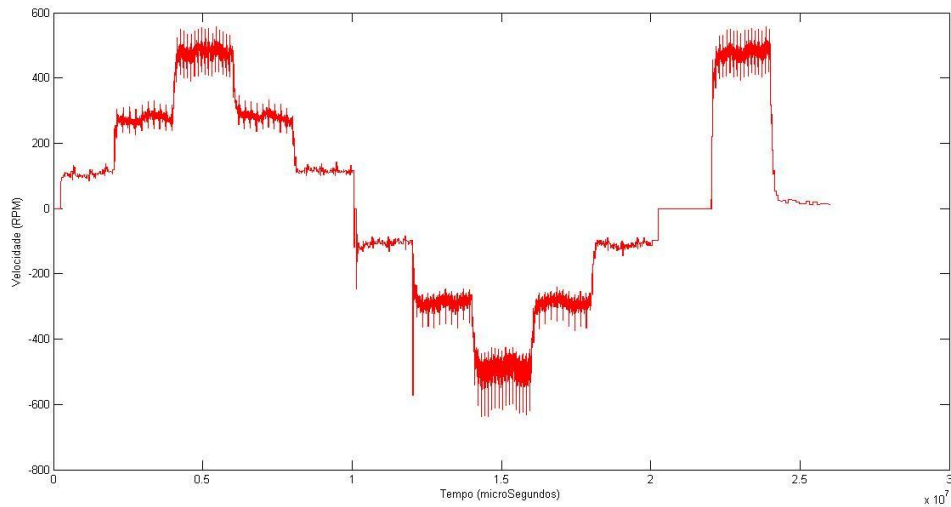


Figura 18 – Saída ensaio MA motor CC

Com base nos dados das Figura 18 e Figura 17, foi possível fazer a identificação matemática do motor, além do valor da velocidade de saturação do mesmo sem carga (500 RPM).

$$G_m(s) = \frac{0.4625}{0.06414s + 1}$$

Para adquirir como saída uma posição, no lugar da velocidade, basta acrescentar um integrador a malha e multiplicar a saída por $\frac{\pi}{30}$ (conversão de RPM para rad/s) Figura 19.

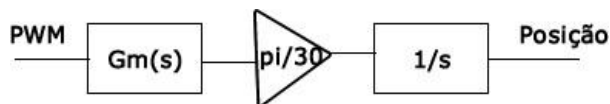


Figura 19 - Malha Motor CC para leitura da posição

4.1.3 Lei de Controle

Para o atuador elétrico foi levantado o seguinte conjunto de especificações que controlador deverá atender:

- Inexistência de sobre-sinal e oscilações.
- Tempo de resposta menor 0.5s.
- Seguimento de referência com erro nulo.

Como a malha da planta possui um integrador o sistema já garante seguimento a referência com erro nulo, o que possibilita o uso de um simples controlador proporcional para realizar a função.

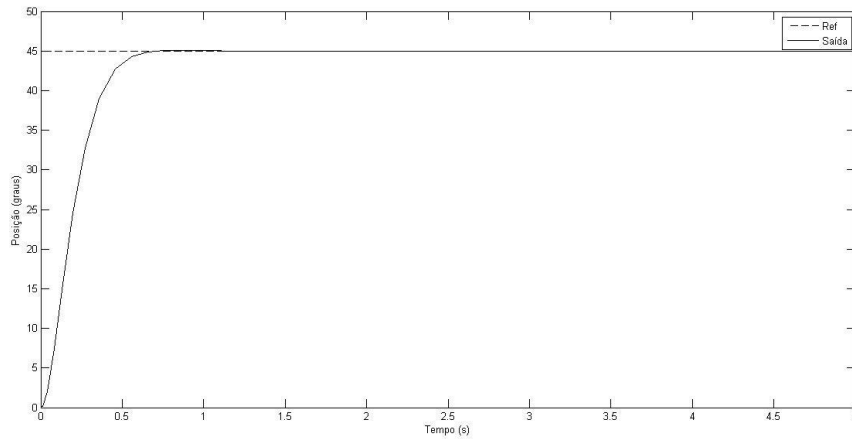


Figura 20 - Saída Controlador Proporcional Motor CC

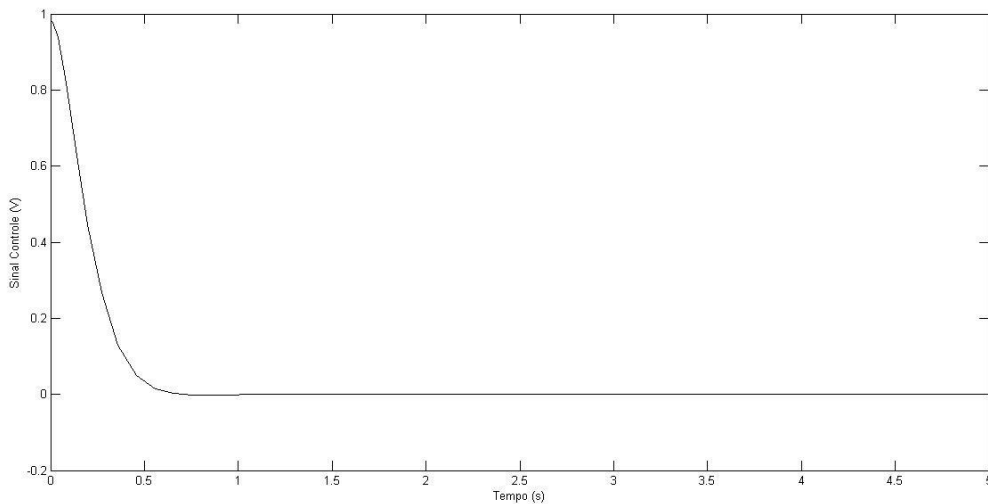


Figura 21 - Sinal de controle Motor CC

Através da Figura 20 podemos constatar que todas as especificações foram atendidas e o respectivo sinal de controle é mostrado na Figura 21.

Outro importante aspecto presente no controle do motor é a constante que nos representa a relação existente entre a posição do atuador e as rodas do veículo, ou seja, nos informa quantos graus o motor deve rotacionar para que a roda gire a referência desejada.

Esta constante é obtida durante a calibração do aparelho, em que o instalador, com o trator em movimento, executa a trajetória de um círculo completo, visando obter o raio da circunferência gerada, já que a posição das rodas do veículo pode ser aproximada pela equação:

$$\theta_{roda} = \frac{l}{r} \quad (8)$$

Onde l corresponde à distância entre eixos e r o raio da circunferência, assim sendo, a posição do motor para um determinado ângulo imposto as rodas é calculado da seguinte forma:

$$\theta_{motor} = K\theta_{roda} \quad (9)$$

A posição do motor é obtida pela contagem dos pulsos gerados com a sua rotação, como o motor gera 60 pulsos por revolução obtemos:

$$\theta_{motor} \frac{60}{2\pi} = k\theta_{roda} \quad (10)$$

$$\theta_{motor} = k \frac{\pi}{30} \theta_{roda} \quad (11)$$

O valor de k , tipicamente, fica na faixa de 1500 a 2000, dependendo do veículo em que o mesmo está instalado. Como este valor multiplica a referência gerada para o controlador do motor, equação (9), a sua entrada é demasiadamente alta, por exemplo, considerando uma relação de 1600, para que a rode gire 1° é necessário que o motor rotacione 167° , assim sendo, para grandes variações na referência ocorre saturação do motor como pode ser observado na Figura 22, com o sinal de controle sendo exibido na Figura 23.

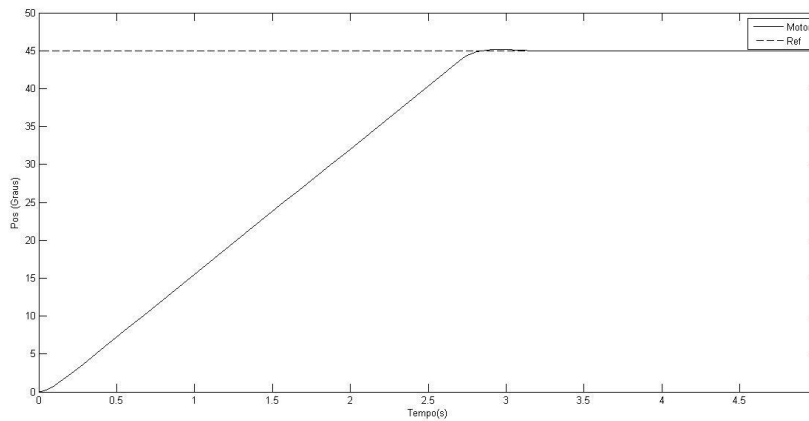


Figura 22 – Saída Malha Controle Motor CC (em rad) com constante relação motor-roda

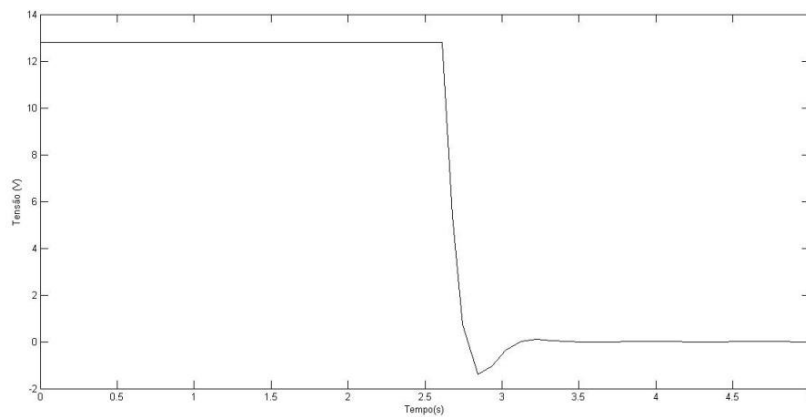


Figura 23 - Sinal Controle Motor CC com constante relação motor-roda

4.2 Válvula Hidráulica

4.2.1 Descrição

A válvula utilizada é do tipo proporcional, com 5 (cinco) vias e 3 (três) posições acionada por um duplo solenoide (ver Figura 24), possuindo o sistema Load Sense (orifício 5), que visa garantir pressão constante para o sistema hidráulico de direção do veículo, cortando o fluxo, caso necessário, para o reboque ou ferramenta de trabalho.

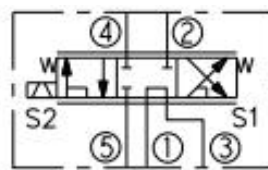


Figura 24 - Esquemático válvula hidráulica

Como pode ser observado na Figura 24, quando sem excitação nos solenoides, a válvula permite o fluxo direto entre pressão (1) e tanque (3). Quando o solenoide S1 é energizado o fluxo ocorre entre esquerda (4) e tanque (3) e entre LS (5) e direita (2), provocando o enchimento da câmara direita do cilindro da direção. Na excitação do solenoide S2 o fluxo é estabelecido entre LS (5) e esquerda (4) e entre direita (2) e tanque (3), provocando o enchimento da câmara esquerda do cilindro de direção.

Sua instalação é feita entre o orbitrol da direção e o cilindro responsável pelo movimento das rodas (ver Figura 25). Quando desligada, sem excitação em S1 ou S2, a válvula permite o funcionamento normal do sistema da direção, possibilitando ao condutor total controle do veículo através do volante. Na ativação do piloto, o condutor perde o controle do veículo via volante, já que qualquer movimento no mesmo será imediatamente observado pelo sistema de controle que o anulará instantaneamente. Para indicar a tentativa de utilização do volante, enquanto a válvula está ativada, a mesma possui uma saída analógica, o Injection Control Pressure Sensor, que possui sua saída alterada, no momento em que alguma força intervém no volante, desativando o sistema.

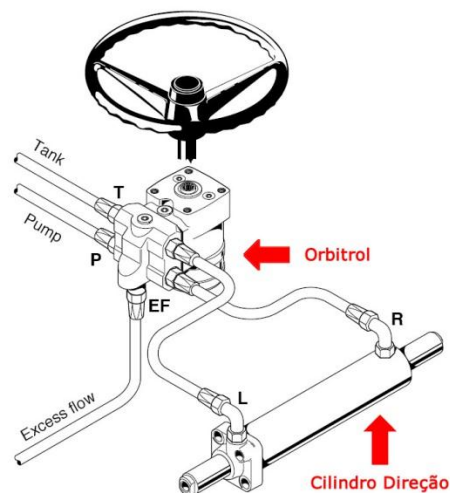


Figura 25 - Orbitrol e o cilindro de direção. Adaptado de: <http://www.unimog-mania.com/t3061-fuite-d-huile>

4.2.2 Modelo Válvula Hidráulica

Visando evitar avarias ao trator utilizado no levantamento do modelo dinâmico da válvula, que possui características integradoras, os testes foram realizados em malha fechada.

A posição da roda foi obtida via leitura do sensor e a malha fechada através de um controlador proporcional ($K_p = 70$), estrutura exibida na Figura 26. Os dados foram coletados a cada nova posição fornecida pelo sensor (aproximadamente 4ms). A referência gerada foi uma série de degraus, que cobriam a faixa de -40 a 40 graus (posição da roda), com amplitudes variando entre 10 e 40 graus.

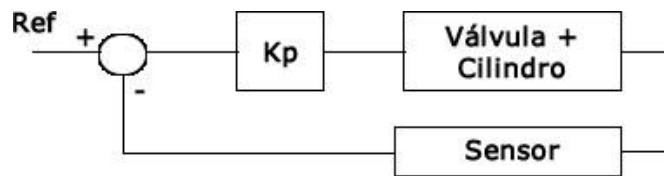


Figura 26 - Malha ensaio MF válvula hidráulica

Os dados obtidos com o ensaio são apresentados na Figura 27:

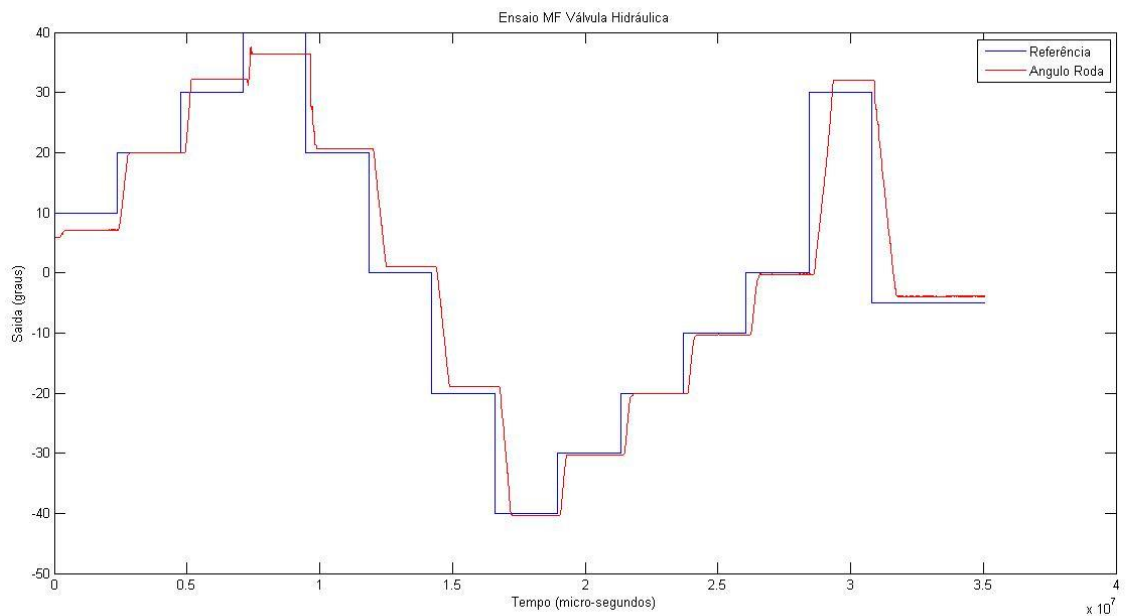


Figura 27 - Ensaio MF Válvula Hidráulica

Observando os dados da resposta, podemos inferir que o modelo em malha fechada do sistema pode ser aproximado como um modelo de primeira ordem com um atraso. Feito isto se considerou a seguinte função de transferência para a válvula em tempo discreto:

$$G(z) = K_v \frac{T_s z}{z - 1} z^{-d}$$

Com isso, têm-se duas variáveis a serem identificadas para a obtenção do modelo, K_v e o atraso d , T_s corresponde ao período de amostragem. A constante d , por representar o

número de amostras do atraso, pode ser facilmente obtida através dos dados coletados em campo, sendo constatado que seu valor médio foi de 13 amostras.

Vale ressaltar, que embora a planta apresente um integrador, não houve seguimento da referência com erro nulo nos testes em malha fechada, isto se deve a existência de uma zona morta no seu acionamento de aproximadamente 0.7V.

Para determinação do valor de K_v , decidiu-se utilizar a técnica de estimação de parâmetros via mínimos quadrados, em que o valor mais provável de uma grandeza desconhecida é aquele que minimiza a soma dos quadrados da diferença entre os valores observados e os valores calculados multiplicados por números que medem o grau de precisão.

Após aplicação de algoritmo apropriado nos dados coletados em campo, (detalhes da implementação e do funcionamento do cálculo da técnica podem ser encontrados em [16]) obteve-se 0.06 como estimativa ideal para o parâmetro K_v , sendo assim o modelo utilizado para representar a válvula hidráulica no desenvolvimento do controlador foi:

$$G(z) = K_v \frac{T_s z}{z - 1} z^{-d} = 0.0003 \frac{z}{z - 1} z^{-13}$$

Na Figura 28, podemos observar um comparativo entre a saída obtida da planta (em preto) e o modelo levantado (em vermelho).

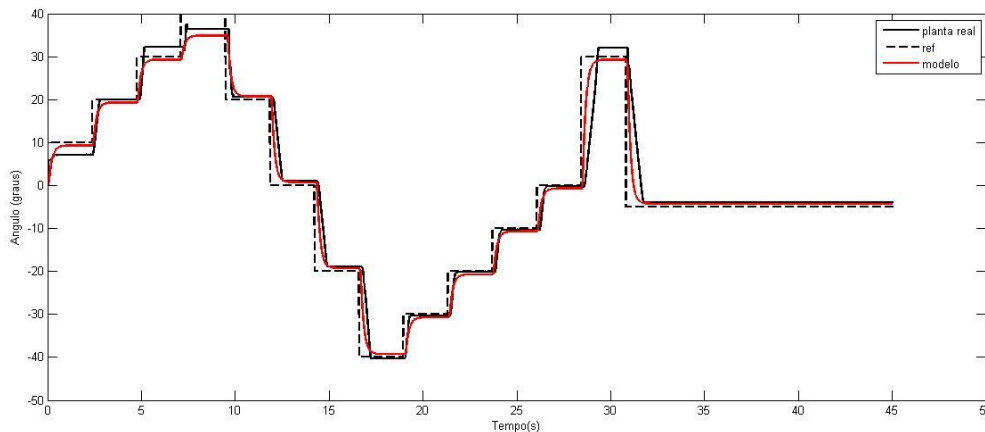


Figura 28 - Comparação entre a planta real e o modelo levantado

4.2.3 Lei de Controle

Para o controle de posição do atuador foi definido o seguinte conjunto de especificações:

- Seguimento das referências geradas pelo controlador da malha de erro e orientação do veículo com erro nulo.
- Tempo de resposta muito menor que a malha externa.
- Inexistência de oscilações e baixo sobre-sinal.

De posse do modelo da válvula, $G(z)$, levantado anteriormente foi possível realizar o projeto do controlador, chegando a seguinte solução inicial:

$$C(z) = K \frac{0.41z - 0.405}{z - 1}$$

O comportamento do controlador projetado é apresentado na Figura 29, com seu respectivo sinal de controle exibido na Figura 30. Percebe-se o seguimento de referência (30 graus) com erro nulo, tempo de resposta adequado, contudo um elevado sobre-sinal, de aproximadamente 60%, devido a dominância do zero adicionado a malha pelo controlador.

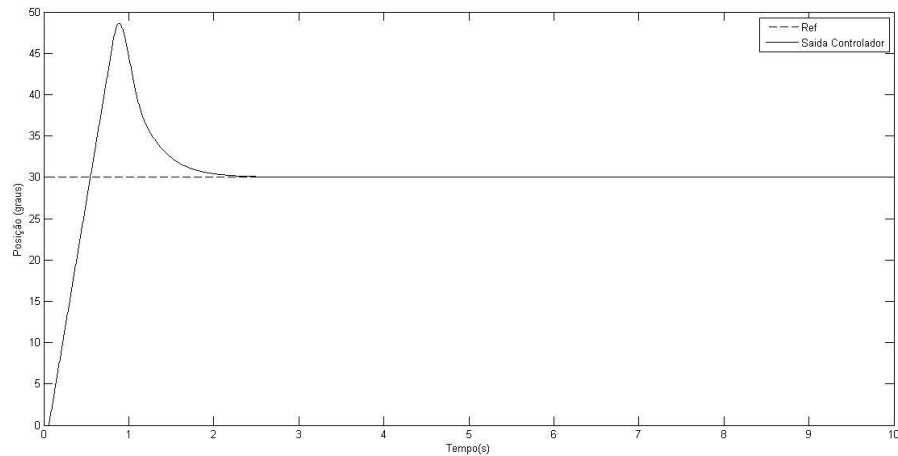


Figura 29 - Saída Controlador Válvula Hidráulica

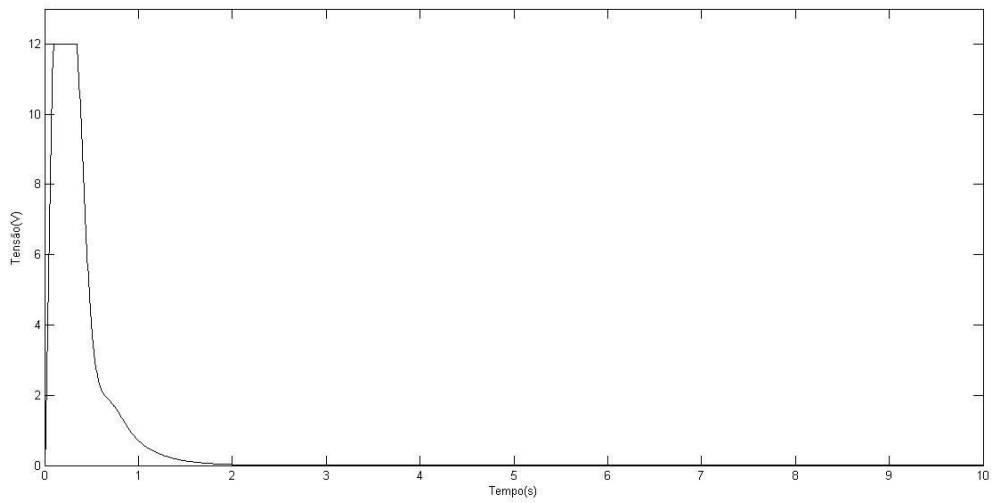


Figura 30 - Sinal Controle Válvula Hidráulica

Visando contornar o problema da elevada sobrepassagem, desenvolveu-se um filtro para a referência, que anulasse o zero do controlador e mantivesse a velocidade de resposta:

$$F(z) = \frac{0.0121}{z - 0.9879}$$

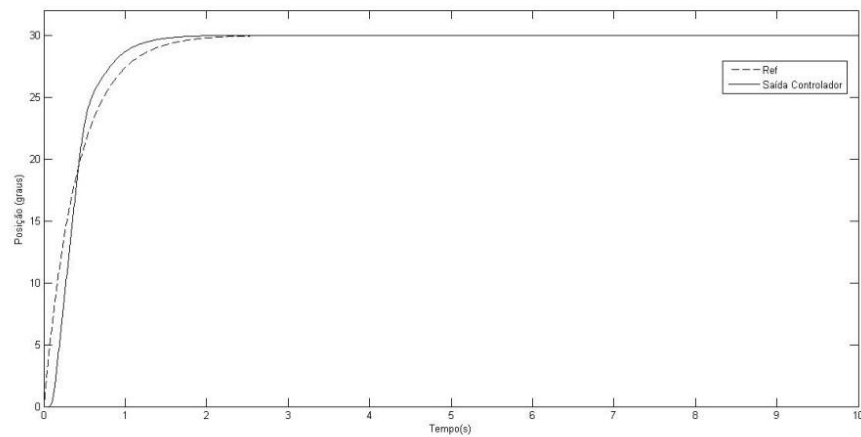


Figura 31 - Saída controlador válvula hidráulica com filtro para referência

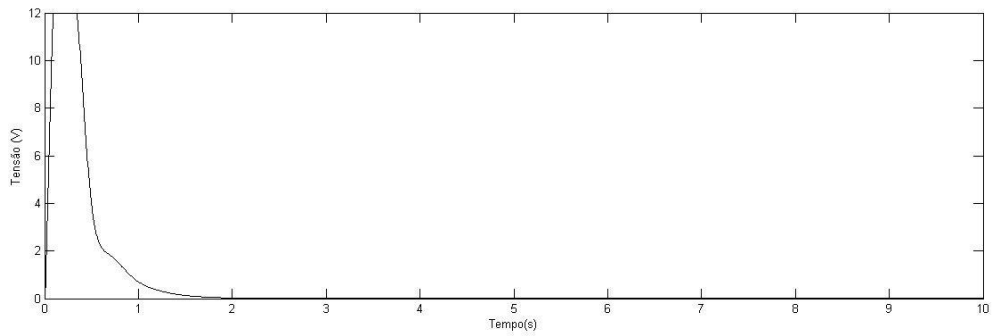


Figura 32 - Sinal Controle com a inclusão no filtro na referência

Observando a Figura 31, concluímos que o problema de elevada sobrepassagem foi devidamente solucionado. O tempo de resposta ficou adequado, em torno de 0,9ms, o que garante o correto atendimento as especificações. Através da Figura 32 verifica-se que ocorre uma curta saturação do sinal de controle, o que não chega a prejudicar o comportamento da resposta.

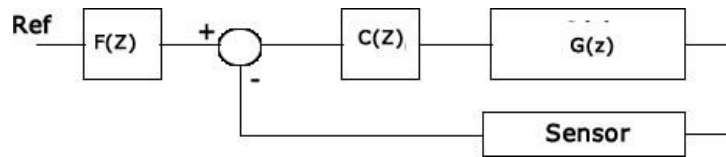


Figura 33 - Malha final controlador válvula

4.2 Conclusão

Descreveram-se os atuadores utilizados no piloto elétrico e no hidráulico. Apresentou-se a modelagem matemática dos dispositivos, bem como as técnicas de controle utilizadas no monitoramento da posição das rodas do veículo.

5 Controlador de Posição e Orientação

Neste capítulo serão apresentadas as soluções estudadas para o controle de posição e orientação do veículo, bem como uma descrição detalhada do controlador escolhido para o propósito.

5.1 Malha de controle

A malha de controle geral do sistema é composta por dois controladores dispostos em cascata (ver Figura 34).

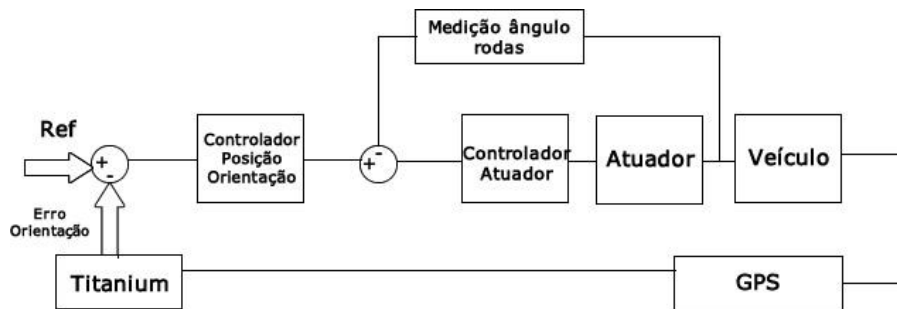


Figura 34 - Malha controle geral

Primeiramente têm-se o controlador de posição e orientação, recebendo continuamente os dados de interesse do computador de bordo (Titanium), isto é, o erro e orientação em relação à referência e a velocidade do veículo, vale ressaltar, que devido às características do modelo matemático utilizado na modelagem, suas referências, tanto de erro quanto de orientação são iguais à zero.

5.2 Controladores Propostos

Inicialmente implementou-se o controlador proposto por [4], contudo, o mesmo mostrou-se incapaz de rejeitar perturbações, como escorregamento entre a borracha de contato e o volante, erros de acionamento do motor elétrico, incertezas presentes nas leituras fornecidas pelo GPS, entre outros fatores, o que provocava o surgimento de um bias em relação ao erro (distância) para a trajetória de referência.

Visando contornar as dificuldades encontradas, adicionou-se, ao controlador anteriormente citado, um PI na malha responsável pelo controle do erro o que solucionou o problema identificado e permitiu sua viabilidade para os propósitos do projeto.

Devido ao sucesso na adição do PI, decidiu-se estudar e simular leis de controle alternativas, visando ter ferramentas para comparação dos resultados e posterior decisão da lei a ser utilizada no produto final.

Primeiramente, desenvolveu-se um controlador composto por dois PI em cascata (ver Figura 35), um responsável pelo controle do erro (mestre), que gerava uma referência para o controlador de orientação (escravo). Esta solução não se mostrou adequada, devido ao problema de constante saturação do motor elétrico, o que tornava a resposta demasiadamente oscilatória e em algumas situações instável.

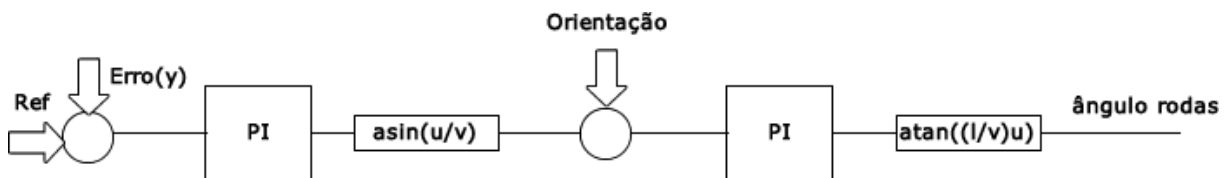


Figura 35 - Estrutura de controle PI cascata. V corresponde à velocidade, l a distância entre eixos e u o sinal de entrada do bloco.

Uma segunda alternativa consistiu em utilizar um PI incremental, visando limitar a saída do controlador, de forma tal, que a variação de sua resposta não exceda um valor limite, o que levaria ao mau comportamento do sistema com a saturação do atuador. A solução mostrou-se pouco robusta, já que, sua dinâmica alterava-se demasiadamente com mudanças ou variações na velocidade do veículo.

Por último, estudou-se a utilização de técnicas de controle preditivo baseado em modelo (MPC). Através de simulações, constataram-se tempos de resposta satisfatórios (em torno de 6 segundos), e a possibilidade de utilização de referências futuras de curvatura para trajetórias não retilíneas melhorou consideravelmente o desempenho do sistema, se comparado com a solução de [4]. Contudo, após análise do esforço computacional necessário para o processamento, quando da inclusão de restrições ao sinal de controle, sua utilização no projeto ficou inviabilizada, visto que, o processador em uso, não seria capaz de realizar os cálculos necessários em tempo hábil.

Desta forma, o controlador selecionado para compor o produto foi o proposto por [4] com as modificações necessárias para sua adequação aos propósitos do projeto que serão descritas a seguir.

5.3 Detalhamento

Como citado anteriormente, o controlador utilizado para produção foi o proposto por [4], contudo diversas adaptações foram realizadas no mesmo para sua total adequação aos requisitos do projeto, já que, o mesmo apresentou as seguintes características, que deveriam ser suprimidas, na sua prototipação para a plataforma utilizada pela empresa:

- Surgimento de um bias no erro em relação à referência, tipicamente dentro da faixa de 0 a 25cm.
- Mudança de sua dinâmica com alteração da velocidade do veículo (tempo de resposta elevando-se, sobre-passagem indesejada, oscilações).
- Saturação dos atuadores (para o Piloto Elétrico).

As diferenças apresentadas entre as simulações e os experimentos reais são decorrentes de dinâmicas que não foram devidamente modeladas tais como:

- Modelo de escorregamento entre motor elétrico e volante.
- Comportamento do sistema de compensação de posição com a inclinação do veículo.
- Atrasos inseridos nas malhas de controle com a utilização de filtros para os sinais de entrada.
- Dinâmica GPS.

Optou-se por não modelá-las para manter a simplicidade do modelo, além de questões relacionadas aos prazos impostos ao projeto para testes de protótipos e entrega de equipamentos a clientes, já que o tempo estimado para realizar as devidas correções no modelo era demasiadamente elevado, o que atrasaria o seu desenvolvimento acarretando em elevação de custos para a empresa.

5.3.1 Adição PI

A lei de controle, representada pela equação citada na seção 2.3, apresenta duas malhas de controle, uma para orientação do trator em relação referência e outra para o controle do erro em relação à trajetória (ver Figura 36).

Em algumas situações, devido à presença de perturbações, os sinais das malhas de controle de orientação e do erro se equivaliam, o veículo alinhava-se com a referência, contudo um bias surgia em relação ao erro, provocando a não conformidade com a especificação de seguimento da trajetória com erro inferior a 5 cm.

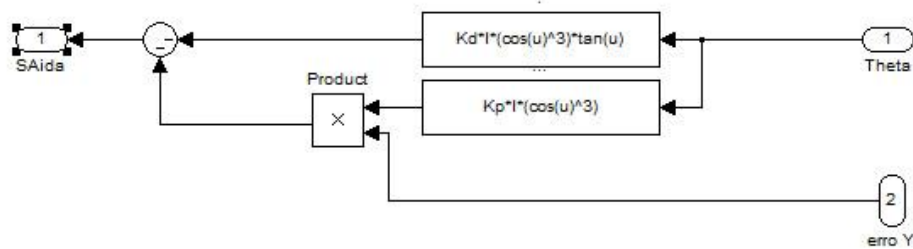


Figura 36 - Malhas de controle do erro e da orientação

Elevar o ganho K_p (malha de erro), apenas amenizava o problema reduzindo o bias, contudo a resposta era demasiadamente degradada, elevando a sobre-passagem e, em alguns casos, tornando o sistema oscilatório.

Visando elevar o sinal de controle da malha de y (erro) e levar o sistema novamente para o seguimento da referência dentro do especificado, inseriu-se um PI, conforme exibido na Figura 37, o que contornou o problema descrito.

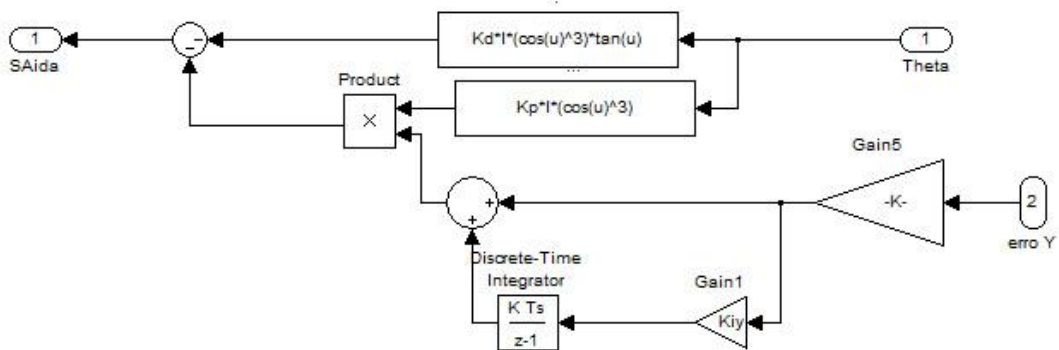


Figura 37 - Controlador com adição do PI

5.3.2 Uso de anti-windup

A saída do controlador, que corresponde ao ângulo para as rodas, é limitada em valores máximos de esterçamento possível para as mesmas. A existência dessa saturação com o uso do PI motivou a inserção de um anti-windup na malha de controle.

No momento em que ocorre a saturação, a malha de realimentação é de certa forma quebrada, já que o atuador permanece no seu valor de máximo (ou mínimo) independente da saída do processo. Entretanto, a parcela integrativa do controlador, continua a integrar o erro, podendo tornar sua parcela demasiadamente elevada. O controlador, para voltar a trabalhar fora da zona de saturação, necessita “descarregar” o termo integral, o que somente ocorre na aplicação de uma entrada de sinal contrário ao até então existente por um longo período, o que pode tornar a resposta transitória lenta e oscilatória. O seu efeito no sistema em estudo pode ser observado na Figura 38.

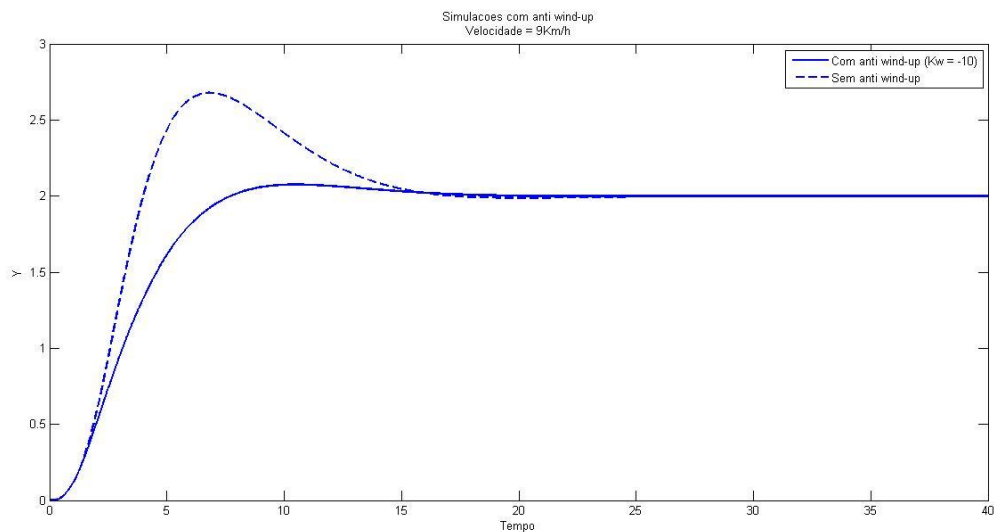


Figura 38 - Comparativo controlador com anti-windup (linha cheia) e sem anti-windup (pontilhado)

A técnica de anti-windup selecionada foi a de Back-Calculation e Tracking. Para tal, adiciona-se uma realimentação adicional, em que a diferença entre sinal efetivamente aplicado ao atuador e a saída do controlador é realimentado na parcela integral através de um ganho.

5.3.3 Saturação Dinâmica

Decidiu-se criar uma saturação dinâmica para o ângulo máximo de esterçamento das rodas com base na velocidade do veículo. Em uma analogia com um humano dirigindo um veículo, em altas velocidades, pequenas correções na direção já são suficientes para que o veículo trafegue com segurança, contudo, para manobras mais bruscas, como estacionar, ou dobrar uma esquina, reduz-se a velocidade do veículo para permitir, com segurança, ângulos maiores de atuação para a roda.

O mesmo princípio utilizou-se na saturação dos ângulos das rodas. Para velocidades baixas, inferiores a 5 Km/h, permite-se o esterçamento completo do volante, já para velocidades superiores o ângulo de atuação máximo é limitado. Isto é necessário para permitir tempos de resposta adequados para as baixas velocidades, não limitando desnecessariamente a faixa de atuação do controlador, e não permitir que o sistema torne-se instável ou oscilatório para deslocamentos com velocidades maiores.

O cálculo do valor da saturação dinâmica é realizado a cada ciclo de controle, sendo os valores de máximo e mínimo interpolados por uma equação de primeiro grau.

5.3.4 Escalonador de ganhos

Identificou-se a necessidade de adicionar um escalonador para os ganhos do controlador, com base na velocidade, devido a um requisito apontado pelos primeiros clientes que receberam o produto.

Os tratores eram operados em faixas de velocidade distintas, por exemplo, para plantio o mesmo era conduzido a 3 Km/h, já para pulverização a velocidade variava entre 12 Km/h e 16 Km/h. O ajuste dos ganhos para uma faixa de operação intermediária no ato da instalação não era satisfatório, pois o sistema tornava-se lento ou oscilatório para velocidades diferentes.

A adição do escalonador dos ganhos contornou o problema apresentado. Os ganhos foram escolhidos de forma tal que o tempo de aproximação à reta fosse inferior a 10 segundos, com baixa sobre-passagem. Seus valores podem ser ajustados em campo, visando atender da melhor forma possível às necessidades dos clientes.

5.3.5 Malha saturação Motor Elétrico

Como descrito na seção 4.1, devido à elevada referência imposta ao controle do motor elétrico, este acabava por operar durante muito tempo saturado, levando cerca entre 1 e 2 segundos para chegar ao valor desejado.

Isto é extremamente prejudicial ao sistema, já que dependendo das condições iniciais em que o controlador era ativado e da amplitude das perturbações, a saída não convergia para o valor desejado ou a resposta era degradada, fazendo com que o atuador operasse sempre nas rotações máximas à esquerda e a direita.

Uma forma de solucionar o problema seria permitir um ângulo máximo para esterçamento das rodas menor ou reduzir os ganhos do controlador ou elevar o ganho do anti-windup do PI, solução indesejada, por deixar o sistema demasiadamente lento.

Uma abordagem eficiente adotada para contornar o empecilho, foi a adição de uma nova malha de controle, semelhante ao anti-windup utilizado no PI. A cada ciclo de controle realiza-se a leitura da posição atual do atuador e compara-se o valor com a referência imposta no ciclo anterior. Caso exista uma diferença entre as mesmas, indicando que o atuador ainda não alcançou a saída desejada, o valor é subtraído do sinal de controle a ser aplicado no ciclo atual através do uso de um ganho apropriado, evitando-se assim a saturação do mesmo. Pela Figura 39, podemos observar o comparativo entre a saída utilizando o controle de saturação do motor elétrico (linha tracejada) e sem a solução (linha contínua), e a Figura 40 apresenta os sinais de controle dos respectivos sistemas.

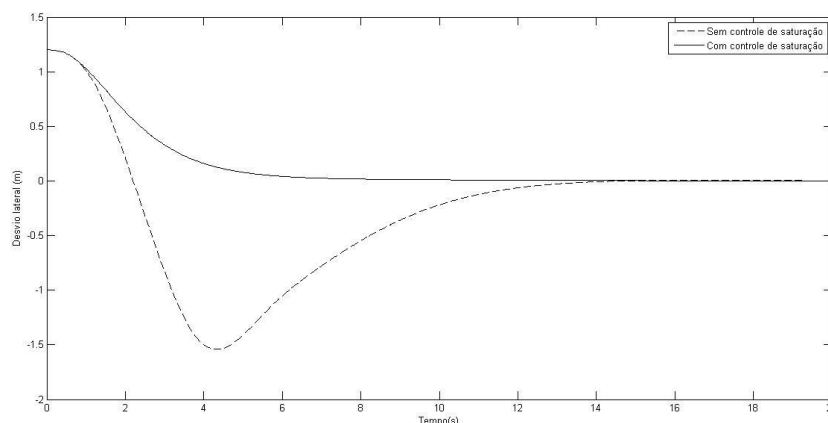


Figura 39 - Comparativo saídas com o controle de saturação do motor cc (tracejado) e sem (contínuo), simulação realizada a 3Km/h

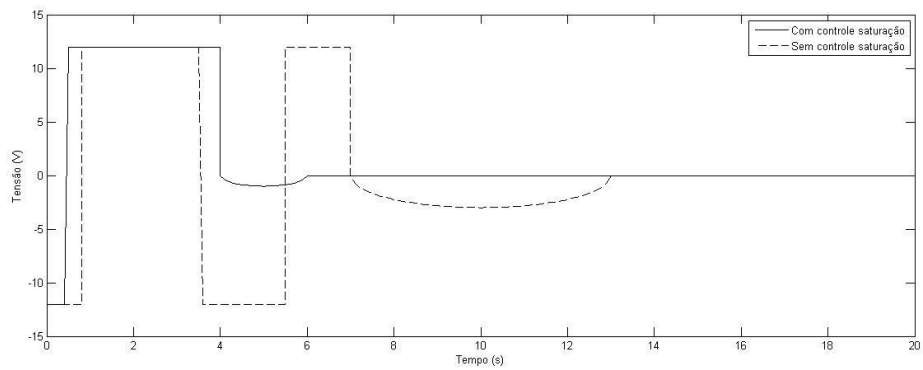


Figura 40 - Sinal controle para os sistemas com e sem monitoramento de saturação do motor

5.4 Conclusão

Apresentaram-se as técnicas de controle estudadas durante o desenvolvimento do projeto, listando seus prós e contras e os motivos que levaram a eleição do controlador utilizado. Descreveram-se as adaptações realizadas no controlador selecionado para sua total adequação aos requisitos de projeto.

6 Resultados

Neste capítulo serão avaliados os resultados da implementação e a conformidade dos mesmos com os requisitos de projeto.

6.1 Testes Práticos

Para testar os protótipos e eficácia do produto a Arvus Tecnologia firmou parcerias com clientes que disponibilizaram os veículos necessários para os experimentos.

As avaliações foram realizadas na cidade de Castro-PR, conhecida pela forte tradição agropecuária sendo considerado um dos maiores produtores de grãos do Estado do Paraná.

Procurou-se repetir condições reais de manuseio dos tratores, nos quesitos de velocidade de operação, condições do solo e inclinação dos terrenos, além de obter opiniões e sugestões dos colaboradores das fazendas em que os testes eram realizados.

Em todos os testes os dados (velocidade, posição, desvio lateral, leitura de sensores, sinais de controle) eram armazenados pelo Titanium com uma taxa de amostragem de 1Hz, para posterior avaliação na sede da empresa e identificações de comportamentos anormais.

6.2 Piloto Elétrico

Os primeiros testes realizados com o piloto elétrico, devido ao estado de desenvolvimento em que se encontrava o projeto, foram exclusivamente para avaliação do desempenho do produto para trajetórias retilíneas, assim sendo, não se realizou testes em trajetórias curvas com o mesmo.

6.2.1 Análise Desvio Lateral para Trajetórias Retas

Os experimentos foram realizados em trajetórias com aproximadamente 200m de extensão, com velocidades compreendidas entre 4Km/h e 8 Km/h, já que, devido a questões de segurança não foi possível testar o equipamento para velocidades superiores.

O início de operação foi realizado com distâncias compreendidas entre 0.2m e 1m de distância da reta de referência, com ângulo de inclinação variando entre 0° e 20°.

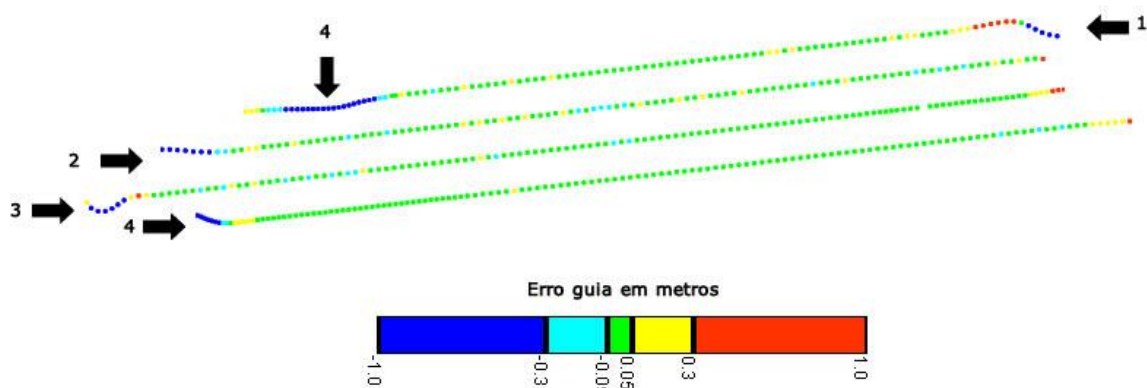


Figura 41 - Desvio Lateral Piloto Elétrico

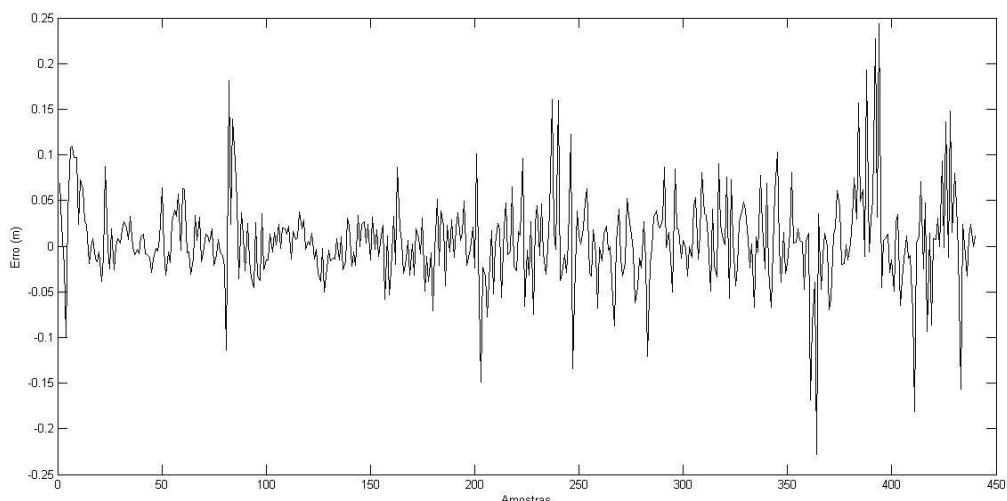


Figura 42 - Variação do erro em baixa velocidade para a trajetória 2.

Pela Figura 41, podemos observar o comportamento do sistema e na Figura 42 é exibido a evolução do desvio lateral para a trajetória 2. As setas (numeradas de 1 a 4) indicam o início de operação. O tempo de acomodação foi de, em média, 12 segundos, com baixo sobre-sinal. Após o correto alinhamento com a referência o pico máximo do erro foi da ordem de 0,2m, observado na trajetória 2. A média do erro foi de 0,03m, com um desvio padrão de 0,0370m.

Em destaque (seta 4) na Figura 41, podemos observar o problema de filtragem dos sensores responsáveis pela obtenção de inclinação do veículo. No caso, o problema foi descoberto durante a realização dos testes práticos e de forma rápida fez-se um filtro para os sensores sem nenhum estudo prévio do comportamento dos sinais envolvidos, o que fez com

que a dinâmica de determinação do ângulo de inclinação do veículo ficasse mais lenta que a dinâmica do GPS, provocando o erro prolongado observado.

6.3 Piloto Hidráulico

6.3.1 Análise Desvio Lateral Para Trajetórias Retas

Para análise do desvio lateral, foram realizados dois experimentos baseados na velocidade do veículo, no primeiro, que pode ser observado na Figura 43, trafegou-se em velocidades baixas, utilizadas principalmente para plantio, variando entre 4Km/h e 8Km/h.

No segundo cenário, mostrado na Figura 45, conduziu-se o veículo para velocidades compreendidas entre 8Km/h e 12Km/h, normalmente utilizadas para aplicação de defensivos. Velocidades superiores não foram objeto de estudo, devido a questões de segurança, já que era inviável trafegar com deslocamentos superiores nos veículos cedidos.

Em ambos os casos partiu-se de distâncias compreendidas entre 0.3m e 1.5m das retas de referência e com inclinação variando entre 0° e 30° para as mesmas, percorrendo trajetos com cerca de 100m de comprimento.

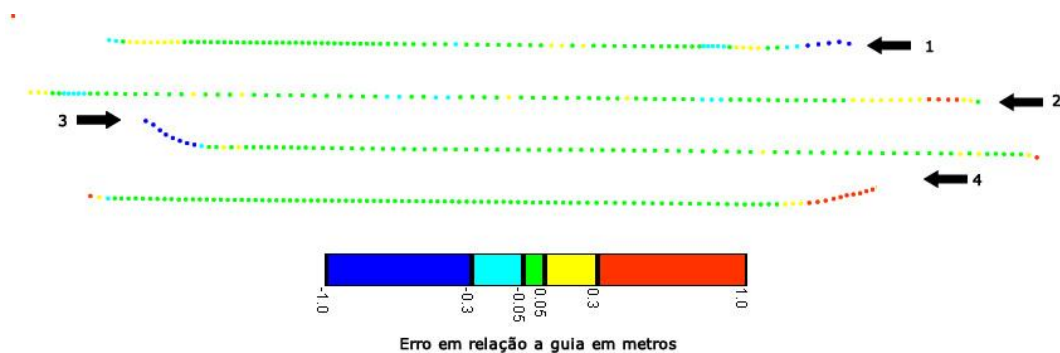


Figura 43 - Desvio Lateral. Velocidade entre 4km/h e 8km/h. As setas indicam o início de operação

Na Figura 43 (teste em baixa velocidade), as setas indicam o local de início de operação e os números identificam o número do teste. Para as trajetórias 1 e 2 partiu-se com uma distância de aproximadamente 0.3 em relação a reta de referência, e nas identificadas pelos números 3 e 4 o desvio lateral inicial era de cerca de 1m.

Observando as trajetórias exibidas na Figura 43, podemos constatar que as indicadas pelos números 1 e 2 apresentam maiores pontos em que o erro encontra-se acima do especificado, apresentando uma melhora nos teste 3 e 4, devido a ajustes nos ganhos do

controlador utilizado. O tempo de acomodação médio foi de 12s, com um mínimo de 7s para a trajetória 1 e um máximo de 14s para a trajetória 4. O sobre-sinal é baixo, com um máximo de 8cm para trajetória 1. O pico máximo no desvio lateral, após o ajuste ideal dos ganhos, foi de 8cm observado na trajetória 2. A média do erro foi de 0.017m com um desvio padrão de 0.015m. Pela Figura 44, podemos observar em detalhes a variação do erro durante o teste realizado na trajetória 1.

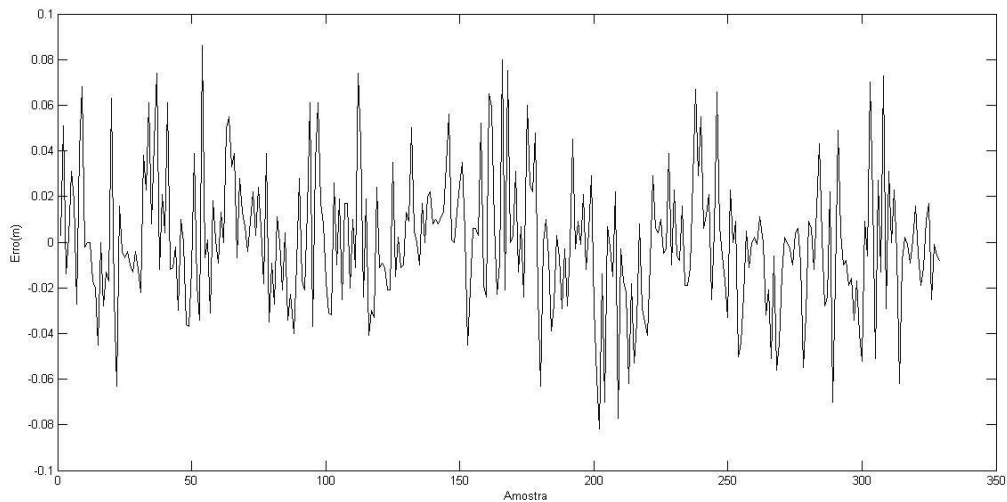


Figura 44 - Variação do erro em baixa velocidade para a trajetória 1.

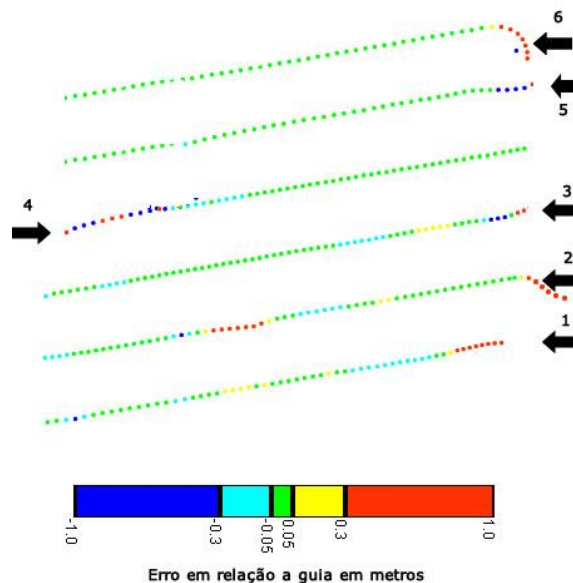


Figura 45 - Análise do desvio lateral. Velocidades entre 8Km/h e 12Km/h. As setas indicam o início de operação.

Na Figura 45 são apresentados os dados obtidos para velocidades compreendidas entre 8Km/h e 12Km/h. Como nos testes para baixas velocidades podemos observar uma melhora significativa entre os resultados obtidos nas trajetórias 6 a 1, devido ao progressivo ajuste dos

ganhos do controlador. O tempo médio de acomodação foi de 11s, com um máximo de 14s, trajetória 4, e um mínimo de 5s, trajetória 5. Sobre-sinal excede o limite de 5cm nas trajetórias 1, 2, 3, 4, o que é solucionado com o ajuste apurado do controlador. A média do erro foi de 0.022m com um desvio padrão de 0,019m.

6.3.2 Conclusões Testes Trajetórias Retas

Como descrito, pode-se constatar a adequação da solução proposta com os requisitos de projeto, contudo testes ainda devem ser realizados em veículos apropriados para atestar o funcionamento do piloto para velocidades de até 25Km/h.

Verificou-se que a ajuste correto dos ganhos do controlador, assim como os tipos de filtros utilizados nos sensores, são de extrema importância para o correto funcionamento do sistema, diferenças estruturais e de conservação entre os mais diversos modelos de veículos, impedem um ajuste único das variáveis de controle.

Os tempos de resposta e sobre-sinal mantiveram-se estáveis para faixas de velocidades diferentes atestando o bom funcionamento do escalonador de ganhos proposto. Percebe-se que quanto maior o ângulo existente entre o trator e a reta de referência maior é o sobre-sinal da resposta, contudo o mesmo encontra-se dentro de valores aceitáveis.

6.3.3 Análise Desvio Lateral para trajetórias Curvas

Os testes para trajetórias curvas podem ser observados na Figura 46, com a variação do desvio lateral mostrado na Figura 47. A curva gerada possuía uma extensão de 50m com um raio de curvatura médio de 25m (mínimo de 8m). A velocidade de deslocamento variou entre 3.5Km/h e 7Km/h.

Assim como nos experimentos anteriores a taxa de amostragem de dados foi de 1Hz e o início de operação se deu com um erro inicial de 1m.

Podemos observar picos maiores no erro (máximo de 0.8m) se comparado com os experimentos para trajetórias retas, principalmente para os trechos com raios de curvatura reduzidos, inferiores a 20m. A média do erro ficou 0.08m, com um desvio padrão de 0.2m.

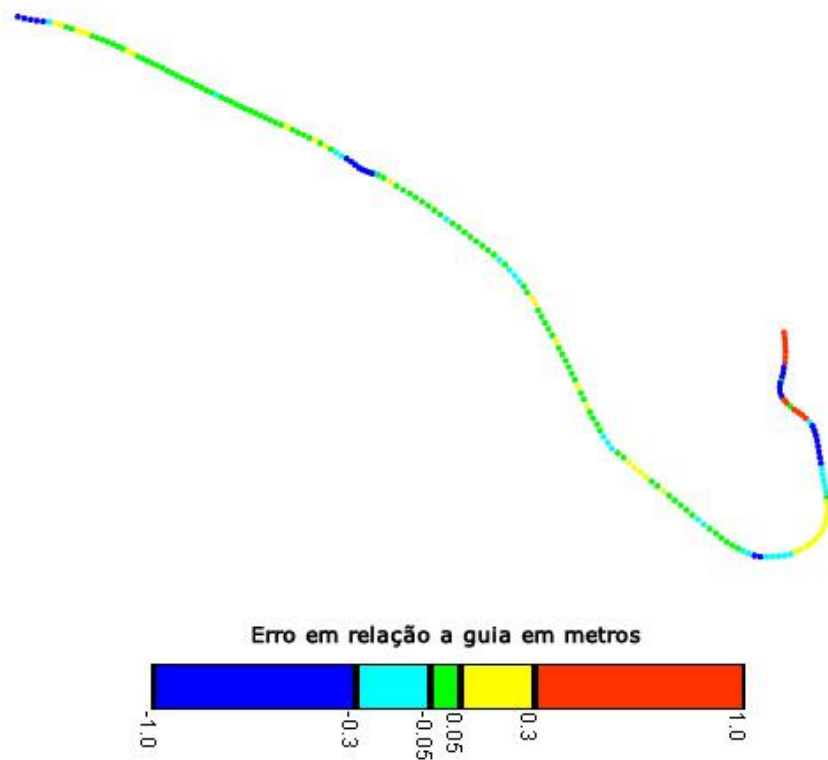


Figura 46 - Erro em Relação a Guia - Trajetória Curva

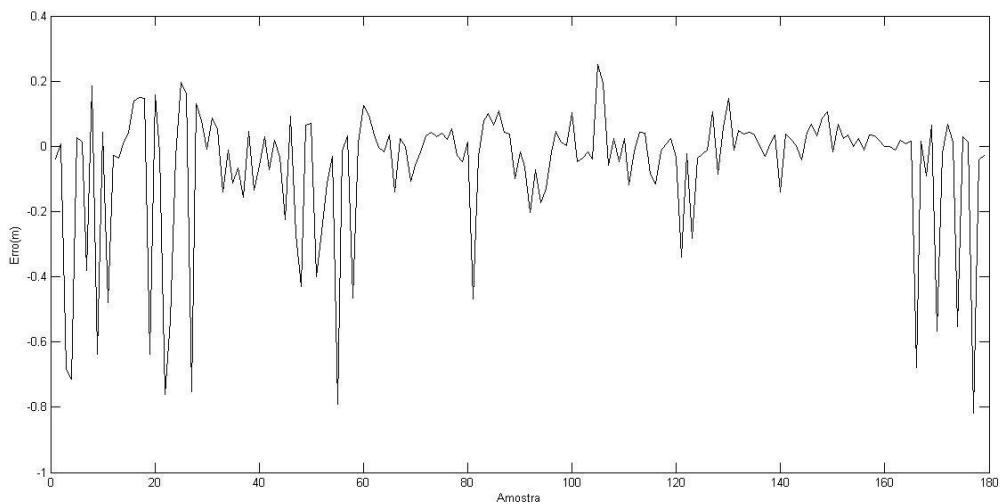


Figura 47 - Variação do erro para a trajetória curva

6.3.4 Conclusões Testes Trajetórias Curvas

O comportamento do piloto para trajetórias curvas não se encontra dentro do especificado para o seu funcionamento, o erro ficou, durante certos períodos, muito acima do permitido. Mudança nos ganhos do controlador e dos atuadores, pouco melhorou a resposta.

Estudando-se os dados obtidos em campo, decidiu-se realizar melhorias no algoritmo responsável por gerenciar as guias curvas visando contornar os problemas. Para a construção da curva, o operador primeiramente realiza o trajeto desejado em modo manual e o Titanium a cada 500ms grava os dados de posição e orientação do trator. Os pontos gerados são então interpolados por retas e a partir delas são realizados os cálculos de erro e orientação em relação à guia. A curvatura é obtida utilizando-se 3 pontos, onde calcula-se uma circunferência que melhor os interpola.

Constatou-se que da forma como a curva era gerada a curvatura não apresentava variações suaves, podendo modificar seu valor de forma muito abrupta entre dois pontos consecutivos o que degradava a resposta já que os atuadores não conseguiam responder prontamente a mudança repentina de referencial.

Outro problema reside na orientação calculada para a curva, efeito que pode ser observado na Figura 48. A interpolação usando dois pontos pode apresentar diferenças significativas se comparado com a orientação real, o que induz a erros no controlador, principalmente para o seu correto alinhamento com a mesma, já que a curvatura fornecida não é compatível com a orientação enviada para cálculo da malha de controle.

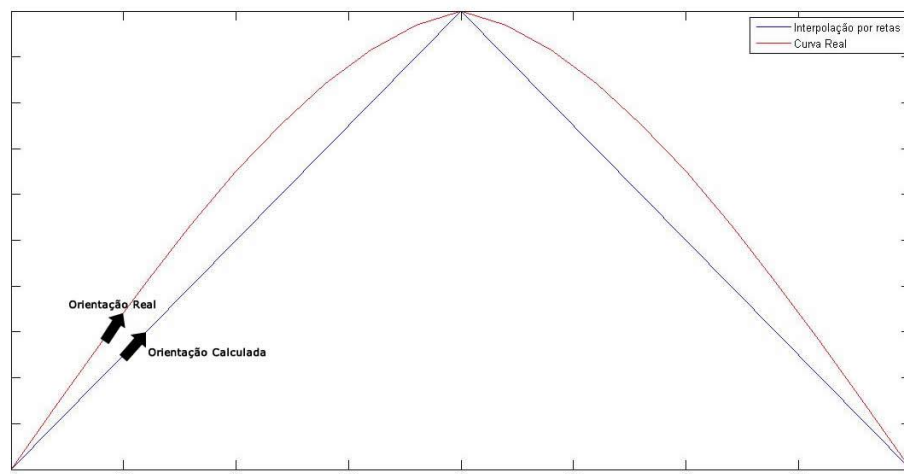


Figura 48 - Diferenças entre a orientação interpolada e real

Para contornar o problema estudam-se duas vertentes:

- Modificar o período de amostragem para aquisição dos dados da curva, reduzindo-o de 500ms (o GPS é capaz de fornecer dados a cada 100ms).
- Interpolar os pontos obtidos utilizando algoritmos de Splines Cúbicas.

Para ambos os casos o custo computacional deverá ser devidamente analisado. Alterando-se o período de amostragem, ou interpolando os pontos do GPS via Spline Cúbica, têm-se um maior número de pontos para definir a curva, o que acarreta em um maior número de cálculos para definir o erro em relação à mesma (busca do ponto mais próximo), além de maior sobrecarga dos algoritmos de filtragem e suavização da curva.

Em simulação as duas alternativas foram implementadas apresentando considerável melhora no controle, falta apenas, comprovação através de testes em campo para decidir a melhor técnica a ser adotada.

6.4 Conclusão

Pode-se validar o correto atendimento das especificações de projeto para o seguimento de trajetórias retilíneas, tanto para o piloto elétrico quanto para o piloto hidráulico. Observando a média do erro do desvio lateral (trajetórias retilíneas) nota-se um desempenho melhor do piloto hidráulico (média de 0.017m) em relação ao piloto elétrico (erro de 0.03m), isto se deve ao desempenho dos atuadores, em que a válvula hidráulica apresenta uma dinâmica mais rápida que o motor elétrico, principalmente para grandes variações na referência.

Para trajetórias curvas o produto ainda precisa ser aprimorado, principalmente o algoritmo de geração da mesma, já que o desvio lateral encontra-se muito acima do permitido.

7 Conclusões e Perspectivas

Este documento apresentou o desenvolvimento do projeto Piloto Automático para Veículos Agrícolas realizado na Arvus Tecnologia, em período integral, com intensa aplicação dos conhecimentos adquiridos durante a graduação do curso de Engenharia de Controle e Automação.

Apresentou-se um estudo das soluções já existentes no mercado ou no meio acadêmico e sua adaptação para os propósitos e prazos inerentes ao projeto, bem como uma descrição de toda a instrumentação, atuadores e algoritmos de controle selecionados para a solução final.

Os resultados obtidos foram compatíveis com os requisitos de projeto no que tange o seguimento de retas, para trajetórias curvas adaptações precisam ser realizadas no produto para o seu correto funcionamento.

O projeto desenvolvido já se encontra em fase de comercialização, respeitando-se as condições de funcionamento e operação apresentadas até o momento e para o futuro, visando a continua melhoria da solução obtida espera-se:

- Seguimento de trajetórias curvas dentro do especificado através do uso de interpolação via splines ou pela modificação no período de obtenção de pontos da curva, como descrito no Capítulo 5.
- Teste em velocidades superiores a 15Km/h, visando atestar o funcionamento do sistema para esta faixa de operação.
- Integração de um sistema INS+GPS via filtro de Kalman, visando reduzir o período de obtenção de posição do veículo atualmente em 100ms.

Referências

- [1] MOLIN, J. P., Agricultura de Precisão. Parte 1: O que é e estado da arte em sensoriamento. Engenharia Agrícola, v. 17, f. 2, p. 97-108, 1997.
- [2] Arvus Tecnologia. Acessado em: 09/01/2012. Disponível em: http://www.arvus.com.br/infos_AP.htm.
- [3] OLIVEIRA, Tiago C. A; MOLIN, José P. Uso de piloto automático na implantação de pomares de citros. *Eng. Agríc.*, Abr 2011, vol.31, no.2, p.334-342.
- [4] THUILOT, B.; CARIOU, C.; CORDESSES, L.; MARTINET, P. Automatic guidance of a farm tractor along curved paths, using a unique CP-DGPS. *Intelligent Robots and Systems*, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on , out 2001, vol 2, p. 674 – 679.
- [5] SANTOS, M. M. Desenvolvimento de um Sistema de Localização e Reconstrução de Trajetórias para um Veículo Terrestre, Dissertação, Set 2009.
- [6] Wikipedia, “Satellite Navegation”. Acessado em 15/01/2012. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation.
- [7] OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno, 4ª edição. Prentice Hall, 2006, p45.
- [8] SAMSON, C. Control of Chained Systems. Application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots. *IEEE Trans, on Automatic Control*, 40(1):64:77, January 1995.
- [9] BROCKETT, R. W, “Asymptotic stability and feedback stabilization,” in Proc. conf. held at Michigan Technological University, June-July 1982, Progress in Marh., vol. 27, Birkhauser, pp. 181-208, 1983.
- [10] COELHO, A. A. R. Identificação e Controle Adaptativo. Acessado em: 28 de janeiro de 2011. Disponível em: http://www.das.ufsc.br/~aarc/ensino/graduacao/DAS5901/Iden_CAP_4.pdf

- [11] PEREIRA, F. S. Antena GPS com Compensação de Inclinação [trabalho de conclusão de curso]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Eng. De Controle e Automação, Departamento de Automação e Sistemas; 2011.
- [12] FRANÇA Jr, J. A. Simulação e Implementação em Tempo Real de Sistemas de Navegação Inercial Integrados INS/GPS [dissertação]. Rio de Janeiro: Instituto Militar De Engenharia, Curso de Mestrado em Engenharia de Defesa, Departamento de Ciência e Tecnologia; 2009.
- [13] LATHI, B. P. Sinais e Sistemas Lineares, 2º edição. Bookman, 2007.
- [14] RAFFO, G. V. Algoritmos de Controle Preditivo para Seguimentos de Trajetórias de Veículos Autônomos [dissertação]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2005.
- [15] UFRGS: Wind-up da Ação Integral. Acessado em: 05/02/2012. Disponível: <http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node31.html>.
- [16] COELHO, A. A. R. Identificação e Controle Adaptativo. Acessado em: 11 de fevereiro de 2011. Disponível em: http://www.das.ufsc.br/~aarc/ensino/graduacao/DAS5901/Iden_Cap_51.pdf