CLAYTON JOSÉ TORRES

Arquitetura supervisória aplicável na robótica
agrícola móvel

São Carlos

2013

CLAYTON JOSÉ TORRES

Arquitetura supervisória aplicável na robótica
agrícola móvel

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Manufatura

Orientador: Professor Assoc. Mário Luiz Tronco

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE
DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA EESC-USP.

São Carlos

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

T693a Torres, Clayton José
Arquitetura supervisória aplicável na robótica agrícola móvel / Clayton José Torres; orientador Mário Luiz Tronco. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Sistema Supervisório. 2. Robótica Agrícola Móvel. 3. Agribot. 4. Agricultura de Precisão. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Tecnólogo **CLAYTON JOSÉ TORRES**.

Título da dissertação: "Arquitetura supervisória aplicável na robótica agrícola móvel".

Data da defesa: 06/02/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Mario Luiz Tronco (orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Emerson Carlos Pedrino**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Dr. **Edilson Reis Rodrigues Kato**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

A minha Mãe: *Natalia M. Tagliaferro Torres.*

As minhas filhas: *Kaylane Torres e Isabelly R. C. T. Alves.*

A minha irmã: *Marly Torres Bridi.*

Pelo amor, carinho, atenção, incentivo e confiança.

Dedico

A meu eterno pai: *Eurides Torres (in memorian).*

Pois os ensinamentos de um pai nunca morrem.

Ofereço e Homenageio

Agradecimentos

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, me auxiliaram e me apoiaram neste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mário Luiz Tronco, pela dedicada orientação, pela oportunidade e acima de tudo pela amizade.

Aos Professores Dr. Arthur José Vieira Porto e Dr. Marcelo Becker pelo apoio nas tarefas que envolveram esse trabalho além da amizade.

Aos demais professores, funcionários e amigos do departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

Aos amigos do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Automação e Simulação, em especial a John Faber, Giovana Tangerino, Rubens Tabile, Wellington Lopes, Rafael Coronel, Henry Borrero, Rafael Souza, Lulio, Tiberti, Beth, Elson pela amizade e companheirismo.

À USP e a Escola de Engenharia de São Carlos pelo suporte no desenvolvimento do presente trabalho de Mestrado.

À minha amiga Giovana Alves pela amizade, dedicação e amor com que cuida e educa nossas filhas.

A todos os meus familiares, em especial a Gilberto, Giovani e Jéssica Bridi, Tercilia Araujo, Ângela e Domingos Tagliaferro, e meus primos Marili, Ivan, Daniel, Mariane, Rogério e Rose. Pelo carinho, incentivo, amizade e confiança.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.”

Marthin Luther King

Resumo

TORRES, C. J. Arquitetura Supervisória Aplicável na Robótica Agrícola Móvel. São Carlos, 146 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

A agricultura nacional, buscando uma maior integração e participação no mercado global, tende a investir cada vez mais na automação de máquinas e implementos agrícolas, visando maior eficiência e qualidade em seus produtos. Para responder rapidamente às mudanças impostas pelo mercado, o emprego do conceito de Agricultura de Precisão (AP), têm mostrado bons resultados, tais como uma melhor utilização das máquinas, melhor aproveitamento na área de plantio entre outros benefícios. Para tal, pesquisas voltadas ao desenvolvimento de máquinas, com nível elevado de automação, capazes de operar de forma autônoma, estão ganhando cada vez mais espaço no setor agrícola. Considerando esse cenário, no presente trabalho são apresentadas uma revisão sobre Controle Supervisório e Aquisição de Dados (SCADA), no contexto da Agricultura de Precisão, e a proposta de um modelo supervisório, aplicável na robótica agrícola móvel utilizando, como plataforma experimental o veículo Agribot.

Palavras chave: Sistema Supervisório, Robótica Agrícola Móvel, Agribot, Agricultura de Precisão.

Abstract

TORRES, C. J. Supervisory Architecture Applicable in Mobile Agricultural Robotics. São Carlos, 146 p. Master (Msc) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2013.

National agriculture, seeking greater integration and participation in the global market tends to increasingly invest in the automation of agricultural machinery and implements, aiming at greater efficiency and quality in their products. To respond quickly to changes driven by the market, the use of the concept Precision Farming (PF) have shown good results, such as better machine utilization, better utilization in the planting area among others benefits. To this end, research aimed at developing machines with high level of automation, able to operate autonomous, are gaining more and more space in the agricultural sector. Considering this factor, this work is a review on the Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) in the Precision Farming context and the proposal of a supervisory model applicable in mobile agricultural robotics using as platform the vehicle Agribot.

Keywords: Supervisory System, Mobile Agricultural Mobile, Agribot, Precision Farming.

Lista de figuras

Figura 1 - Tipos de rodas. (a) Roda fixa. (b) Roda orientável centralizada, adaptado (SECCHI, 2008).....	32
Figura 2 - Estrutura do sistema de integração de sensores. adaptado (RUCKELSHAUSEN, 2009).....	35
Figura 3 - Trator autônomo (GRIEPENTROG et al., 2009)	37
Figura 4 - Componentes de segurança do trator autônomo, adaptado (GRIEPENTROG et al., 2009).....	38
Figura 5 - Savage, veículo autônomo de apoio para agricultura (SAVAGE, 2013)	40
Figura 6 - BoniRob (KLOSE et al., 2010).....	41
Figura 7 - Veículo agrícola autônomo (FREITAS, 2008)	42
Figura 8 - Robô Agrícola Móvel (RAM). Detalhe do módulo da roda dianteira e sistema de propulsão e guiagem (TABILE et al., 2011).	43
Figura 9 - RAM robô agrícola móvel (TABILE et al., 2011)	44
Figura 10 - Plataforma robótica Agribot	46
Figura 11 - Rede FIELDBUS, adaptado (BAILEY; WRIGHT, 2013)	47
Figura 12 - Tela de dosagem (ELIPSE SOFTWARE, 2013)	50
Figura 13 - Arquitetura genérica de um sistema SCADA. Adaptado de (DANEELS; SALTER, 1999).....	52
Figura 14 - Tela Elipse SCADA (ELIPSE SOFTWARE, 2013)	56
Figura 15 - Tela do Supervisório RSView32 (Automation-Drive.Com, 2014)	58
Figura 16 - Tela do InduSoft Web Studio (INDUSOFT, 2014)	59
Figura 17 - Agribot visão geral, adaptado de (TABILE, 2012)	61
Figura 18 - Dimensões do Agribot (TABILE, 2012)	61
Figura 19 - Ângulos de inclinação do Agribot, adaptado de (TABILE, 2012).	62
Figura 20 - Subsistema da roda do Agribot (TABILE, 2012)	63
Figura 21 - Motor do Agribot (TABILE, 2012)	63
Figura 22 - Geometria de Ackermann adaptado de (RAJAMANI, 2006).....	64
Figura 23 - Simulação do modelo cinemático (TORRES, et al., 2012)	67
Figura 24 - Diagrama Eletro-hidráulico de propulsão e guiagem do Agribot.....	68
Figura 25 - Diagrama hidráulico de propulsão do Agribot (REXROTH, 2010).....	70

Figura 26 - Diagrama hidráulico de guiagem do Agribot	71
Figura 27 - Válvula proporcional e gráfico de desempenho (HYDRAFORCE, 2011).....	73
Figura 28 - Sinal elétrico dos solenóides.....	73
Figura 29 - Ângulos de esterçamento em relação ao sinal digitalizado	74
Figura 30 - Posições das rodas e valores digitalizados.....	76
Figura 31 - Diagrama simplificado de funcionamento do Agribot	77
Figura 32 - IHM para operação do Agribot.....	78
Figura 33 - Diagrama de conexão entre os subsistemas do Agribot e IHM.....	79
Figura 34 - Arquitetura Supervisória do Agribot (TORRES, et al., 2013).....	84
Figura 35 – Diagrama Caso de Uso Agribot / Supervisório.....	86
Figura 36 - Diagrama Caso de Uso dos requisitos funcionais do modelo supervisório	87
Figura 37 - Diagrama Caso de Uso dos requisitos não funcionais do supervisório	92
Figura 38 - Diagrama de Sequência Agribot / Supervisório	95
Figura 39 - Diagrama de Atividades Usuário / Supervisório	97
Figura 40 - Arquitetura do Agribot (TORRES et al., 2013).....	101
Figura 41 - Histórico de mensagens trocadas entre o computador e os módulos de controle	104
Figura 42 - Diagrama de fluxo para controle de esterçamento (TANGERINO et al. 2011)..	105
Figura 43 - Resultados para o esterçamento da roda DE (TANGERINO et al., 2011).....	106
Figura 44 - Diagrama de blocos do controle em Labview	107
Figura 45 - Resposta com o algoritmo proposto para o Labview.....	107
Figura 46 - Diagrama de fluxo de controle implementado em C++.....	109
Figura 47 - Resposta do algoritmo de controle implementado em C++.....	110
Figura 48 - Diagrama de blocos do controle PD implementado em C++	111
Figura 49 - Resposta do controle PD.....	112
Figura 50 - Resposta do sistema para 45 e 0 graus.....	112
Figura 51 - Tela para controle de baixo nível do Agribot.	113
Figura 52 - Modelo de Ackermann do Agribot	116
Figura 53 - Modelo cinemático para esterçamento das quatro rodas do Agribot.....	117
Figura 54 - Resultados da simulação cinemática para o Agribot	118
Figura 55 - Modo de direção paralela do Agribot para um ângulo de 90°	119
Figura 56 - Modo de guiagem para o Agribot girar em seu próprio eixo.....	120
Figura 57 - Painel principal de controle do sistema supervisório do Agribot	122
Figura 58 - Tela do Modo de Guiagem Semi-Autônomo.....	123
Figura 59 - Manobras do Agribot (Embrapa, 2013).....	124

Lista de tabelas

Tabela 1 - Classificação dos sensores em robótica adaptada de (SECCHI, 2008).....	34
Tabela 2 - Funções do sistema de supervisão e aquisição de dados.....	48
Tabela 3 - Módulos do sistema SCADA	51
Tabela 4 - Requisitos não funcionais.....	53
Tabela 5 - Requisitos funcionais	54
Tabela 6 - Exemplo de dados via mensagem CAN fornecidos pelo MC050-010.....	102
Tabela 7 - Exemplos de dados estruturados em C++.	103
Tabela 8 - Erro ocasionado pelo atraso no envio de mensagens via CAN	110
Tabela 9 - Limites de esterçamento do Agribot	113
Tabela 10 - Velocidade angular de esterçamento das rodas do Agribot	114
Tabela 11 - Dados de esterçamento para o Agribot.....	118
Tabela 12 - Posição das rodas em graus para que o Agribot gire em seu próprio eixo.....	119
Tabela 13 - Disciplinas cursadas	127

Lista de siglas

AP	Agricultura de Precisão
CAN	Rede de Controle de Área
CLP/PLC	Controlador lógico Programável
CVT	Transmissão Continuamente Variável
DAC	Desenho Assistido por Computador
DD	Dianteira Direita
DE	Dianteira Esquerda
ECU	Unidade de Controle Eletrônica
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FAO	Organização para a Agricultura das Nações Unidas
FMIS	Sistema de Informação para Gerenciamento Agrícola
GPS-RTK	Sistema de Posicionamento Global – Cinemático em Tempo Real
ID	Dados de Identificação
IHM	Interface Homem Máquina
ISO	Organização Internacional para Padronização
ISOBUS	Padronização de Eletrônica Embarcada
LAN	Rede Local
NDVI	Diferença Normalizada do Índice de Vegetação
NEPAS	Núcleo de Ensino Pesquisa em Automação e Simulação
PC	Computador Pessoal
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RAM	Robô Agrícola Móvel
RTU	Unidade Terminal Remota
SCADA	Controle Supervisório e Aquisição de Dados
TAG	Termo Associado a uma Informação
TCP/IP	Protocolo de Controle de Transmissão/ Protocolo de Internet
TD	Traseira Direita
TE	Traseira esquerda
UML	Linguagem de Modelagem Unificada
USP	Universidade de São Paulo

Sumário

Conteúdo

1. Introdução	23
1.1. Objetivos	24
1.2. Justificativa.....	25
2. Revisão da Literatura	27
2.1. Tecnologias e Conceitos Empregados na Agricultura de Precisão	27
2.1.1. Agricultura de Precisão	27
2.1.2. Sistema de Informação para Gerenciamento Agrícola (FMIS)	28
2.2. Robótica Agrícola Móvel.....	30
2.2.1. Sensores Para Robótica Agrícola Móvel	33
2.3. Exemplos de Robôs Agrícolas Móveis.....	35
2.3.1. Trator Autônomo.....	36
2.3.2. Veículo Autônomo de Apoio para Agricultura	38
2.3.3. BoniRob	40
2.3.4. Robô Agrícola Móvel.....	42
2.3.5. Agricultural Robot (AGRIBOT)	44
2.4. Sistemas Supervisórios	46
2.5. Sistemas SCADA	49
2.5.1. Requisitos de Software para um Sistema SCADA.....	52
2.6. Exemplos de Softwares para Sistemas SCADA	55
2.6.1. Elipse SCADA	55
2.6.2. ROCKWELL - RSView32	57
2.6.3. InduSoft	59
3. Materiais e Métodos.....	60
3.1. Agribot	60
3.1.1. Sistema Mecânico.....	60

3.1.2. Geometria de Ackermann	64
3.1.3. Sistema Eletro-Hidráulico	67
3.2. Sistema Hidráulico	69
3.3. Sistema Elétrico	72
3.4. Sensores de Posicionamento das Rodas	74
3.4.1. Sistema de Controle Operacional por IHM	78
3.5. UML.....	80
4. Desenvolvimento do Modelo Supervisório.....	83
4.1. Modelo Supervisório	83
4.2. Diagramas UML do Modelo Supervisório	85
4.2.1. Diagramas de Caso de Uso do sistema supervisório do Agribot	85
4.2.2. Diagrama Caso de Uso dos requisitos funcionais	87
4.2.3. Diagrama Caso de Uso dos requisitos não funcionais.....	92
4.2.4. Diagrama de Sequência do sistema supervisório do Agribot	94
4.2.5. Diagrama de Atividades do sistema supervisório do Agribot.....	96
5. Resultados Experimentais	100
5.1. Arquitetura e Mensagens do Agribot	100
5.2. Controle e modelo cinemático utilizados pelo Agribot.....	104
5.2.1. Algoritmo de controle Labview	105
5.2.2. Algoritmo de controle para C++	108
5.2.3. Modelos de esterçamento utilizados pelo sistema supervisório do Agribot	114
5.2.1. Painel principal e teste de validação do supervisório	121
6. Conclusões	125
6.1. Trabalhos Futuros	126
7. Atividades Realizadas	127
7.1. Disciplinas.....	127
7.2. Participação em Eventos e Publicações	127
Referências	129
Anexo I	136
Anexo II	144

Estrutura e Conteúdo

Esta dissertação de Mestrado tem seu conteúdo organizado em sete capítulos e uma lista contendo as referências bibliográficas utilizadas; como mostrado a seguir.

Capítulo 1 – Introdução: é apresentada uma introdução sobre o trabalho, os objetivos e as justificativas para sua realização.

Capítulo 2 – Revisão da literatura: são apresentados as tecnologias e os conceitos empregados em Agricultura de Precisão, robótica agrícola móvel, suas características, exemplos de robôs, sistemas supervisórios, sistemas SCADA e exemplos.

Capítulo 3 – Materiais e métodos: é apresentado o robô agrícola móvel Agribot com detalhamento dos seus subsistemas e os diagramas UML que foram utilizados para gerar o modelo supervisório.

Capítulo 4 – Desenvolvimento do modelo supervisório: destaca-se aqui o modelo da arquitetura supervisória e os diagramas utilizados para estruturar o modelo devidamente explicado.

Capítulo 5 - Resultados experimentais: Arquitetura e mensagens do Agribot, controle e modelo cinemático utilizado, além dos testes e resultados experimentais obtidos.

Capítulo 6 – Conclusões: conclusões, principais contribuições do trabalho e trabalhos futuros.

Capítulo 7 – Atividades realizadas: atividades realizadas no período do mestrado e publicações.

Lista de referências bibliográfica: contém os documentos utilizados na elaboração deste trabalho, os quais estão dispostos em ordem alfabética.

1. Introdução

Atualmente a FAO (Organização para a agricultura das Nações Unidas) indicou a necessidade de incrementar a produção agrícola mundial em 70% tendo como prazo o ano 2050. Procurando a mínima degradação do planeta, para atingir a meta proposta pela FAO uma das alternativas que vem tornando-se mais viável é a implementação da Agricultura de Precisão (AP) a qual visa obter uma produtividade maior na mesma área de plantio com redução do impacto ambiental (SORENSEN et al., 2011).

A Agricultura de Precisão pode ser definida como um conjunto de tecnologias e procedimentos empregados para otimizar o sistema de produção agrícola, considerando-se como elemento principal o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e de fatores relacionados (MOLIN, 2001).

Neste contexto, o emprego da tecnologia, um bom planejamento e ferramentas de gerenciamento acabam sendo fatores fundamentais. Dentre eles, a automação de máquinas e equipamentos, de sistemas e o uso da tecnologia de informação que se faz presente em outros segmentos como, por exemplo, na indústria, na aviação comercial, entre outros, encontram-se cada vez mais presentes no setor agrícola, motivando as pesquisas relacionadas à Agricultura de Precisão nacional, que têm como exemplos dos estudos realizados nesse segmento, os trabalhos de Inamasu (INAMASU et al., 2008) e Tangerino (TANGERINO, 2009; TANGERINO et al., 2010), os quais propõem a utilização de sensores para *fenotipagem*, ou seja, uma avaliação quantitativa das estruturas das plantas e suas funções, entre outras aplicações de sensoriamento voltadas para agricultura.

Também na AP, outra linha de pesquisa está voltada ao desenvolvimento de robôs semi-autônomos e autônomos. Segundo Tabile (TABILE, 2012), que utiliza como referência o Agribot, cita que a principal característica da plataforma robótica modular é a capacidade de locomoção em ambientes típicos da área agrícola com a finalidade de aquisição de dados e a pesquisa de novas tecnologias para o sensoriamento remoto para o setor.

Pesquisas existentes já apontam para a necessidade de um sistema de gerenciamento agrícola. Um exemplo recente é o Sistema de Informação para Gerenciamento Agrícola (FMIS), descrito por Lopes (LOPES et al., 2012). Nesse trabalho, o autor cita que, entre os principais objetivos está, o de criar uma estrutura que atenda os requisitos dos processos agrícolas, integração com sistemas de controle de máquinas, e a possibilidade de

desenvolvimento de algoritmos que considerem parâmetros biológicos da cultura como, por exemplo, características de variedades plantadas, produtividades e dados climatológicos. Nesse contexto, só o desenvolvimento da plataforma robótica não é suficiente para atender aos requisitos citados. Também é necessário integrar todos os agentes e equipamentos com o intuito de obter resultados mais precisos com um melhor aproveitamento dos dados oriundos do campo. Para tal, faz-se necessário que o robô seja dotado de uma arquitetura que permita interagir com todos os agentes envolvidos na Agricultura de Precisão.

O presente trabalho trata do desenvolvimento de uma arquitetura supervisória, que seja aplicável à robótica agrícola móvel e atenda aos requisitos funcionais de modelos supervisórios já utilizados em outras aplicações, além de atender às necessidades impostas pela Agricultura de Precisão. Para tal foi realizada uma revisão bibliográfica que se inicia com uma breve descrição, sobre o sistema de manejo, conhecido como agricultura de precisão e o sistema de gestão agrícola FMIS, apresentando também modelos e conceitos empregados em sistemas supervisórios. A seguir, é apresentada a plataforma robótica móvel Agribot, assim como o material e os métodos utilizados para o estudo e o desenvolvimento do sistema de supervisório. Finalmente, são apresentados os principais resultados experimentais obtidos.

1.1. Objetivos

Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de uma arquitetura supervisória aplicável à robótica móvel de grande porte.

Objetivos Específicos

Realizar uma revisão bibliográfica detalhada sobre o tema em questão, utilizando-se da literatura científica, e baseada no levantamento realizado, definir qual modelo de sistema supervisório que melhor atenda às necessidades da plataforma robótica empregada na Agricultura de Precisão.

Utilizar as técnicas empregadas em outros Softwares Supervisórios como, por exemplo, o sistema *SCADA* e, baseado nele, desenvolver um sistema de supervisão para uma plataforma experimental de robô agrícola móvel, o *Agribot*.

Realizar um levantamento detalhado dos sistemas eletro-hidráulicos e de controle que compõem o Agribot, e com base nos resultados propor melhorias e adequações necessárias à implementação do sistema supervisor, deixando o robô operacional e possuindo um sistema confiável para uma futura utilização em pesquisas com módulos de navegação autônoma, por exemplo.

1.2. Justificativa

O emprego cada vez mais frequentes de técnicas utilizadas em Agricultura de Precisão, como o sensoriamento remoto e o emprego de estratégias e amostragens de solo, além de fatores como o alto custo da mão-de-obra que está cada vez mais escassa devido ao envelhecimento da população rural, questões ambientais e trabalhistas como, por exemplo, a exposição de operadores a atividades insalubres, tem incentivado e justificado as pesquisas em robôs agrícolas móveis (TABILE, 2012).

Porém, devido aos trabalhos de pesquisa nessa área serem relativamente recentes, seus respectivos resultados indicam pontos a serem melhorados como, por exemplo, pode-se citar o sistema de controle de esterçamento do Agribot. O qual é descrito por Tangerino (TANGERINO et al., 2011), que em seu trabalho expõe a existência da possibilidade de gerar um novo algoritmo de controle mais refinado para o PWM aplicado para início de movimento, ou controle de esterçamento cronometrado entre as rodas.

Trabalhos como o citado demonstram um avanço significativo nas pesquisas relativas à Agricultura de Precisão a nível nacional, fator motivador e que justifica a continuidade dos trabalhos relacionados ao desenvolvimento e nacionalização de tecnologias aplicáveis na robótica agrícola móvel.

2. Revisão da Literatura

Trabalhos importantes relacionados ao setor agrícola, relatados na literatura, mostram que o principal foco de pesquisa está na busca de alternativas para resolver os desafios encontrados pelos agricultores, entre eles o gerenciamento de uma grande quantidade de informações geradas pelos modernos processos agrícolas. Tais processos, devido ao aumento significativo da utilização de computadores e equipamentos eletrônicos como sensores e a automação de máquinas e implementos, acabam gerando uma grande quantidade de dados, e motivam as pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de robôs e de *softwares* específicos para gestão agrícola como, por exemplo, o Sistema de Informação para Gerenciamento Agrícola (FMIS).

Tendo como base tais considerações, a revisão bibliográfica aborda inicialmente o conceito de agricultura de precisão e a ferramenta de gerenciamento agrícola FMIS, apresentando o fluxo básico de informações e, posteriormente, a morfologia dos robôs agrícolas móveis e os sensores empregados nesse segmento da robótica. Também são apresentados alguns exemplos de plataformas robóticas agrícolas. Finalmente, são apresentados técnicas e conceitos utilizados em sistemas de controle supervisor e aquisição de dados, os quais são a base do trabalho proposto.

2.1. Tecnologias e Conceitos Empregados na Agricultura de Precisão

2.1.1. Agricultura de Precisão

Atualmente a agricultura, é um campo fundamental e estratégico na economia mundial. O setor de produção agrícola trabalha com margem reduzida de lucro e sobre pressão do mercado, os agricultores são obrigados a aprimorar suas técnicas de cultivo para obter uma maior produtividade com a mesma área de plantio, mantendo a qualidade dos

produtos e com uma redução significativa no custo dos mesmos. Como consequência, os produtos podem se tornar competitivos no mercado interno e externo (SORENSEN et al., 2010). Estes requisitos caminham em paralelo com a adesão às normas ambientais, sociais, de saúde e segurança (SORENSEN et al., 2011).

Neste contexto, o emprego da tecnologia, um bom planejamento e gerenciamento acabam sendo fundamentais. A automação de sistemas e o uso da tecnologia de informação que se faz presente em vários segmentos, como na indústria de produtos manufaturados, na aviação comercial e em edifícios inteligentes, estão sendo empregadas também no setor agrícola. Na agricultura, a automação de máquinas e implementos e o uso da tecnologia de informação para aquisição de dados e no gerenciamento do sistema de produção, são os principais tópicos utilizados para formar um sistema de manejo conhecido como Agricultura de Precisão (AP).

Definições sobre tal sistema de manejo podem ser encontradas na literatura, como o citado por Molin (MOLIN, 2001) o qual define a Agricultura de Precisão como sendo um conjunto de tecnologias e procedimentos empregados para aperfeiçoar o sistema de produção agrícola, considerando como elemento principal o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e de fatores relacionados. Seguindo a mesma diretriz, Tabile (TABILE, 2012) em seu trabalho cita que a Agricultura de Precisão deve ser vista como um conjunto de técnicas para o gerenciamento da produção agrícola, o qual tem o objetivo de reduzir as incertezas nas tomadas de decisões para o melhor entendimento e gerenciamento das variáveis do campo.

2.1.2. Sistema de Informação para Gerenciamento Agrícola (FMIS)

Desde meados de 1998, o uso de computadores pelos agricultores se tornou mais frequente, assim como a utilização de *softwares* para organizar seus dados financeiros, monitorar de forma mais eficaz suas culturas e manter o controle das suas transações com terceiros (BATTE, 2005).

A utilização de computadores e a adoção cada vez maior de tecnologias nas operações e nos processos de gestão agrícola são motivadas em grande parte, pela busca em excelência operacional, redução de custos, substituição de homens em operações que possuem alto risco

e redução dos impactos ambientais, além da busca por maior produtividade em áreas cultivadas (LOPES et al., 2012).

Um dos agravantes encontrados na agricultura moderna se dá devido à quantidade de dados e à complexidade dos processos empregados na agricultura de precisão, o que deixa a gestão da informação cada vez mais desafiadora para os agricultores (PEETS et al., 2012).

Os atuais sistemas de gestão agrícola necessitam gerenciar informações oriundas de diversas fontes, como geográficas, biológicas e climáticas. Além do emprego de tecnologias utilizadas em agricultura de precisão, também coletam e avaliam uma enorme quantidade de informações, a partir de um número diversificado de dispositivos como, por exemplo, sensores, máquinas agrícolas, entre outros.

O FMIS é um exemplo de sistema utilizado para coleta, processamento, armazenamento e disseminação de dados sob a forma de informações necessárias para realizar as funções de operações da fazenda (SALAMI e AHMADI, 2010). Segundo Lopes (LOPES et al., 2012), um dos principais objetivos das pesquisas mais recentes nessa área é criar estrutura que atenda aos requisitos dos processos agrícolas, manipulação de atributos geográficos, integração com sistemas de controle de máquinas, e possibilidade de desenvolvimento de algoritmos que considerem parâmetros biológicos da cultura, como por exemplo: características de variedades plantadas, produtividades, dados climatológicos ou da ciência dos solos.

Um modelo conceitual de um sistema de informação para gestão agrícola é apresentado por Sorensen (SORENSEN et al., 2010), que em seu trabalho descreve as mudanças dos paradigmas atualmente empregados na gestão dos processos agrícolas, também nos procedimentos de tomada de decisão, sendo eles relevantes para um novo projeto e protótipo de um FMIS.

Em trabalhos como o de Murakami (MURAKAMI et al., 2007) e Kaloxilos (KALOXYLOS et al., 2012), são apresentadas as infraestruturas e as características utilizadas no desenvolvimento de sistemas FMIS, para arquitetura web, cuja motivação se dá devido à crescente disseminação da Internet, com redução de custos para o acesso, assim como o desenvolvimento, incremento e diversificação dos dispositivos para acesso.

Uma condição importante de um FMIS, dentro do contexto da Agricultura de Precisão é o desenvolvimento de interfaces para aquisição de dados provenientes de equipamentos agrícolas, que atualmente emprega diversos tipos de sensores, os quais são capazes de coletar uma grande quantidade de dados durante o trabalho, que podem ser a base para a produção de informação agrícola.

Neste contexto, o sistema deve ser capaz de gerenciar arquivos de vários formatos, desde os dados padronizados como o padrão ISO 11783 (ou ISOBUS) que é um protocolo de comunicação utilizado na agricultura, como os arquivos que apresentam formatos proprietários. Outro requisito importante é a capacidade de trocar informações entre diferentes dispositivos e serviços utilizados na adoção do conceito de Agricultura de Precisão (AP) nas fazendas (LOPES et al., 2012). Além disso, a gestão em Agricultura de Precisão de uma área agrícola exige uma sequência de tarefas que precisam ser executadas em um FMIS. Um exemplo é o descrito por Nikkila (NIKKILA et al., 2010) que apresenta uma aplicação de pulverização de precisão, destacando as seguintes tarefas:

1. Plano de operação gerado por um sistema de gestão agrícola.
2. Transferir o plano de operação para um robô ou trator ISOBUS.
3. Monitorar e transferir os dados referentes à operação para o sistema de gestão agrícola.
4. Dados climatológicos devem ser transferidos para o robô ou trator e o implemento durante a sua operação.

Em outros trabalhos como os de Murakami (MURAKAMI et al., 2007) e Sorensen (SORESEN et al., 2011) são apresentadas revisões sobre os requisitos empregados em um sistema de gestão agrícola para aplicação em Agricultura de Precisão destacando como, por exemplo, os sistemas que devem ter uma interface de usuário simplificada e os métodos de processamento de dados automatizados e com boa usabilidade.

Os sistemas devem permitir a inclusão e programação de novos métodos automatizados de acordo com regras de negócio definidas pelo usuário, e a integração entre os sistemas de controle de máquinas tratores ou Robôs e o sistema de gestão agrícola.

2.2. Robótica Agrícola Móvel

Para que se tenha um melhor entendimento a respeito de um robô agrícola móvel, são apresentados de forma simplificada, alguns conceitos e equipamentos que compõem esse segmento da robótica móvel, que tem aplicações agro-industriais.

Na literatura científica existem definições sobre a robótica móvel, porém, o presente trabalho destaca uma em especial. A qual define um robô móvel como um dispositivo mecânico montado sobre uma base instável, controlado por um sistema computacional e que possui sensores e atuadores, os quais consentem a sua interatividade com o ambiente (MARCHI, 2001; BEKEY, 2005). Uma definição mais recente é citada por Secchi (SECCHI, 2008), que define os robôs móveis como dispositivos de transporte automático, ou seja, são plataformas mecânicas dotadas de um sistema de locomoção capazes de navegar através de um determinado ambiente de trabalho, dotados de certo nível de autonomia para sua locomoção portando cargas.

Os Robôs móveis, em grande parte, possuem características particulares que as habilitam para execução de determinadas tarefas, sendo que a princípio, é a própria tarefa que determina o tipo de estrutura construtiva do robô. Esse é um fator importante a ser considerado para concepção de um robô móvel, determinando as suas características construtivas, os tipos de controle e suas funcionalidades, as quais estão diretamente relacionadas com a robótica agrícola móvel.

Com base na classificação descrita por Pieri (PIERI, 2002) e Secchi (SECCHI, 2008), este modelo de plataforma robótica, pode apresentar as seguintes características:

Característica construtiva:

Terrestre com rodas – em grande parte das aplicações agrícolas, os robôs que possuem essa característica utilizam rodas convencionais na locomoção, e elas podem ser divididas em dois tipos:

- Roda Fixa: de forma geral este tipo de roda (Figura 1a), tem seu eixo fixo na estrutura da plataforma e por sua vez está associada ao sistema de tração.

- Roda Orientável Centralizada: é aquela em que o movimento do plano da roda com respeito à estrutura é uma rotação ao redor de um eixo vertical que passa através do centro da roda (SECCHI, 2008). Geralmente é utilizada como roda de direção ou de tração – direção (Figura 1).

O emprego do tipo de roda é fundamental para definir o grau de manobrabilidade do robô. No setor agrícola, basicamente se utilizam duas configurações para as plataformas robóticas, a primeira com um grau de manobrabilidade reduzida, cuja combinação entre as

rodas fixas e orientáveis caracteriza o robô como um quadriciclo, o qual possui o modelo cinemático baseado na geometria de Ackermann.

Uma segunda configuração utiliza exclusivamente rodas orientáveis centralizadas. Tal acondicionamento das rodas caracteriza o projeto como um robô omnidirecional, ou seja, tem máxima manobrabilidade e pode se mover em qualquer direção sem a necessidade de se reorientar.

Figura 1 - Tipos de rodas. (a) Roda fixa. (b) Roda orientável centralizada, adaptado (SECCHI, 2008)

Tipo de controle:

Teleoperados – onde o operador realiza todos os movimentos que o robô deve fazer de forma direta ou através de acesso remoto por meio de rádio ou Internet.

Semi-Autônomos – o operador define a missão a ser executada, com base em um mapa de pontos georeferenciados e o robô o segue sem a intervenção do operador.

Autônomo – o robô é capaz de realizar tarefas de forma autônoma, tomando decisões com base nos dados do ambiente, obtidos pelos seus sensores. O robô móvel autônomo caracteriza-se por uma conexão inteligente entre as operações de percepção e ação, que define

seu comportamento e o permite chegar à execução dos objetivos programados sobre o ambiente com alguma incerteza (SECCHI, 2008).

Funcionalidade:

Robô de serviço campo - segundo o autor, Secchi (SECCHI, 2008), esses robôs atuam em ambientes externos não estruturados, que podem ou não, serem previamente modelados. Este tipo de robô tem grande dependência dos sensores para se localizar e se locomover de forma segura. Um exemplo é o robô agrícola móvel, o qual é projetado para operar em ambientes externos e com uma grande variação de tipos de solos e em culturas diversas.

Os sensores de um robô agrícola móvel têm como característica principal, a orientação da plataforma enviando mensagens sobre posicionamento, velocidade, temperatura, entre outras. Ainda nesse segmento da robótica outra aplicação relacionada aos sensores está voltada para a aquisição de dados de campo utilizados em Agricultura de Precisão. Alguns exemplos de sensores empregados nesse segmento da robótica serão descritos a seguir.

2.2.1. Sensores Para Robótica Agrícola Móvel

A utilização de sensores na robótica móvel está diretamente relacionada com seu campo de atuação (SECCHI, 2008). Com base nessa afirmação, pode-se destacar que o emprego de sensores na robótica agrícola móvel, tem basicamente dois papéis fundamentais:

Funções do Robô - Os sensores que estão relacionados às funções do robô, em sua grande maioria, são conhecidos como proprioceptivos (internos), e são responsáveis, pela obtenção de informação do ambiente interno da plataforma robótica como, por exemplo, velocidade, posição, temperatura, sentido, entre outros.

No caso da robótica agrícola, devido ao fato de trabalhar em ambientes não estruturados, se torna comum o emprego de sensores exteroceptivos (externos), que estabelecem uma relação direta com o ambiente, cuja percepção determina o estado do robô (SECCHI, 2008; EVERET, 1995; PIERI, 2002).

Os sensores empregados em um robô móvel são classificados, seguindo alguns critérios como, por exemplo, o princípio de funcionamento, o tipo de informação, e tipo de sinal, entre outros. Na Tabela 1, são apresentados os principais tipos de sensores que estão ligados às funções básicas do robô, porém, não é detalhada sua classificação, uma vez que o intuito aqui é apresentar a estrutura e os componentes presentes em um robô móvel. Um estudo completo sobre sensores empregados na robótica móvel pode ser encontrado em Pieri (PIERI, 2002), Secchi (SECCHI, 2008) e Siegwart e Nourbakhsh (SIEGWART e NOURBAKHS, 2004).

Tabela 1 - Classificação dos sensores em robótica adaptada de (SECCHI, 2008).

Segundo o	Classificação
Meio Relativo ao Robô	Proprioceptivos Exteroceptivos
Tipo de Iteração Robô-Objeto	De Contato De Não-Contato
Tipo de Informação	Elementares Complexos
Princípio de Funcionamento	Carga Elétrica Radiação Luminosa Resistência Indutância Capacitância Radiação Térmica Outros

Aquisição de Dados de Campo: A segunda aplicação de sensores embarcados em uma plataforma robótica agrícola está diretamente relacionada à coleta de dados no campo, a qual utiliza sensores como: ótico, que mede o vigor das plantas por meio de refletância das folhas, sensor de condutividade do solo, câmeras para aquisição de imagens, além de equipamentos de amostragens do solo para análises físico-químicas.

A fusão de sensores para fenotipagem de plantas, sua arquitetura e tipos de sensores utilizados para essa técnica podem ser vistos em Ruckelshausen (RUCKELSHAUSEN, 2009) o qual apresenta o seguinte modelo mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura do sistema de integração de sensores. adaptado (RUCKELSHAUSEN, 2009)

Exemplos similares, utilizados no controle de aplicações agrícolas, encontrados na literatura podem ser vistos em Inamasu (INAMASU et al., 2008) e Tangerino (TANGERINO, 2009; TANGERINO et al., 2010). A partir do conhecimento prévio da estrutura de um robô agrícola, e os sensores utilizados por ele, são apresentados a seguir, alguns exemplos de plataformas robóticas empregadas na agricultura de precisão.

2.3. Exemplos de Robôs Agrícolas Móveis

Neste tópico são apresentados alguns modelos de robôs agrícolas móveis encontrados na literatura, destacando as suas características básicas estruturais, seus sensores e atuadores e, a sua estrutura de controle. Os modelos de robôs que serão descritos estão dispostos da

seguinte forma: o primeiro é um trator comercial modificado para se tornar uma máquina autônoma, na sequência são apresentadas duas plataformas robóticas específicas para agricultura, sendo que, a primeira utiliza motores elétricos na guiagem e na propulsão e a segunda utiliza atuadores hidráulicos.

O tópico se encerra apresentando os robôs agrícolas utilizados para pesquisa e desenvolvimento da EESC-USP - o RAM, que possui atuadores elétricos e o Agribot cujos atuadores são hidráulicos.

2.3.1. Trator Autônomo

Entre os protótipos utilizados para o desenvolvimento da robótica agrícola, uma plataforma experimental que se destaca, utiliza veículo agrícola comercial de pequeno porte (Trator Hakotrac, 300). A escolha de tal modelo deveu-se ao fato do trator possuir CVT (Transmissão Continuamente Variável) a qual permite que diversas funções de controle sejam configuradas para interface eletrônica. O modelo ainda passou por uma série de mudanças e adaptações para se tornar uma máquina autônoma (robô agrícola).

Segundo Griepentrog (GRIEPENTROG et al., 2009) e Tabile (TABILE, 2012) o projeto se iniciou em 2001, pelo *Centre for Precision Farming da University of Copenhagen Orsted* – Dinamarca, onde o trator foi equipado com uma ECU (Unidade de Controle Eletrônico), que interage com a maioria dos seus subsistemas, de modo a controlar suas funções básicas. Em paralelo foi adicionado um bloco de válvulas hidráulicas para o esterçamento das rodas dianteiras. Para o controle da aceleração e da velocidade de deslocamento, foram utilizados atuadores elétricos fixados junto ao cabo do acelerador e o controle da CVT, ambos controlados pela ECU do trator.

Posteriormente modificações feitas permitiram o desenvolvimento de um sistema de controle com acesso remoto, possibilitando assim a operação do trator à distância. O trator ainda possui botões de emergência e sensores instalados em pontos estratégicos que desligam todo equipamento caso sejam acionados.

Uma segunda CPU foi adicionada para sincronizar questões de segurança e de lógica. Um outro controlador (GT2000 da GEOTEC), faz a interface com a ECU por uma rede CAN (*Control Area Network*). Como a maior parte das ações podem ser espacialmente

determinadas, o trator utiliza um GPS RTK que trabalha com um erro de ± 2 centímetros enquanto se movimenta. As instruções para o trator são dadas na forma de um plano de rota ou missão sendo essa predefinida por meio de um programa escrito no controlador, que por sua vez, gera uma rotina de controle para executar e manter a rota estabelecida pelo operador do trator. A plataforma descrita pode ser vista na Figura 3.

Figura 3 - Trator autônomo (GRIEPENTROG et al., 2009)

Uma versão mais atual do trator autônomo pode ser encontrada em Griepentrog (GRIEPENTROG et al., 2009). O sistema de segurança da máquina foi reprojeto e foi implementado um sistema adicional de telemetria a laser (scanner) e uma câmera de visão estéreo, ambos capazes de fornecer as informações necessárias para um melhor desempenho durante a navegação e a detecção de obstáculos, o que acarretou na redução da dependência de informações provenientes do GPS. Também foi incorporado ao trator um circuito de segurança composto por quatro botões de emergência, quatro chaves pára-choques mecânicos que permitem que a máquina pare quando os sensores de colisão forem acionados ou falhar.

Além disso, o circuito de controle foi reformulado criando uma solução de redundância para o sistema, aumentando assim a confiabilidade na máquina. Na Figura 4 é mostrado o trator autônomo com os componentes de segurança.

Figura 4 - Componentes de segurança do trator autônomo, adaptado (GRIEPENTROG et al., 2009)

2.3.2. Veículo Autônomo de Apoio para Agricultura

Segundo seus desenvolvedores (SAVAGE, 2013). Savage é o acrônimo de um veículo de suporte autônomo para agricultura. Seu projeto teve início em 2006, na Universidade de Thessaly, Grécia. O projeto corresponde ao desenvolvimento de um veículo de baixo custo totalmente autônomo projetado para realizar tarefas específicas dentro dos limites de um campo.

O veículo é baseado em uma plataforma mecânica robusta e uma unidade de inteligência eficiente. Segundo Tabile (TABILE, 2012), o objetivo do projeto foi o desenvolvimento de uma plataforma para uso geral, baseada em uma arquitetura aberta, capaz de hospedar diferentes subsistemas a fim de desempenhar diversas tarefas em campo durante

um período equivalente a 60% do crescimento da planta. Uma plataforma flexível e de baixo custo, desenvolvida para realizar uma variedade de tarefas e cuidados agrícolas.

O Savage oferece a ação do cuidado agrícola dentro dos limites de cada planta de forma independente, trabalhando em conjunto com as tendências atuais de Agricultura de Precisão. Sua construção mecânica é baseada em um projeto modular, de tal forma que permita o uso de tecnologias convencionais de fabricação. Como resultado obteve-se uma plataforma leve e com boa precisão em suas articulações, tendo seu corpo formado por uma base de aço, suportada por quatro módulos independentes de locomoção. Cada módulo possui dois motores de corrente contínua, um utilizado na locomoção e outro na guiagem. Além disso, cada módulo hospeda seus módulos eletromecânicos e eletrônicos, necessários para o controle das unidades de propulsão e de guiagem, Toda inteligência de alto nível e as unidades de fornecimento de energia estão alojados na parte principal da construção.

O projeto também prevê que o sistema deve ser capaz de transportar uma carga adicional máxima de 40 kg, sem graves consequências no desempenho, garantindo assim que ele será capaz de acomodar o equipamento adicional necessário para execução de diversas tarefas agrícolas.

O módulo de inteligência do robô é a sua unidade principal de controle e é baseada em um computador industrial (PC/104) e nos módulos de sensoriamento crítico, os quais proporcionam capacidades básicas de navegação, sendo realizados, por exemplo, por GPS, Bússola, entre outros.

Em sua configuração de base, foram incluídos módulos de sustentação e circuitos de suporte, bem como a fonte de alimentação das unidades. Na Figura 5 é mostrada a plataforma robótica Savage.

Figura 5 - Savage, veículo autônomo de apoio para agricultura (SAVAGE, 2013)

2.3.3. BoniRob

O robô agrícola, BoniRob foi apresentado na *Agritechnica 2009*, realizada em Hanover, na Alemanha, e posteriormente na DLG Field days em 2010, que aconteceu em Frankfurt, também na Alemanha. Na ocasião, houve uma demonstração das funções do sistema de navegação, onde foram realizadas as suas primeiras manobras, primeiramente utilizando como referência plantas artificiais e posteriormente ao ar livre em um campo de milho. Neste campo, o robô realizou suas manobras sem assistência humana e mantendo intacta a plantação.

Na plataforma foram utilizados sensores de telemetria a laser, câmeras 3D, um sistema de imagem espectral e um sistema de GPS-RTK. Os dados provenientes da integração desses sensores são armazenados e comparados com a localização e o tempo decorrido entre as leituras. Desta forma, eles podem ser atribuídos às plantas individualmente e em diferentes momentos.

O BoniRob está equipado com um chassis complexo, sendo a largura de faixa e a altura do robô ajustáveis, o que lhe permite adaptar-se às diferentes situações encontradas no

campo, tais como o espaçamento de linha ou a altura da planta. Esses ajustes permitem ao robô acompanhar larguras de 0,75 m a 2 m e uma altura do solo que pode variar de 0,4 m a 0,8 m.

O BoniRob também possui um sistema de guiagem independente, onde cada roda pode ser movimentada individualmente, permitindo boa mobilidade nas manobras de campo. Também, possui uma série de equipamentos e sensores embarcados. Entre eles, um computador industrial, redes de comunicação Ethernet / CAN e Wireless, telemetria laser 2D e 3D, sensores de aceleração e de ultra-som, Giroscópio, RTK-DGPS, entre outros. O BoniRob pode ser visto na Figura 6 e os detalhes de construção, assim como toda parte de comando e sensoriamento do BoniRob tem como base os artigos de Klose (KLOSE et al., 2010), Ruckelsahusen (RUCKELSHAUSEN et al., 2009) e Weiss (WEISS; BIBER, 2009).

Figura 6 - BoniRob (KLOSE et al., 2010)

2.3.4. Robô Agrícola Móvel

O robô agrícola móvel RAM, é uma plataforma robótica desenvolvido no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Automação e Simulação (NEPAS) em conjunto com a Embrapa Instrumentação. Tem como objetivo principal criar competência nacional e interdisciplinar em robótica agrícola e a integração entre instituições de pesquisa, baseado no desenvolvimento de um robô agrícola móvel, promovendo e fomentando o desenvolvimento da tecnologia no país no tema amplo que é o de automação e mecanização agrícola, (PORTAL NEPAS, 2010).

O primeiro projeto se iniciou em 2006, com a plataforma robótica denominada VAA, Veículo Agrícola Autônomo, construída para o desenvolvimento de tecnologias de navegação autônoma e para aquisição de dados em Agricultura de Precisão.

O projeto do VAA pode ser encontrado com um bom nível de detalhamento em Freitas (FREITAS, 2008), onde o autor cita que a plataforma mostrou contribuição inédita e grande potencial de utilização para aquisição de dados e para o desenvolvimento de tecnologias de robótica e navegação em ambientes agrícolas.

No entanto, foram verificados problemas como a baixa potência dos motores de tração do sistema de navegação e a necessidade de adaptações na estrutura mecânica do robô agrícola, além da baixa autonomia relacionada ao tipo de baterias utilizadas como fonte de alimentação. Essa primeira versão do RAM pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 - Veículo agrícola autônomo (FREITAS, 2008)

A mesma plataforma, a partir de 2007, passou por mudanças estruturais, motivadas pelos bons resultados obtidos por Sousa (SOUSA, 2007). Após modificações, a plataforma passou a ser conhecida como Robô Agrícola Móvel (RAM) e passou por um projeto de melhoria. Primeiramente foi realizado o aperfeiçoamento da estrutura mecânica, o qual proporcionou uma melhora na robustez, permitindo utilizar novos equipamentos e sensores.

Dentre os novos equipamentos houve inserção de motores de guiagem de maior torque bem como o novo sistema de controle dos motores, que propiciou ao sistema de navegação maior confiabilidade e precisão, contribuindo com o deslocamento eficiente do robô, que é baseado no modelo cinemático da geometria de Ackermann, o qual pode ser visto em Torres (TORRES et al., 2012). O modelo em conjunto com o novo sistema de esterçamento garante um bom desempenho durante a aquisição de dados em campo. Os modelos em CAD da estrutura do RAM e da configuração dos motores de guiagem e propulsão podem ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Robô Agrícola Móvel (RAM). Detalhe do módulo da roda dianteira e sistema de propulsão e guiagem (TABILE et al., 2011).

Em 2008 o RAM, no segundo projeto de melhoria, recebeu um novo sistema de tração, o qual propiciou melhora no movimento da estrutura, suprimindo a necessidade de potência necessária para atuação em campo para culturas nacionais. E com a inserção de um novo sistema de alimentação composto por baterias específicas para uso em veículos elétricos, o veículo passou a ter uma maior autonomia. A Figura 9 mostra o RAM com todas as modificações estruturais.

Figura 9 - RAM robô agrícola móvel (TABILE et al., 2011)

2.3.5. Agricultural Robot (AGRIBOT)

O projeto da plataforma robótica Agribot se iniciou em 2008, com a parceria do Departamento de Engenharia Mecânica - EESC-USP e a Embrapa Instrumentação Agropecuária, sendo o projeto financiado pela FINEP/CT-AGRO - Agricultura de Precisão 01/2008. Segundo Tabile (TABILE, 2012), a proposta inicial do projeto visou desenvolver uma plataforma robótica modular capaz de se locomover em ambientes típicos da área agrícola com a finalidade de aquisição de dados e pesquisa de novas tecnologias para o sensoriamento remoto para a área agrícola.

Conforme a descrição apresentada por seus idealizadores o Agribot oferece, entre suas principais características, uma boa autonomia e elevada capacidade operacional, o que o torna condizente com as necessidades agrícolas. A plataforma robótica base apresenta uma característica multifuncional no sentido de permitir o acoplamento de módulos de aquisição

de dados em campo para estudo da variabilidade espacial por meio de sensores e equipamentos considerados portáteis.

Segundo Tabile (TABILE, 2012) a plataforma é composta de dois subsistemas principais: a plataforma robótica base e os módulos complementares, descritas a seguir;

Plataforma robótica base: Subsistema constituído por uma estrutura com sistemas mecânicos e eletrônicos, capaz de se locomover com eficiência em ambientes agrícolas adversos. A empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A forneceu a estrutura e os componentes mecânicos necessários para o seu funcionamento.

Módulos complementares: A plataforma robótica base pode receber subsistemas com diversas funções, que são montados em forma de módulos. Cada módulo é responsável pela realização de tarefas distintas, conforme a necessidade do usuário, flexibilizando as áreas de aproveitamento do conjunto. Os principais módulos propostos estão listados a seguir.

Localização e navegação autônoma: Visa propiciar habilidade de navegação autônoma para o Agribot, por meio da utilização de sistemas de GPS, sensores inerciais e escaneamento a laser de ambientes.

Visão computacional: O módulo consiste em um sistema para captura e análise de imagens agrícolas, as quais estão diretamente relacionadas ao percurso efetuado pela plataforma robótica. As imagens podem ser utilizadas tanto para fins de navegação como para obtenção de informações sobre as culturas. Esses módulos estão intimamente ligados ao sistema de controle de navegação da plataforma robótica base. Esse sistema foi implementado com controladores utilizando sensores e atuadores e computadores industriais para processamento geral de algoritmos de controle de navegação, algoritmos de coleta de dados e rotinas de transmissão de dados e comunicação sem fio e distribuído por meio de rede CAN.

Comunicação sem fio: Utilizado para teleoperação e troca de informações entre a plataforma robótica e uma estação de operação remota.

Sensoriamento de parâmetros agrícolas: Módulo utilizado para o acompanhamento e sensoriamento de culturas agrícolas.

Braço robótico: Braço robótico articulado e portátil para movimentação, posicionamento dando suporte a possíveis tarefas, realizadas como interação com o ambiente, intervenções e coletas de amostras.

O Agribot é mostrado na Figura 10, a seguir.

Figura 10 - Plataforma robótica Agribot

2.4. Sistemas Supervisórios

Os avanços tecnológicos ocorridos nos últimos anos, principalmente em relação aos *softwares* e *hardwares*, os quais foram responsáveis pela redução dos custos para automatização de processos, motivaram o aumento da automação de equipamentos e informatização na indústria e também no setor agrícola. Porém, o monitoramento e o controle dos equipamentos através de sensores e controladoras, acarretam em uma ampliação significativa no volume de dados e informações disponibilizadas pelo processo durante sua operação.

Nesse contexto, para se obter um melhor aproveitamento dos dados gerados aliado ao aumento da capacidade de processamento dos computadores, foram desenvolvidas ferramentas computacionais com características de automatizar tarefas utilizadas pelo controle do processo.

Essas ferramentas conhecidas como sistemas supervisórios têm como objetivo principal o monitoramento das informações provenientes de um determinado processo produtivo, garantindo assim o bom funcionamento do equipamento e a segurança na

operação. Nesse sentido, a utilização de sistemas computacionais na automação de processos, se faz necessária e essencial para se obter um bom desempenho do equipamento, além de facilitar o gerenciamento, o controle e a operação. Também atua de forma direta na identificação e detecção de falhas, que posteriormente são utilizadas na manutenção de problemas que venham ocorrer.

Os sistemas de supervisão utilizam interfaces gráficas, as quais auxiliam o operador, apresentando informações sobre o processo na forma de sinóticos animados, onde o responsável pela operação pode ajustar parâmetros de controle e identificar alarmes decorrentes de falhas. Um modelo de sistema supervisório, segundo Bailey (BAILEY; WRIGHT, 2003) consiste em unidades terminais remotas (RTUs) as quais coletam dados de campo e enviam para uma estação principal (mestre), através de uma rede de comunicação.

Tais sistemas supervisórios, facilitam e possibilitam que o operador utilize um pacote de *software* para o monitoramento e o controle do equipamento, o qual se dá através de uma estação de supervisão central, que pode ser, por exemplo, um computador industrial ou uma *Interface Homem Máquina* (IHM), que possui uma interface gráfica. A comunicação com a planta é estabelecida, através de uma rede local (LAN) como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Rede FIELDBUS, adaptado (BAILEY; WRIGHT, 2013)

Na literatura científica é possível encontrar inúmeras aplicações envolvendo sistemas supervisórios, os quais em sua maioria estão focados nas indústrias em geral. Porém, sua utilização, no entanto não se restringe somente a ela. É possível encontrar diversas aplicações envolvendo tais sistemas, em outras áreas distintas como, por exemplo, militar, aeronáutica, agrícola, educação, entre outras, (BABOVIC; VELAGIC, 2009) e (VILLANI, 2004).

Uma definição de supervisório pode ser encontrada em Lambert (LAMBERT et al., 1999). O autor se refere a um sistema supervisão como sendo um sistema de controle, que gera uma lista de alarmes disposta de acordo com uma hierarquia pré-determinada e, com base nas informações do processo, gerencia e apresenta os resultados para o operador através de um suporte, seja ele sinótico, console ou painel.

Em uma definição mais atual, Queiroz (2013, p.21) cita que os sistemas supervisórios.

[...] auxiliam os operadores através de interfaces gráficas, onde podem ser visualizadas as informações dos processos, monitorar os parâmetros operacionais, realizar o controle das operações, acompanhar alarmes e notificações sobre situações e eventos que requerem a atenção, além de dar suporte aos operadores no diagnóstico e na solução de problemas. Para isso eles dispõem de ferramentas e métodos para a recuperação e acesso a dados, para a análise e detecção de problemas, e também para o planejamento e controle.

Os sistemas de supervisão e aquisição de dados apresentam três funções básicas, as quais estão descritas de forma resumida na Tabela 2, sendo que um maior detalhamento assim como os componentes lógicos que compõem o sistema é apresentado no próximo tópico.

Tabela 2 - Funções do sistema de supervisão e aquisição de dados

Função	Descrição
Supervisão	Monitoramento do processo: sinóticos animados, gráficos de tendência de variáveis analógicas e digitais, relatórios em vídeo e impressos.
Operação	Ligar e desligar equipamentos e sequência de equipamentos, operação de malhas de controle fechada, mudança de modo de operação de equipamentos, seja ela manual ou automática.
Controle	Todas as operações de entrada e saída são executadas diretamente através de cartões de Entrada e Saída (I/O) ligados diretamente ao barramento do computador, ou por remotas mais simples como um CLP por exemplo.

2.5. Sistemas SCADA

Os sistemas SCADA, do acrônimo em inglês (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados), segundo Ozdemir (OZDEMIR; KARAÇOR, 2002) foram desenvolvidos inicialmente na década de noventa, para aquisição de dados em tempo real e atualmente possuem variadas funções, como, por exemplo, o controle parcial de um equipamento.

O SCADA tem como objetivo propiciar uma interface gráfica de alto nível entre o operador e o processo, informando-o sobre todos os eventos importantes que estão ocorrendo, de forma rápida e eficiente. Para atingir este objetivo, o sistema de supervisão de um processo deve coletar armazenar e supervisionar importantes fontes de dados relacionados com o processo, que ao detectar uma possível perda das funções, alerta o operador (LAKHOUA, 2009).

Para tal, esses sistemas, apresentam algumas características importantes como, por exemplo, os níveis de hierarquia, que segundo Bailey (BAILEY; WRIGHT, 2003) estão divididos essencialmente em cinco níveis.

1. Dispositivos de instrumentação e controle de campo;
2. Terminais de triagem de RTUs (Unidades Terminais Remotas);
3. Sistemas de comunicação;
4. Estação mestre;
5. Sistema de processamento de dados;

As RTUs trabalham diretamente com os dispositivos de campo, recebendo sinais digitais ou analógicos, provenientes dos sensores, que são processados pela própria unidade, que posteriormente executa alguma ação de controle sobre os atuadores. Isto ocorre de forma independente e remota da estação central ou mestre.

Suas principais tarefas se baseiam na aquisição de dados e controle do equipamento e, na transferência dos dados para a estação mestre. Desta forma, a comunicação entre as estações, que geralmente é realizada por um meio físico como, por exemplo, cabo elétrico, fibra óptica e rede sem fio é de extrema importância para o bom funcionamento de um sistema SCADA.

A transferência de dados entre as RTUs e a estação central, se dá através de um meio confiável e de alta velocidade (BAILEY; WRIGHT, 2003) e (MARCUSE et al., 1997).

Segundo Fan (FAN; CHEDED; TOKER, 2005) o sistema SCADA tem a capacidade de realizar o controle automático e o manual, que nesse caso é executado pelo operador, enviando os sinais de comando para as RTUs através dos mesmos canais de comunicação.

Tal controle é realizado por meio de uma interface homem máquina (IHM), que utiliza telas com a representação gráfica das instalações ou equipamento que está sendo operado. Os dados são apresentados de forma dinâmica sobre um fundo estático, sendo atualizado o primeiro plano de acordo com as mudanças que ocorrem no campo.

Os sinóticos animados proporcionam ao operador, uma visualização mais ampla do equipamento que está sendo monitorado, e facilitam o acompanhamento das variáveis, como, por exemplo, estados digitais (válvula aberta, atuador avançado, entre outros) ou analógicos como, números, barras ou gráficos.

A IHM em um sistema supervisorio proporciona um ambiente amigável e de fácil entendimento por parte do operador, o qual facilita o acompanhamento do processo e em tempo real. Um modelo de tela utilizada no SCADA pode ser vista na Figura 12. A tela é um exemplo de aplicação de um *software* comercial, utilizado em suas plantas de processos.

Figura 12 - Tela de dosagem (ELIPSE SOFTWARE, 2013)

A interface de supervisão possibilita uma análise de falha de forma rápida e simples, pelo operador ou pelo mantenedor do equipamento, utilizando seu recurso gráfico, alterando a coloração e o formato do objeto que apresentou falha, facilitando assim, sua operação e a sua

manutenção quando houver necessidade. Outra característica relevante é o fato de que o sistema supervisório gera, através de um banco de dados, informações referentes à produção, como quantidades de peças produzidas por turno, recursos utilizados, tempos de parada de máquina, o quanto de recurso material foi consumido, entre outras; e um histórico de alarmes gerados pelo equipamento, criando um arquivo de ocorrências registradas pelo supervisório possibilitando assim o acompanhamento detalhado do processo.

Com o objetivo de se obter uma maior flexibilidade e robustez conforme a solução desejada, os sistemas SCADA, dividem suas principais tarefas em módulos, os quais são apresentados na Tabela 3, que foi baseada nas descrições apresentadas nos trabalhos de (LAKHOUA, 2009); (BAILEY; WRIGTH, 2003) e (DANEELS; SALTER, 1999).

Tabela 3 - Módulos do sistema SCADA

Módulos	Descrição
Núcleo de processamento	Processamento dos dados oriundos das variáveis do sistema.
Comunicação	Este módulo pode ser dividido em três partes distintas, comunicação com PLCs/RTUs, com outras estações SCADA e com outros sistemas.
Gerenciamento de alarmes	Presente em todos os sistemas SCADA, ele recebe os eventos excepcionais do processo e os registra, identificando algumas variáveis.
Banco de dados	Armazena Fluxos do processo ou diagramas de instrumentação da planta, lista de endereços dos dados ou endereço de registradores no CLP, TAGs e lista de alarmes.
Interface gráfica	Fornece uma representação gráfica geral da planta, onde cada sinótico representa uma área do processo com certo nível de detalhe.
Relatórios	Gera relatórios de produção incluindo os relatórios de balanço de massa ou energia e demonstram quanto uma determinada planta produziu o quanto consumiu de insumos e de energia, também gera relatórios para a manutenção, os quais incluem tempo de parada e os alarmes ocorridos.
Segurança	Tem a função de preservar a sua integridade, impedindo a utilização por pessoas não autorizadas.

Grande parte dos sistemas SCADA trabalha com uma configuração de *hardware* dividida em duas camadas: ‘camada cliente’, responsável pela interface homem-máquina e a ‘camada servidor de dados’, que lida com a maioria de dados de controle do sistema.

Segundo Daneels (DANEELS; SALTER, 1999) os sistemas são multitarefa e baseiam-se numa base de dados em tempo real (BDTR) localizado em um ou mais servidores, sendo eles responsáveis pela aquisição e manipulação de dados, sobre um conjunto de parâmetros, normalmente aqueles a que estão conectados. No entanto, existe a possibilidade de ter servidores dedicados para tarefas específicas, como, por exemplo, historiador e manipulador de alarme.

A seguir, na Figura 13 é mostrada uma arquitetura genérica de um sistema SCADA.

Figura 13 - Arquitetura genérica de um sistema SCADA. Adaptado de (DANEELS; SALTER, 1999)

2.5.1. Requisitos de Software para um Sistema SCADA

O estudo realizado por Polônia (POLÔNIA, 2011) descreve a diversidade dos aplicativos SCADA e as particularidades que cada um oferece segundo suas funcionalidades. O autor também mencionou que na Engenharia de Software os requisitos de um sistema podem ser divididos em funcionais e não funcionais. O primeiro é utilizado para definir o

comportamento do sistema e suas funcionalidades, enquanto o segundo requisito determina as propriedades de qualidade do sistema como, por exemplo, segurança e desempenho.

A utilização dessa divisão pode auxiliar no desenvolvimento de um modelo SCADA específico como, o utilizado pelo presente trabalho, para um robô agrícola móvel, por exemplo. Com a definição dos requisitos necessários é possível mapear todo o equipamento e estabelecer uma relação entre as possibilidades de implementação e as limitações que o processo ou a máquina oferece. Nas Tabelas 4 e 5, a seguir, serão apresentados os requisitos não funcionais e funcionais de um sistema SCADA, os quais estão baseados no trabalho de Polônia (POLÔNIA, 2011).

Tabela 4 - Requisitos não funcionais

Requisitos Não Funcionais	Descrição
Interoperabilidade	Está relacionada à capacidade de interação entre sistemas. Essa é uma propriedade que recebe uma ênfase cada vez maior, devido ao nível de automação que atualmente é empregado em diversos seguimentos industriais.
Portabilidade	É a capacidade que um sistema tem de adaptação e execução de tarefas, para qual ele foi desenvolvido, em diferentes ambientes de <i>hardware</i> e <i>software</i> (GHEZZI; JAZAYERI; MANDRIOLI, 2002).
Escalonabilidade	Em uma arquitetura de software a escalonabilidade está relacionada com a capacidade que o sistema possui de suportar um grande numero de equipamentos e/ou as interações que ocorrem entre eles (FIELDING, 2000).
Confiabilidade	É a capacidade que um sistema tem de se manter operacional mesmo após a ocorrência de falhas em algum componente (PERRY; WOLF, 1992).
Tempo-Real	Sistemas operacionais de tempo-real são aqueles onde os aspectos temporais do seu comportamento fazem parte de sua especificação.

Tabela 5 - Requisitos funcionais

Requisitos Funcionais	Descrição
Aquisição de Dados	É o procedimento de coleta de informações sobre o processo.
Controle	As ações de controle permitem que o operador atue parcialmente sobre o processo.
Interface Homem Máquina	As IHMs ou estações de operação tornam possível a interação entre os operadores e os processos.
Configuração	Possibilita a configuração do <i>software</i> para o processo que será supervisionado. Nesta categoria está o gerenciamento dos dispositivos remotos, definição das variáveis monitoradas, taxas de aquisição de dados, configuração de alarmes e sinóticos animados (CASIMIRO, 1995).
Histórico	É o armazenamento e a possibilidade de consulta de um histórico de dados referentes ao processo, os quais são importantes na geração de relatórios, gráficos e tabelas, que posteriormente são utilizados em análises estatísticas, como cálculo de médias e variâncias. (CASIMIRO, 1995).
Alarmes / Alertas	São notificações geradas para indicar que um determinado evento ocorreu no processo monitorado. A configuração desses eventos costuma seguir a mesma lógica, onde variáveis monitoradas estão associadas a uma determinada condição de trabalho
Segurança	A segurança de um sistema está relacionada com a função de preservar a sua integridade, impedindo a utilização por pessoas não autorizadas e liberando o acesso apenas para seus usuários legítimos.

2.6. Exemplos de Softwares para Sistemas SCADA

Existem atualmente diversos *softwares* de supervisão e aquisição de dados comercializados que são compatíveis com inúmeros modelos de controladores lógicos (CLP) de marcas que estão disponíveis no mercado. A seguir serão apresentados dois deles.

2.6.1. Elipse SCADA

Primeiramente o presente trabalho destaca o *software* supervisório Elipse SCADA, que segundo seu fabricante Elipse (ELIPSE SOFTWARE, 2013) por meio da coleta de informações de qualquer tipo de equipamento é possível monitorar e controlar com precisão os processos, bem como máquinas e recursos, gerenciando de forma rápida e eficiente.

O supervisório também apresenta de forma gráfica os dados em tempo real, o que permite tratar as informações de diversas maneiras como o armazenamento histórico, a geração de relatórios e a conexão remota, entre outras possibilidades. Ainda segundo o fabricante Elipse (ELIPSE SOFTWARE, 2013) o software é dotado de benefícios como a facilidade para configuração devido ao *Organizer* (Árvore do Aplicativo), que é uma maneira simples e fácil para criar, organizar e documentar aplicativos, além de possuir uma interface gráfica, lógica e intuitiva, assim como a conectividade com qualquer equipamento. Alguns dos recursos do software são descritos abaixo.

Recursos do Elipse SCADA

A lista de recursos do software supervisório, que será apresentada a seguir, está baseada nas informações fornecidas pelo seu fabricante e foram destacados os de maior relevância.

Aplicações Remotas: Acesso remoto ao sistema, onde os dados de uma aplicação (servidor) podem ser acessados por um cliente, o qual tem permissão tanto para leitura como a escrita de qualquer parâmetro;

Referência Cruzada: É uma ferramenta que permite a rápida visualização das ligações entre os objetos;

Históricos: São estruturas responsáveis pelo registro dos dados do processo monitorado, os quais podem ser contínuos ou bateladas e com intervalos de tempo fixos ou por eventos;

Alarmes: O Elipse SCADA permite associar diferentes tarefas a alarmes, sendo que o usuário pode, em tempo de execução, alterar limites, habilitar, desabilitar e modificar mensagens de alarmes.

Banco de Dados: Seu banco de dados é de fácil integração devido ao fato do Elipse SCADA utilizar recursos ODBC (Open Data Base Connectivity) e DAO (Data Access Objects), além de possibilitar a integração com sistemas corporativos;

Relatórios: Seus relatórios são criados no mesmo ambiente de desenvolvimento, sejam eles em modo gráfico, texto ou formatado pelo usuário aplicando-se consultas ou filtros específicos;

Escritas: No Elipse SCADA, as escritas do programa são orientados a eventos e isso se deve ao fato dele possuir uma linguagem própria de programação (Elipse Basic), a qual permite definir lógicas ou criar sequências de procedimentos semelhantes ao Visual Basic.

Uma tela do sistema supervisório Elipse SCADA é mostrada na Figura 14 a seguir.

Figura 14 - Tela Elipse SCADA (ELIPSE SOFTWARE, 2013)

2.6.2. ROCKWELL - RSView32

O segundo exemplo de *software* supervisorio que o presente trabalho destaca é o RSView32, da *Rockwell Automation*, é um sistema integrado com IHM baseada em componentes, que possibilita monitorar e controlar com precisão os processos de automação de máquinas. O *Software RSView32*, possui vantagens como o fato de ser comercializado em vários idiomas com, por exemplo, Inglês, português, espanhol, entre outros; também utiliza tecnologias abertas que fornecem conectividade sem precedentes com outros produtos da *Rockwell* e da *Microsoft* (Automation, 2007).

O software supervisorio RSView32, também apresenta de forma gráfica os dados em tempo real, o que permite tratar as informações de diversas maneiras como o armazenamento histórico, a geração de relatórios e a conexão remota, entre outras possibilidades. Sendo alguns dos recursos e características do software descritos a seguir.

Recursos do Software RSView32:

- Abre suas telas gráficas como recipientes OLE (Vinculação e Incorporação de Objetos) para controles *ActiveX* ;
- Permite desenvolver um modelo de objeto para mostrar partes de sua principal funcionalidade , promovendo a interoperabilidade com outros produtos baseados em componentes;
- Integração com o *Microsoft Visual Basic*;
- Trabalha com padrões OPC (*OLE para controle de Processos*) e arquitetura baseada em cliente servidor.
- Permite integrar novos recursos diretamente no núcleo do RSView32.

Características do Software:

- Sistema de Exibição de Atividade - é uma aplicação cliente / servidor que complementa e amplia o alcance, proporcionando a visualização e controle remotamente;
- WebServer - permite que o usuário RSView32 válido, acesse e visualize as telas gráficas , tags e alarmes através de qualquer navegador web padrão;

- RecipePro - Melhora o gerenciamento de receita e controle;
- Mensageiro - notifica alarmes e gera relatórios simples através de fax, e-mail , telefones, celulares , ou mesmo localmente em seu computador usando uma placa de som;
- TrendX - Monitora dados em tempo real e fornece tendências históricas de registros de dados;
- SPC - fornece métodos estatísticos para analisar e controlar a variação de um processo.

Uma tela do *software* RSView32 é mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Tela do Supervisório RSView32 (Automation-Drive.Com, 2014)

2.6.3. InduSoft

O software supervisor *InduSoft Web Studio*, que segundo seu fabricante InduSoft (INDUSOFT, 2014) contém todas ferramentas necessárias para desenvolvimento de aplicações HMI/SCADA, baseadas em WEB em um único pacote sem demandar que usuarios possuam prioridades em funcionalidades.

Ainda segundo seu fabricante o supervisor ainda suporta todas as plataformas Windows (32 e 64 bits), além de possuir um suporte nativo para visualização Web seja ela local ou remota, sendo este o primeiro a oferecer um módulo de configuração online para o desenvolvimento de estações remotas sem a necessidade de interrupção do cliente. Fora isso os recursos utilizados pelo supervisor são similares aos apresentados anteriormente e para não tornar repetitivo não serão apresentados novamente pelo presente trabalho. Uma tela do *InduSoft Web Studio* pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 - Tela do InduSoft Web Studio (INDUSOFT, 2014)

3. Materiais e Métodos

O principal equipamento utilizado no presente trabalho é a plataforma robótica Agribot, construída pela empresa JACTO em parceria com EMBRAPA, FINEP, EESC USP, para aplicações em agricultura de precisão. Neste capítulo, são apresentados os diferentes sistemas e subsistemas utilizados pelo robô agrícola móvel, e podem ser divididos da seguinte maneira: Mecânico (Estrutura e Geração de Energia), Eletro-hidráulico (Propulsão e Guiagem), Sistema de Controle (Módulos de Controle Cummins, Bosch e Sauer Danfoss), Interface Homem Máquina (IHM).

Também é feita uma breve abordagem introdutória, sobre o método de modelagem conhecido como UML (Linguagem de Modelagem Unificada), o qual foi utilizado no desenvolvimento da arquitetura proposta no trabalho.

3.1. Agribot

3.1.1. Sistema Mecânico

O Agribot possui um sistema mecânico que é composto por um motor principal, encarregado de fornecer a potência para os sistemas hidráulicos de propulsão e de guiagem. É dotado também de um sistema de tração 4X2 e possui direção e suspensão independentes nas quatro rodas. Segundo o fabricante, a plataforma pode alcançar uma velocidade de até 24 km/h, sendo que o peso total calculado é de 2779 kg (TABILE, 2012).

A plataforma robótica possui também um sistema de bitola regulável para incrementar/decrementar a distância frontal entre eixos do veículo, possibilitando assim uma adequação a diversas culturas onde o robô atue. Na Figura 17 é apresentada uma visão geral do robô Agribot.

Figura 17 - Agribot visão geral, adaptado de (TABILE, 2012)

As dimensões do robô são mostradas na Figura 18, onde é possível observar o tamanho exato da plataforma, que possui uma distância entre os eixos laterais de 3,0 m, uma altura em relação ao solo 1,8 m e uma distância entre os eixos frontais que pode variar de 2,25 a 2,4 m.

Figura 18 - Dimensões do Agribot (TABILE, 2012)

O ângulo no qual se garante estabilidade longitudinal subministrada pelo fabricante é de 40 graus e representado por (α) e lateralmente de 33 a 35 graus segundo a distância entre os eixos frontais representado por (ϕ), ambas as representações podem ser vistas na Figura 19.

Figura 19 - Ângulos de inclinação do Agribot, adaptado de (TABILE, 2012).

O sistema de esterçamento do robô é composto de um conjunto mecânico de Engrenagem e Cremalheira, que converte o movimento linear em rotativo, sendo o acionamento feito por um atuador hidráulico de dupla ação, e o retorno sobre o posicionamento se dá através de um potenciômetro, o qual trabalha como um transdutor de posição e está fixado em paralelo com o atuador hidráulico. O sistema descrito tem como benefício a mudança no sentido do movimento, porém limita a área de trabalho que, segundo os dados fornecidos pelo fabricante possui, uma área de atuação próxima de 270 graus.

Também compõe o conjunto de esterçamento um sistema de suspensão a ar, pneus de 9,5"x24" diâmetro 1,05m, que suportam a pressão máxima de 18 psi, e o sistema de tração do robô, onde as rodas são atuadas por um motor hidráulico radial Bosch Rexroth, sendo que, duas das quatro rodas possuem sensores de posição e as outras duas freio de estacionamento.

O modelo do sistema de esterçamento do robô pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 - Subsistema da roda do Agribot (TABILE, 2012)

A plataforma robótica ainda conta com um motor de 80HP a 2200 RPM, e um sistema de injeção eletrônica com Inter cooler, o motor diesel do Agribot é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Motor do Agribot (TABILE, 2012)

3.1.2. Geometria de Ackermann

O modelo da geometria Ackermann clássica adotado no presente trabalho, o qual será empregado posteriormente como base para os modos de guiagem disponíveis no sistema supervisor, é apresentado na Figura 22 e foi utilizado no desenvolvimento das equações cinemáticas da plataforma RAM (TORRES et al, 2012). Essas equações basicamente são as mesmas utilizadas no Agribot, também nessa mesma figura é possível observar o modelo e a representação de sua simbologia. Onde (R) representa o raio de curvatura, os ângulos de esterçamento das rodas por (δ_{fi} e δ_{fo}), o comprimento (L) ($L = db + da$), a largura ($lw = lb + la$) e a velocidade de rotação do robô (V_r).

Figura 22 - Geometria de Ackermann adaptado de (RAJAMANI, 2006)

O modelo cinemático considera os parâmetros físicos do robô e as suas dimensões gerais, obtendo assim as equações de 1 a 10. Assumindo um valor de R desejado, tem-se:

$$(l_a + r_{ri})^2 = R^2 - d_a^2 \quad (1)$$

$$r_{r_i} = \sqrt{R^2 + d_a^2} - l_a \quad (2)$$

$$B = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{l_a + r_{r_i}}{d_a} \right) \quad (3)$$

$$B = \cot^{-1} \left(\frac{l_a + r_{r_i}}{d_a} \right) \quad (4)$$

$$B = \cos^{-1} \left(\frac{d_a}{R} \right) \quad (5)$$

$$r_{r_o} = r_{r_i} + l_a + l_b \quad (6)$$

$$r_{f_i} = \sqrt{r_{r_i}^2 + (d_a + d_b)^2} \quad (7)$$

$$r_{f_o} = \sqrt{(r_{r_i} + l_a + l_b)^2 + (d_a + d_b)^2} \quad (8)$$

$$\delta_{f_i} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_{r_i}}{d_a + d_b} \right) \quad (9)$$

$$\delta_{f_o} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_{r_i} + l_a + l_b}{d_a + d_b} \right) \quad (10)$$

Para a cinemática direta tem-se as equações 11 a 20:

$$\dot{\xi}_r = R(\theta) \dot{\xi} \quad (11)$$

$$\dot{\xi} = \{\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta}\}^T \quad (12)$$

$$\dot{\xi}_r = \{\dot{x}_r \quad \dot{y}_r \quad \dot{\theta}_r\}^T \quad (13)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} c\theta & s\theta & 0 \\ -s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\dot{\xi} = R(\theta)^{-1} \cdot \dot{\xi}_r \quad (15)$$

$$R(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\dot{\xi}_r = \{v_r c_\beta \quad -v_r s_\beta \quad \dot{\beta}\}^T \quad (17)$$

$$v_r c_\beta = \omega_{r_i} \cdot r_\omega \quad (18)$$

$$-v_r s_\beta = \frac{\omega_{r_i} \cdot r_\omega \cdot d_a}{\sqrt{R^2 - d_a^2 - l_a^2}} \quad (19)$$

$$\dot{\beta} = \frac{\omega_{r_i} \cdot r_\omega}{\sqrt{R^2 - d_a^2 - l_a^2}} \quad (20)$$

Devido à trajetória percorrida pelo robô em uma curva e o ângulo formado entre as rodas e o centro de rotação, faz-se necessária a existência de um diferencial de velocidade entre cada uma das rodas, evitando dessa forma a ocorrência de um fenômeno conhecido como *deslizamento de roda*. Esse diferencial é determinado pelas equações de 21 a 24, onde as variáveis das rodas são respectivamente:

(ω_{f_o}) dianteira esquerda, (ω_{f_i}) dianteira direita, (ω_{r_o}) traseira esquerda e (ω_{r_i}) traseira direita.

Equações das velocidades angulares:

$$\omega_{r_i} = \frac{r_{r_i}}{r_\omega} - \frac{v}{R} \quad (21)$$

$$\omega_{r_o} = \frac{r_{r_o}}{r_\omega} - \frac{v}{R} \quad (22)$$

$$\omega_{f_i} = \frac{r_{f_i}}{r_\omega} - \frac{v}{R} \quad (23)$$

$$\omega_{f_o} = \frac{r_{f_o}}{r_\omega} - \frac{v}{R} \quad (24)$$

Uma simulação utilizando o modelo de Ackermann foi realizada utilizando o *software* Matlab, e o seu respectivo resultado é apresentado na Figura 23 a seguir.

Figura 23 - Simulação do modelo cinemático (TORRES, et al., 2012)

O modelo utilizado na simulação juntamente com as equações apresentadas nesse tópico, demonstra que para todos os possíveis raios de curvatura (R) em metros, os quais têm como referencial o centro de gravidade do robô, também é possível observar que os respectivos ângulos das rodas (δ_{fi} e δ_{fo}) são maiores que o ângulo de orientação do robô (B). Nesse contexto, é possível observar no gráfico apresentado, que para um valor de (R) que representa o raio da curva que se deseja realizar, é possível determinar os ângulos das rodas e saber o valor do ângulo (B), referente ao centro de gravidade do robô durante sua trajetória.

3.1.3. Sistema Eletro-Hidráulico

O sistema Eletro-Hidráulico é encarregado de transmitir a potência do motor diesel aos motores hidráulicos de propulsão e os atuadores (cilindros hidráulicos) de esterçamento do Agribot. Na Figura 24 é possível ter uma visão geral sobre esses dois sistemas, assim como a interação existente entre seus componentes.

Na parte superior da figura está o diagrama eletro-hidráulico de propulsão, que possui um módulo de controle, o qual recebe os sinais digitais do Encoder e os utiliza para o controle

de velocidade alternando a percentagem do PWM enviado a válvula proporcional da bomba hidráulica de fluxo variável. Também possui um bloco com duas válvulas direcionais com retorno por mola, que quando acionadas pelo módulo de controle libera o freio estacionário.

O segundo sistema que se encontra na parte inferior da figura é o de guiagem, ele possui um módulo de controle, o qual é responsável pela movimentação das rodas, utilizando um valor PWM na válvula proporcional referente ao atuador que se deseja mover. Para o controle de posicionamento o módulo é retroalimentado por um sinal analógico proveniente de um potenciômetro, o sistema hidráulico na configuração atual conta com duas bombas de vazão fixa, e assim como o módulo de propulsão o de guiagem também utiliza o barramento CAN ISO 11898 para comunicação.

Figura 24 - Diagrama Eletro-hidráulico de propulsão e guiagem do Agribot.

3.2. Sistema Hidráulico

Inicialmente foram identificados todos os elementos que compõem o sistema de guiagem e o de propulsão. Tal identificação foi realizada com fotos dos componentes e o auxílio da folha de dados disponibilizada pelos respectivos fabricantes, possibilitando a identificação e o entendimento do comportamento característico de cada um dos componentes durante sua atuação.

Após identificar os componentes que fazem parte do sistema hidráulico do Agribot, o qual deve ser supervisionado, no presente trabalho se dividiu o sistema em outros dois, respectivamente o de propulsão e o de guiagem.

O sistema de propulsão é uma solução proprietária da empresa Bosch Rexroth, composta por um módulo de controle, duas bombas hidráulicas de vazão variável, cujo controle do fluxo se dá através de válvulas proporcionais instaladas junto às bombas, sendo que cada bomba está conectada a dois dos quatro motores também hidráulicos que o sistema possui, sendo os mesmos instalados de forma cruzada. Dois deles são dotados de um sistema de freio estacionário e os outros dois de sensores (encoders), os quais indicam posição.

O controle de velocidade e o sentido de giro das rodas são determinados pelo usuário através do sistema de controle, o qual envia um comando para o módulo de controle, que de acordo com a velocidade estabelecida pelo operador, aplica uma determinada corrente nas válvulas proporcionais das bombas. Por meio de modulação de largura de pulso (PWM), controla-se a porcentagem de abertura da válvula determinando o fluxo de fluido hidráulico para o motor e consequentemente alternando a sua rotação e torque.

O sistema de controle após enviar o comando, recebe informações do módulo de controle como, por exemplo, *status* do controlador, dados referentes aos encoders, entre outras, selecionando as informações e as disponibilizando para o usuário na forma de velocidade (em m/s) ou se existe ou não ocorrência de falhas no sistema de propulsão.

Essa definição só foi possível através dos testes realizados, os quais possibilitaram identificar o funcionamento detalhado do sistema de propulsão, estabelecer parâmetros, mapear as variáveis que podem ser utilizadas pelo supervisor e de que maneira as manipular, além de possibilitar um ajuste mecânico de pressão hidráulica para se obter o melhor desempenho do sistema de propulsão. O diagrama hidráulico do sistema de propulsão é apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Diagrama hidráulico de propulsão do Agribot (REXROTH, 2010)

A segunda parte do sistema hidráulico a ser supervisionado é o de guiagem, porém, devido ao fato dele não ser uma solução proprietária, portanto, não possui um sistema de controle já implementado e também utiliza componentes fornecidos por mais de um fabricante. Além da falta de informações pertinentes sobre grande parte de seus componentes, se fez necessário realizar um levantamento detalhado das informações utilizadas para o desenvolvimento do sistema de controle.

Nesse contexto, o presente trabalho identificou os elementos que compõem o sistema de guiagem é uma bomba de engrenagens de vazão fixa, um bloco composto por quatro válvulas proporcionais, quatro atuadores hidráulicos (cilindros) e seus correspondentes sensores de posicionamento (potenciômetros) que retroalimentam o módulo de controle MC050-010 do fabricante Sauer Danfoss, indicando a posição angular das rodas. O sistema ainda conta com válvulas de retenção que estão localizadas antes das conexões dos atuadores hidráulicos, além de uma válvula de alívio de pressão no bloco.

Após a identificação dos componentes se iniciou uma fase de testes, através dos quais foi possível observar que o Agribot não apresentava um controle efetivo de esterçamento das rodas, o que motivou um estudo mais detalhado do circuito hidráulico. Constatou-se que o atuador não tinha força suficiente para manter a velocidade e acuracidade no posicionamento desejado, e também que a vazão fornecida pela bomba não era suficiente para realizar o esterçamento simultâneo das quatro rodas.

Como esses fatores têm influência direta no controle de baixo nível e por consequência no sistema supervisor, foram adotadas as seguintes medidas para a correção. Primeiramente foi efetuada a troca dos atuadores hidráulicos por outros com diâmetro de embolo maior. Outra solução encontrada, agora referente à vazão, foi agregar uma nova bomba ao sistema de guiagem, bomba esta que estava prevista para um circuito auxiliar. O circuito hidráulico do sistema guiagem obtido após a realização das melhorias e testes para identificação dos seus componentes, é apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Diagrama hidráulico de guiagem do Agribot

As correções realizadas no sistema hidráulico de guiagem deram maior confiabilidade, possibilitando manter a velocidade, a acuracidade e o esterçamento simultâneo das rodas, seja ele executado aos pares ou as quatro rodas simultâneas, favorecendo um controle preciso e confiável de esterçamento, fator importante a ser considerado no desenvolvimento de um sistema supervisor.

Com base no estudo dos sistemas hidráulicos empregados na plataforma robótica, foram efetuados alguns cálculos básicos, os quais consideram que o robô esteja operando nas condições nominais de funcionamento e utilizando os dados disponibilizados pelos catálogos do fabricante, que serviram de referência para o entendimento dos parâmetros a serem controlados e supervisionados e, das limitações que a plataforma apresenta, possibilitando assim a continuidade do trabalho baseado na situação atual do robô.

3.3. Sistema Elétrico

O robô executa manobras através do esterçamento das rodas, o qual é comandado pelos solenóides das válvulas proporcionais do circuito de guiagem. Seguindo o comando enviado pela controladora, o solenóide selecionado aciona o cilindro hidráulico referente à válvula. Os sinais elétricos passaram por testes, em seguida foram comparados com a folha de dados fornecida pelo fabricante e estabelecido a relação entre eles.

Para a realização dos testes foram utilizados dois equipamentos de medição de sinal elétrico, sendo eles um osciloscópio e um multímetro, os quais foram essenciais para o entender o comportamento das válvulas proporcionais de guiagem, cuja abertura não se dá de forma linear. Na Figura 27 abaixo, pode ser visto o desenho da válvula proporcional e a relação entre a corrente aplicada e a vazão, que para o Agribot tem seu desempenho demonstrado pela linha contínua (Cóleo S1).

Figura 27 - Válvula proporcional e gráfico de desempenho (HYDRAFORCE, 2011)

Segundo os dados fornecidos pelo fabricante, a válvula inicia sua abertura a partir da aplicação de uma corrente de intensidade aproximada de 0,4 A, e chega a sua abertura máxima com uma corrente de 1 A.

Com base nesses dados se realizaram alguns testes, onde foram coletados os sinais que são aplicados diretamente nas válvulas solenóides. Os testes foram realizados em todas as válvulas e uma análise gráfica do resultado é apresentado na Figura 28. O presente trabalho

Figura 28 - Sinal elétrico dos solenóides

A realização dos testes se deu através da utilização da IHM (Interface Homem Máquina), a qual fornece uma determinada corrente para a válvula ajustando um valor de PWM. Como pode ser observado no gráfico da Figura 28, existe uma relação entre os valores. Também foi possível observar que o sistema tem uma faixa de operação variando o valor do PWM de 30 a 70 %, que representa a aplicação de uma corrente no solenóide que pode variar de 500 mA até 1000 mA.

3.4. Sensores de Posicionamento das Rodas

Os dispositivos que medem o deslocamento angular das rodas do Agribot são potenciômetros lineares, que se encontram fixos junto aos atuadores hidráulicos. Esses sensores ou transdutores são analógicos e estão conectados diretamente ao módulo de controle de guiagem.

A controladora faz a conversão do sinal para digital e o disponibiliza no barramento CAN. Na Figura 29 é possível observar o gráfico com a faixa de trabalho do sensor, já com os valores obtidos na leitura digitalizados pelo controlador e a relação existente entre eles e o posicionamento das rodas do Agribot.

Figura 29 - Ângulos de esterçamento em relação ao sinal digitalizado

Analisando o gráfico após a realização dos testes, foi possível determinar a faixa de trabalho das rodas, as quais possuem um ângulo de esterçamento total de 266° . Por convenção foi adotado o sinal negativo (-), quando as rodas estão convergindo e positivo (+) quando estão divergindo, sendo que a angulação está disposta da seguinte forma: (-) 111° e (+) 155° como, por exemplo, a roda traseira direita 'TD', que pode ser vista na Figura 28, onde o desenho em azul demonstra o ângulo máximo de convergência, que tem o valor igual a 111° e a parte em vermelho do desenho demonstra o ângulo máximo de divergência, o qual tem seu valor igual a 155° . Nesse contexto é possível comprovar que o Agribot não possui uma simetria angular, ou seja, tendo maior amplitude em sentido de giro do que em outro.

Com base nos dados digitais obtidos após a conversão realizada pela controladora, que por convenção o presente trabalho representa por (Ψ), juntamente com os testes, foi possível obter o conhecimento das limitações mecânicas impostas pelo sistema de guiagem. Também se definiu uma posição referente ao zero grau de cada roda, assim como o valor médio correspondente fornecido pela controladora após a digitalização do sinal analógico proveniente do potenciômetro, sendo que o valor aproximado referente ao 0° para cada roda é de 15000 Ψ , e os valores digitalizados relativos às posições limite para esterçamento das rodas do Agribot, podem variar de 3000 Ψ a 31000 Ψ . Na Figura 29 são apresentadas as posições das rodas com seus valores correspondentes já digitalizados pelo módulo de controle de esterçamento.

Figura 30 - Posições das rodas e valores digitalizados

Com a identificação das variáveis e os estudos realizados na plataforma robótica Agribot, foi possível gerar um diagrama simplificado, o qual demonstra o funcionamento do mesmo considerando os sinais de controle e retorno, e os erros os quais podem ser provenientes dos módulos de controle em caso de falhas ou ainda do acionamento dos botões de emergência e de um tempo de 20 segundos que o sistema de controle possui para ser habilitado. Nesse contexto, após energizar o robô, a partida do motor Diesel só está autorizada, se não houver nenhum sinal de erro e o sistema de controle operacional seja ele IHM ou PC via CAN, estabelecer conexão com o controlador MC050-010 em um tempo

inferior a 20 segundos. Se isso não ocorrer é gerado um sinal de erro e a partida não é autorizada. Para proporcionar um melhor entendimento na Figura 31 é apresentado um diagrama simplificado do funcionamento do Agribot.

Figura 31 - Diagrama simplificado de funcionamento do Agribot

Nesse diagrama que está dividido em duas partes, onde na primeira parte se encontra uma rotina de inicialização que verifica os sinais de emergência, os quais são provenientes do acionamento dos botões e os que indicam algum tipo de falha em qualquer um dos módulos de controle, todos são considerados erros e bloqueiam o funcionamento do Agribot. A segunda parte demonstra uma rotina de funcionamento, cujas linhas azuis correspondem aos sinais de controle, ou seja, os sinais enviados ao robô para o sistema de esterçamento, o de

propulsão e o do motor Diesel, já as linhas tracejadas são correspondentes a comunicação entre os módulos enquanto as linhas vermelhas representam os sinais de retorno dos sensores empregados na plataforma robótica.

O módulo de propulsão é uma solução proprietária *Bosch Rexroth*, composta por uma controladora, duas bombas hidráulicas de vazão variável, e quatro motores também hidráulicos, sendo dois deles dotados de um sistema de freio estacionário e os outros dois possuem sensores de posicionamento (encoders).

Enquanto o módulo, referente ao sistema de guiagem, é composto por uma bomba hidráulica, quatro atuadores hidráulicos de dupla ação, um bloco de válvulas proporcionais responsáveis pela movimentação dos atuadores, quatro sensores de posição analógicos (potenciômetros), que estão fixados junto aos cilindros. Também possui uma controladora, a qual é responsável pela troca de mensagens entre todos os módulos de controle e o PC, com o qual estabelece comunicação via barramento CAN ISO 11898. Sua interação com o módulo de controle do motor Diesel é feita por meio de um protocolo CAN J1939.

3.4.1. Sistema de Controle Operacional por IHM

O Agribot possui um sistema de controle manual, o qual possibilita operar o robô em caso de manutenção no campo e na ausência ou falha no sistema de acesso remoto. Essa operação é realizada por meio de uma IHM (Interface Homem Máquina), a qual possui uma série de botões, que são utilizados para selecionar a operação desejada e enviar os comandos para sua execução. A mesma também possui uma tela, que retorna ao usuário algumas informações básicas relacionadas ao robô como, por exemplo, temperatura do motor, nível de combustível, RPM, entre outras. Na Figura 32 é apresentada essa *Interface Homem Máquina*.

Figura 32 - IHM para operação do Agribot

A IHM é conectada a plataforma por meio de um barramento, o qual recebe os comandos através do protocolo de comunicação CAN (*Control Area Network*). O programa utilizado pelo equipamento é bastante limitado apesar de estabelecer a conexão direta com os módulos de controle de guiagem e propulsão. A IHM apresenta uma interface de fácil interpretação e operação pelo usuário, porém sua atuação é restrita a uma operação por vez, por exemplo, para realizar uma manobra é necessário parar o robô e esterçar uma roda por vez.

Através da IHM o operador tem a possibilidade de movimentar cada uma das rodas de forma independente, com a manipulação direta das variáveis utilizadas pelas controladoras (Sauer Danfoss, Bosch). Na Figura 33 é apresentado um diagrama que demonstra a conexão entre os subsistemas do Agribot e a *Interface Homem Máquina*.

Figura 33 - Diagrama de conexão entre os subsistemas do Agribot e IHM

3.5. UML

Dentro do contexto de modelagem a UML (*Unified Modeling Language*) se mostra, de fato, um padrão para representação e a elaboração da estrutura de projetos de *software*. Entre suas vantagens estão a capacidade de expressar modelos em diferentes níveis de precisão e a capacidade de representar visões diferentes de um mesmo sistema (VILANI; MIYAGI; VALETTE, 2001).

UML é uma linguagem utilizada em modelagem, que pode ser aplicada para a visualização, especificação, construção e documentação de componentes que utilizam sistemas complexos de *software*, (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006). Segundo Vilani (VILANI; MIYAGI; VALETTE, 2001) a UML é o resultado da união dos esforços de muitos especialistas em orientação a objeto, entre eles se destacam Grady Booch (Método Booch), Jim Rumbaugh (Object Modeling Technique (OMT)), Ivar Jacobson (Object-Oriented Software Engineering (OOSE)) e David Harel (Statecharts).

Modelos desenvolvidos com o auxílio do UML, a qual não é considerada uma linguagem de programação, e sim uma linguagem padrão para desenvolvimento de estruturas empregadas em projetos de *software*, que pode ser utilizada diretamente por inúmeras linguagens de programação, facilitam o desenvolvimento e a visualização do projeto.

De uma forma geral, pode-se descrever a UML como uma linguagem que, a partir de alguns elementos básicos e dos tipos de relação entre estes elementos, define uma série de diagramas que têm como finalidade a representação de diferentes aspectos de um mesmo sistema (VILANI; MIYAGI; VALETTE, 2001).

Em um modelo conceitual descrito por Booch (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006), a UML é composta por três elementos principais: os blocos básicos de construção da linguagem, as regras que determinam como esses blocos poderão ser combinados e alguns mecanismos comuns aplicados na UML.

Os blocos básicos de construção definem os itens, os relacionamentos e os diagramas. Os principais tipos de elementos estruturais são classes, interfaces, casos de uso, componentes, entre outros, que podem ser considerados a parte mais estática do modelo, e interações, máquina de estado e atividade, que são a parte dinâmica, cujo elemento está relacionado ao comportamento do sistema.

As relações existentes na UML estão divididas em quatro tipos, tendo como principais blocos relacionais básicos os de associação e generalização. Uma associação descreve estruturalmente a relação existente entre dois elementos, tendo a agregação como um tipo de associação, a qual relaciona a reunião das partes de um objeto, formando um todo. A generalização é considerada um relacionamento de especialização ou herança, cujos objetos especializados são substituíveis, por objetos generalizados, compartilhando sua estrutura e comportamento.

Na linguagem UML, se utiliza a representação gráfica de um conjunto de elementos ou diagrama, que permitem a visualização do sistema de vários ângulos. A UML define uma série de diagramas cada um com sua particularidade, entre eles, se destacam aqueles que têm relação direta com o trabalho, os quais fornecem uma visão de projeto e interação.

São eles:

- *Diagrama de Caso de Uso:* É utilizado para descrever os requisitos funcionais e/ou não funcionais propostos para um novo sistema a ser projetado. Nesse contexto, o presente trabalho utiliza o diagrama *Caso de Uso*, para definir e documentar os requisitos e as funcionalidades do modelo supervisorio proposto, tratando cada *Use Case*, como uma unidade discreta, a qual interage com o sistema, no caso o supervisorio. Esse tipo de diagrama abstrai os detalhes técnicos para facilitar a compreensão da interação entre o sistema e os Casos de Uso, apresentando uma visão externa dos elementos do sistema e a interação existente entre eles.
- *Diagrama de Sequência:* É responsável por enfatizar a ordem temporal das mensagens e em conjunto com o diagrama de *Comunicação*, que enfatiza de forma ordenada a estrutura dos objetos que enviam e recebem mensagens, dão origem ao diagrama de *Interação*, o qual é utilizado para modelagem comportamental e representação de uma visão dinâmica do sistema. Os diagramas de *Interação* podem aparecer sozinhos para visualizar, especificar, construir e documentar a dinâmica de uma determinada sociedade de objetos ou podem ser utilizados para fazer a modelagem de um determinado fluxo de controle de um *Caso de Uso* (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006).

Nesse contexto, foi utilizado para modelar os aspectos dinâmicos do sistema supervisorio do Agribot, a modelagem dos fluxos de controle por ordenação temporal. Para esse caso é utilizado o *Diagrama de Sequência*, dando ênfase à passagem de

mensagens, à medida que ocorrem, com o passar do tempo, o que é uma forma particular e útil de visualizar o comportamento dinâmico no contexto de um cenário de *Caso de Uso*.

- *Diagrama de Atividades*: É um diagrama UML, assim como o de *Interação*, utilizado para modelar os aspectos dinâmicos de um sistema. Esse tipo de diagrama modela uma atividade de qualquer tipo de abstração, como uma sequência estruturada de ações, as quais são controladas através de nós de decisão e sincronismo. Outro fator não menos relevante na escolha do diagrama é o fato de que a partir de um modelo desenvolvido por ele, é possível criar um código.

4. Desenvolvimento do Modelo Supervisório

No desenvolvimento do modelo base para um sistema supervisório foi necessário um estudo detalhado do equipamento que será utilizado como referência. Nesse contexto, o conhecimento sobre o funcionamento do Agribot no presente trabalho, e as variáveis nele empregadas, se torna um fator essencial para a identificação e a definição dos requisitos funcionais e não funcionais a serem utilizados pelo sistema SCADA.

O estudo da plataforma robótica demonstrou que a mesma possuía as características e os elementos fundamentais para o desenvolvimento de um sistema supervisório, porém se fez necessário um maior detalhamento do comportamento do sistema hidráulico, elétrico e de controle. Um mapeamento permitiu a identificação da maior parte dos componentes e dos subsistemas utilizados pela plataforma robótica, analisando as grandezas físicas envolvidas e seu comportamento diante dos sinais enviados pelos módulos de controle, que estão diretamente relacionados ao sistema supervisório. A seguir é apresentado o modelo SCADA, proposto para o Agribot juntamente com os diagramas UML utilizados para descrever seus aspectos.

4.1. Modelo Supervisório

O modelo supervisório desenvolvido no presente trabalho utiliza como referência uma plataforma robótica agrícola móvel específica (Agribot), a qual foi descrita de forma detalhada nos capítulos anteriores. O primeiro modelo de arquitetura supervisória, empregado nesse segmento da robótica, considerou os componentes que a plataforma possui e trabalhou dentro das suas limitações estruturais.

O sistema SCADA para o robô está fundamentado em uma arquitetura supervisória do tipo Cliente-Servidor a qual pode ser vista na Figura 34, que proporciona uma visão geral do modelo e seus respectivos componentes e subsistemas.

Figura 34 - Arquitetura Supervisória do Agribot (TORRES, et al., 2013)

Para o seu desenvolvimento, foram utilizados conceitos e requisitos empregados em sistemas similares que são utilizados em grande escala em outros segmentos, como por exemplo, na indústria, extração de petróleo, geração de energia, entre outros.

O modelo supervisório proposto tem como função básica realizar a leitura dos dados (frames), que contem as informações provenientes dos módulos de controle e também enviar comandos referentes à operação de campo do robô. Para tal, utiliza o protocolo de comunicação CAN. As mensagens, recebidas e enviadas por meio do barramento CAN, são recebidas e disponibilizadas pelo controlador MC050-010 (Sauer Danfoss), sendo ele responsável pela troca de dados correspondentes a cada um dos subsistemas funcionais do Agribot e o sistema de supervisão.

O MC050-010 também é responsável pela conversão das mensagens trocadas entre ele e o segundo controlador (Cummins), o qual utiliza o protocolo de comunicação CAN J1939. Os dados provenientes do módulo de controle (Sauer Danfoss) são diferenciados e classificados, e as informações apresentadas em uma interface com sinóticos animados, os quais permitem visualizar um conjunto todo de uma só vez, facilitando a operação do equipamento.

Nesse contexto, com base na revisão bibliográfica foi possível definir e adequar quais requisitos funcionais e não funcionais podem ser empregados em um robô agrícola, dentro do cenário da Agricultura de Precisão nacional. Tais requisitos são demonstrados a seguir, com o auxílio dos diagramas UML.

4.2. Diagramas UML do Modelo Supervisório

4.2.1. Diagramas de Caso de Uso do sistema supervisório do Agribot

Os diagramas de Casos de Uso têm um papel importante no contexto da modelagem dos aspectos dinâmicos de sistemas, sendo eles utilizados para visualizar, especificar e documentar o comportamento de um elemento. Esse tipo de diagrama facilita a compreensão e o acesso a sistemas ou subsistemas como, por exemplo, os encontrados na plataforma robótica Agribot. Isso ocorre devido ao fato dos *Casos de Uso* apresentarem uma visão externa de como seus elementos podem ser utilizados em determinadas situações.

O trabalho utiliza o diagrama *Caso de Uso* na modelagem dos requisitos do sistema supervisório proposto para o Agribot, estabelecendo uma relação entre eventos externos ao sistema e ele próprio.

Ao modelar um sistema, espera-se que ele execute todos os requisitos previstos de maneira previsível, fiel e confiável. Porém, é preciso que haja um consenso inicial a respeito do que o sistema deve fazer tendo uma boa compreensão sobre seus requisitos, sejam eles funcionais ou não.

Outro fator essencial a ser considerado para o emprego adequado de um supervisor é conhecer como ele e o equipamento no qual será empregado se comportam. Para uma melhor compreensão do modelo proposto, na Figura 35, é apresentada uma visão geral dos requisitos funcionais e não funcionais do sistema supervisor e dos subsistemas que compõem o Agribot.

Figura 35 – Diagrama Caso de Uso Agribot / Supervisor

4.2.2. Diagrama Caso de Uso dos requisitos funcionais

No diagrama Caso de Uso da Figura 35, estão representados os subsistemas que compõem o Agribot, os quais já foram descritos no capítulo anterior e também o modelo do sistema supervisorio proposto, o qual será apresentado de forma detalhada a seguir. Com o intuito de facilitar o entendimento do modelo, o diagrama foi dividido em duas partes e dele foi retirada a parte referente aos subsistemas do Agribot.

A primeira parte, que pode ser vista na Figura 36, possui apenas o ator supervisorio e os casos de uso, contendo os requisitos funcionais definidos para o modelo, os quais descrevem a funcionalidade do sistema, ou seja, o que ele faz.

Figura 36 - Diagrama Caso de Uso dos requisitos funcionais do modelo supervisorio

Para a definição de um modelo que fosse aplicável na robótica agrícola móvel, foram realizados estudos e um levantamento bibliográfico sobre agricultura de precisão (AP),

sistemas de gerenciamento agrícola (FMIS), plataformas robóticas agrícolas móveis e SCADAs.

Com base nas pesquisas realizadas, foi possível definir os requisitos funcionais necessários para o desenvolvimento de um sistema supervisório. Essa definição proporciona uma visão específica de como deve ser um SCADA, aplicável na robótica agrícola móvel.

O modelo ou arquitetura proposta estão fundamentados em conceitos dos tradicionais sistemas SCADAs, e a esses conceitos foram acrescentadas particularidades presentes no setor agrícola como, por exemplo, técnicas empregadas na agricultura de precisão, funções exercidas pelo robô, entre outras. Nesse contexto foi definido um conjunto de requisitos funcionais para o sistema supervisório do Agribot, os quais são descritos a seguir.

Aquisição de Dados: É o procedimento de coleta de informações sobre um processo, sendo os dados provenientes de grandezas físicas, como temperatura, pressão, ou ainda de equipamentos de campo, os quais disponibilizam informações por meio de sensores que indicam o estado de um equipamento, como por exemplo, se um atuador foi acionado corretamente ou se uma válvula está na posição desejada.

A aquisição de dados em um sistema supervisório é de fundamental importância, devido ao fato das suas funcionalidades serem dependentes dos dados coletados dos dispositivos de campo. No modelo SCADA para o robô agrícola, esse requisito funcional pode receber dados provenientes de duas fontes:

Aquisição de dados do robô: São os dados referentes ao sistema operacional do robô, os quais disponibilizam informações sobre as condições de funcionamento e o estado dos atuadores do equipamento.

Aquisição de dados agrícolas: São as informações relacionadas ao cultivo e análise do solo, coletadas através de módulos acoplados ao robô como, por exemplo, o sensor de refletância *Crop Circle*.

Controle: São ações de controle utilizadas durante a operação, as quais permitem alterar valores de algumas variáveis através do sistema supervisório. São consideradas de alto nível e permitem que o operador atue parcialmente sobre o equipamento durante uma determinada tarefa. Nesse contexto vale ressaltar que o termo controle utilizado não está relacionado com

os métodos de controle clássicos e para essa aplicação em especial as ações de controle permitidas utilizando o supervisor são duas.

Controle de posicionamento: É o controle de posição do robô utilizado para sua locomoção, o qual trabalha no modo manual utilizando computador ou semi-autônomo de acordo com uma configuração pré-estabelecida. Esse controle é responsável pelo esterçamento das rodas e pode ser alterado através do supervisor.

Controle de velocidade: Por meio desse controle utilizado pelo robô, pode-se alterar a velocidade de locomoção e a de esterçamento das rodas. Assim como o controle de posicionamento, ele trabalha no modo manual e semi-autônomo de acordo com uma configuração pré-estabelecida, podendo sofrer alterações durante a operação via sistema supervisor.

Configuração: Possibilita a configuração do *software* utilizado pelo equipamento que será supervisionado. Neste contexto, é possível estabelecer critérios para o gerenciamento dos dispositivos remotos, definir quais variáveis serão monitoradas, estabelecer as taxas de aquisição de dados, configurar os alarmes e os sinóticos animados. No caso do supervisor proposto para o Agribot, utiliza-se a configuração também no modo de esterçamento e no sentido de locomoção.

Configuração do modo de esterçamento: Define o modo como será executado o esterçamento das rodas do robô, o qual pode ser feito individualmente, aos pares ou as quatro simultaneamente. Também é possível estabelecer a velocidade com que as rodas se movimentam.

Configuração do sentido de locomoção: Através desse modo é possível definir o sentido e a velocidade de locomoção. Nesse contexto o sentido horário de giro do motor hidráulico da propulsão, representa que o Agribot está se locomovendo para frente e o anti-horário para trás (marcha ré), de acordo com o referencial estabelecido por convenção. Quanto à velocidade, o modo de configuração permite que a mesma seja alterada durante a operação ou estabelecida previamente, para execução de uma determinada tarefa.

Histórico: É responsável pelo o armazenamento de dados referentes ao equipamento e a operação que está sendo executada por ele. O histórico possibilita a consulta de informações referentes ao processo, as quais são utilizadas na elaboração de relatórios, gráficos e tabelas, que auxiliam em análises estatísticas em diversos setores da agroindústria como, por exemplo, manutenção e gestão de produção. Para o modelo supervisorio do Agribot, o histórico foi dividido em dois segmentos, facilitando a geração de relatórios, devido a um direcionamento mais específico.

Histórico de operação: Armazena os dados referentes à operação, os quais já foram gerados a partir de sensores e equipamentos embarcados utilizados na agricultura de precisão e informações referentes ao robô como, por exemplo, consumo de combustível, posição e área percorrida, tempo de máquina parada, entre outras. Os dados desse histórico são utilizados pelo sistema de gerenciamento agrícola.

Histórico de falhas: As informações contidas nesse histórico são referentes à máquina (Agribot) e dizem respeito a falhas em seus componentes ocorridas durante a operação como, por exemplo, falta de algum sinal proveniente de sensor, parada de emergência, defeito nos módulos de controle, entre outras. Esses dados são utilizados pela equipe de manutenção para uma eventual manutenção corretiva e também nas manutenções preventivas e preditivas.

Através do histórico a engenharia de manutenção tem acesso detalhado sobre as quebras ou manutenções já realizadas no equipamento, o qual pode incluir local, data, serviço realizado, horas trabalhadas do robô, mantenedor responsável e o código e tipo das peças que foram substituídas.

Gerenciamento de Alarmes: Alarmes são notificações geradas para indicar que um determinado evento ocorreu no equipamento que está sendo monitorado. Sua configuração segue uma lógica pré-definida, onde as variáveis monitoradas estão associadas a uma determinada condição de trabalho.

O gerenciamento proposto para o supervisorio do robô agrícola, recebe as notificações e as classifica em críticas ou não críticas. Quando o alarme representar um evento considerado crítico, o supervisorio gera um aviso luminoso e/ou sonoro e adota uma ação corretiva, como por exemplo, a parada ou até mesmo o desligamento total do equipamento. Porém, quando o evento que gerar o alarme não for crítico, só ira gerar um aviso luminoso sem que haja qualquer intervenção do sistema.

Interface Homem Máquina: As IHMs ou estações de operação tornam possível a interação entre os operadores e os processos. Basicamente, trata-se de um equipamento composto por uma tela e um conjunto de teclas utilizadas para navegação ou inserção de dados que se utiliza de *Software* específico para sua programação. Através dela é possível visualizar alarmes, dados dos componentes da máquina e do processo, alterar parâmetros do equipamento, selecionar modo de operação, entre outras várias funções.

O Agribot atualmente possui uma IHM, fornecida pela empresa Jacto e uma interface básica desenvolvida a partir do modelo de sistema supervisório proposto pelo presente trabalho, a qual pode ser utilizada de forma remota de uma estação operacional. A princípio deverão ser utilizadas apenas as funções básicas descritas, porém com a evolução do projeto ela também se tornará funcional para outros módulos como, por exemplo, o sensoriamento de parâmetros agrícolas.

Segurança: A segurança de um sistema está relacionada com a função de preservar a sua integridade, impedindo a utilização por pessoas não autorizadas e liberando o acesso apenas para seus usuários legítimos. Esse requisito não funcional é de extrema importância para o bom desempenho de um sistema supervisório agrícola, devido a vários fatores que podem causar diversos danos como, por exemplo, ambientais, financeiros e também acidentes com vítimas.

Uma característica do robô que motiva ainda mais a preocupação com a segurança do seu sistema SCADA se deve ao fato de ser um equipamento de grande porte, desenvolvido para trabalhar entre linhas de plantio em campo aberto. Dependendo da missão que ele estiver executando, pode estar com um grande volume de pesticida ou algum outro produto similar.

Comunicação: O sistema supervisório do robô prevê basicamente dois tipos de comunicação: o primeiro estabelece a troca de dados entre o servidor SCADA e os módulos de controle do Agribot e utiliza o protocolo de comunicação CAN ISO 11898. Já o segundo promove a integração e a troca de informações entre o servidor e os clientes SCADA, utilizando o protocolo de comunicação TCP/IP.

4.2.3. Diagrama Caso de Uso dos requisitos não funcionais

A segunda parte do diagrama Caso de Uso da Figura 35 destaca apenas os requisitos não funcionais, descrevendo sua influência direta na qualidade e na credibilidade do sistema, conotando assim sua importância. Tais requisitos são apresentados na Figura 37 a seguir.

Figura 37 - Diagrama Caso de Uso dos requisitos não funcionais do supervisório

Interoperabilidade: Está relacionada à capacidade de interação entre sistemas. É uma propriedade que recebe ênfase cada vez maior, devido ao nível de automação que atualmente é empregado em diversos segmentos. Os aplicativos SCADA interagem com sistemas de gestão (FAVARETTO, 2001).

Dessa forma em um sistema supervisório que permite a interação com outras aplicações, disponibilizando uma interface que pode ser acessada através de uma rede de comunicação, em especial para o robô agrícola, seu sistema SCADA deve ter suporte para lidar com uma gama variada de plataformas de *Hardware* e *Software* utilizados pelo FMIS.

Portabilidade: É a capacidade que um sistema tem de adaptação e execução de tarefas, para qual ele foi desenvolvido, em diferentes ambientes de *Hardware* e *Software* (GHEZZI; JAZAYERI; MANDRIOLI, 2002). Para o modelo de sistema supervisório proposto para o

Agribot, o programa foi implementado em C++ o que permite a portabilidade da camada supervisória, desde que a parte de controle do sistema utilize o protocolo de comunicação CAN, assim é possível reduzir a dependência de uma plataforma específica de *Hardware* ou *Software*, possibilitando maior liberdade de escolha de fornecedores, é um fator importante, devido ao fato que a robótica agrícola nacional, ainda está em processo de pesquisa e desenvolvimento.

Escalonabilidade: Em uma arquitetura de *Software* a escalonabilidade está relacionada com capacidade que o sistema possui de suportar um grande número de equipamentos e/ou as interações que ocorrem entre eles (FIELDING, 2000). Os aplicativos SCADA que possuem esse requisito demonstram flexibilidade ao serem utilizados em diferentes contextos.

Também vale ressaltar que a escalonabilidade é de extrema importância para uma aplicação com características tão diversificadas como a encontrada no setor agrícola. Um sistema supervisor para a robótica desse segmento tem que estar preparado para uma possível expansão dos equipamentos, os quais serão agregados ao robô de acordo com a função ou missão que lhe for estabelecida. Para o Agribot, o projeto prevê a instalação de módulos complementares como, por exemplo, braço robótico e visão computacional.

Confiabilidade: É a capacidade que um sistema possui de se manter operacional mesmo após a ocorrência de falhas em algum componente (PERRY; WOLF, 1992). A confiabilidade é um fator importante a ser considerado em um sistema supervisor de um robô agrícola móvel, devido a inúmeros fatores como, por exemplo, o fato de trabalhar no campo em ambientes não estruturados e dinâmicos e, grande parte das aplicações agrícolas desenvolvidas por robôs serem desempenhadas distantes do equipamento em uma sala de controle operacional.

Mecanismos de redundância e tolerância a falhas devem ser implementados em um sistema supervisor agrícola. Dessa forma, uma arquitetura de software para esse tipo de aplicação deve admitir tais mecanismos, aumentando assim a confiabilidade do SCADA (URDANETA et al., 2007).

Tempo-Real: Sistemas operacionais de tempo-real são aqueles onde os aspectos temporais do seu comportamento fazem parte de sua especificação. São sistemas destinados a execuções de múltiplas tarefas com um tempo predefinido de resposta a um evento, seja ele de natureza interna ou externa. Alguns equipamentos controlados através de um sistema SCADA podem possuir necessidades de interação em tempo-real, por exemplo, um robô móvel que tem as

funcionalidades do seu supervisor associadas à visualização da informação pelo operador e sua ação correspondente, possui os seus prazos de entrega de mensagens na casa dos milissegundos.

4.2.4. Diagrama de Sequência do sistema supervisor do Agribot

Com o modelo SCADA para o robô já definido e conhecendo os seus requisitos funcionais e não funcionais, que foram identificados e apresentados com o auxílio dos diagramas de casos de uso, detalhados no início deste capítulo, deu-se continuidade ao trabalho utilizando diagramas de interação na modelagem dos fluxos de controle por ordenação temporal.

Foram utilizados os diagramas de Sequências, os quais dão ênfase ao fluxo de mensagens transmitidas com o passar do tempo, o que é uma forma particular e útil de visualizar o comportamento dinâmico no contexto do cenário de caso de uso (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006). O diagrama de Sequência demonstra a interação existente entre o modelo do sistema supervisor e os subsistemas de controle presentes no Agribot e as mensagens trocadas entre eles. Através dele é possível observar em um primeiro momento antes de inicializar o robô, que o supervisor realiza a atualização dos dados relacionados aos seus subsistemas com suas respectivas controladoras.

Tal procedimento é realizado pelo sistema SCADA, o qual envia um comando para o módulo de controle (Sauer Danfoss) que executa a função de mestre no modelo proposto. Esse converte as mensagens quando necessário e as direciona para os demais módulos de controle, que nessa configuração trabalham como escravos, como podem ser visto no diagrama de Sequência apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Diagrama de Sequência Agribot / Supervisório

Os dados trocados entre os módulos de controle são utilizados na atualização dos requisitos funcionais do sistema supervisório e disponibilizados para o usuário, que com o

auxílio de sinóticos animados, tabelas e gráficos, pode verificar e comparar com os parâmetros preestabelecidos e fazer uma análise operacional sobre condições de funcionamento que o equipamento se encontra. Para tal são apresentadas informações básicas sobre as condições momentâneas do robô como, por exemplo, temperatura do motor, nível de combustível, carga referente ao banco de baterias, entre outros.

A partir da primeira verificação, se estiver dentro das condições de funcionamento o robô é liberado para entrar em operação. Como mostrado no diagrama de sequência, o operador envia, através do supervisor, um comando para o módulo (Sauer Danfoss) que de acordo com a ação desejada, executa o comando ou direciona a mensagem para que os módulos (Bosch ou Cummins) a executem e retornem os dados provenientes dos seus respectivos sensores.

Os dados referentes a cada módulo de controle são enviados para o sistema supervisor, que os utiliza na atualização de seus instrumentos virtuais (tela principal, Figura 56), fornecendo informações em tempo real do equipamento para o operador, como a posição atual das rodas em graus, a velocidade de deslocamento em metros por segundo, a rotação do motor Diesel em RPM, entre outras.

4.2.5. Diagrama de Atividades do sistema supervisor do Agribot

O diagrama de atividades é um diagrama UML utilizado para modelagem dos aspectos dinâmicos de um sistema. Esse tipo de diagrama modela uma atividade de qualquer tipo de abstração, como uma sequência estruturada de ações, as quais são potencialmente controladas por nós de decisão e sincronismo. A utilização dele para elaboração de um fluxograma da operação do robô através de um sistema supervisor se mostra bastante eficiente devido a sua complexidade e a dificuldade de compreensão apenas quanto à observação de seu código. Outro fator não menos relevante na escolha do diagrama é o fato de que, a partir de um modelo desenvolvido por ele, é possível criar um código em qualquer linguagem de programação. Na Figura 39 é apresentado o diagrama de Atividades do modelo supervisor proposto para o Agribot.

Figura 39 - Diagrama de Atividades Usuário / Supervisório

A utilização do diagrama de atividades facilita o entendimento da interação existente entre o usuário e o sistema de supervisão. Através dele é possível descrever uma ação executada pelo supervisor, após receber um comando do operador.

Os comandos disponibilizados pelo supervisor para o operador seguem uma sequência e só é permitido ao usuário passar de um estágio para outro se as condições estabelecidas pelo sistema forem satisfeitas.

Por exemplo, a partida do motor diesel só é autorizada depois que o operador inicializa o robô e o supervisor verifica os status das controladoras e os dados dos sensores. A partir dessas informações o sistema atualiza a interface e se estiver adequada, libera a partida. Caso contrário, sinaliza falha e aguarda uma ação corretiva. A indicação de falha gera um alarme que contém data e hora e localização, criando assim um banco de dados referente ao robô. Com ele em funcionamento, cabe ao usuário a escolha do modo de operação, que pode ser manual ou automático, definido o modo pelo operador, o sistema supervisor executa uma das rotinas de operação descritas abaixo.

Rotina Automática: Uma vez determinado o modo automático, abre-se uma nova janela, onde se tem a possibilidade de programar o robô utilizando o método de programação ponto a ponto, sendo possível determinar as coordenadas e a velocidade de locomoção a partir de um ponto inicial.

Neste modo de operação a idéia é criar uma rotina, na qual o robô se movimenta em linha reta, seguindo os pontos previamente determinados e para alterar a sua direção, o robô para e gira em torno do seu próprio eixo, sempre utilizando para o giro ângulos de 90°. Na mesma janela, pode-se chamar uma rotina de navegação que será desenvolvida por outro grupo de trabalho.

Rotina Manual: No modo manual assim como no automático, abre-se uma nova janela, onde se tem a possibilidade de escolher a operação por teclado ou joystick. Este modo é utilizado para movimentação do robô. Partindo do princípio que o Agribot possui um diferencial hidráulico, fica faltando estabelecer a diferença entre os ângulos de esterçamento das rodas. Para isso foi utilizado como referência um algoritmo da geometria de Ackermann que pode ser encontrado em Torres (TORRES et al., 2012).

Neste modo de operação a idéia é criar uma rotina, na qual o robô se movimenta de forma simples, porém eficiente, facilitando o transporte e o posicionamento para início da rotina estabelecida para o modo automático.

A outra opção da janela manual está voltada para manutenção e testes. Uma vez feita a escolha desse modo, o responsável pela operação passa ter acesso a todas as válvulas e atuadores do robô, possibilitando alterar qualquer valor da variável e movimentar individualmente os atuadores.

Após definir o modo de operação manual joystick/teclado ou automático, o robô é referenciado. Para tal as rodas são posicionadas em 0°, é feita uma nova leitura dos sensores, atualizando o painel principal e, se estiver adequado, libera o robô para entrar em operação, caso contrário, sinaliza falha e retorna para escolha do modo de funcionamento.

Com o Agribot em funcionamento executando a rotina estabelecida anteriormente, segue o monitoramento dos sensores, dos módulos de controle e a atualização dos instrumentos. Após cada ciclo de varredura do sistema, se não houver falhas, ocorre a atualização dos instrumentos, e quando esta existir, a mesma é analisada e separa segundo o grau de prioridade definido.

Se a falha for considerada crítica para o robô, este para e desliga imediatamente, sinalizando a falha e retornando ao início. Caso a falha não seja crítica será sinalizada pelo supervisor e o robô continuará em operação, retornando informações do processo em tempo real para o usuário através de um painel principal.

Uma vez definido o modelo supervisor, o trabalho tem sequência apresentando no próximo capítulo os resultados experimentais obtidos, juntamente com os testes realizados e as adequações feitas para o aperfeiçoamento do robô agrícola móvel, Agribot.

5. Resultados Experimentais

No Agribot, como em qualquer outro equipamento a ser supervisionado, existe a necessidade de ter um conhecimento detalhado sobre seu funcionamento, já que nele será implantado o sistema supervisório. Dessa forma, conhecer o funcionamento do Agribot, identificar cada componente hidráulico ou/e eletro-hidráulico, entender seu funcionamento e as variáveis nele empregadas, se torna um fator essencial para definir um bom desempenho do modelo supervisório proposto para o Agribot.

Conforme citado no início do capítulo anterior, o estudo da plataforma robótica demonstrou que a mesma possuía as características e os elementos fundamentais para o desenvolvimento de um sistema supervisório, porém com a necessidade de um maior detalhamento sobre comportamento do sistema hidráulico, elétrico e de controle. Nesse capítulo, primeiramente é apresentada uma arquitetura do Agribot e o formato das mensagens trocadas via CAN, entre o supervisório e os módulos de controle.

O capítulo se encerra com a abordagem do sistema de controle empregado no robô e com os testes e resultados, os quais são apresentados em conjunto com o modelo cinemático e ambos utilizados para validar o sistema supervisório proposto.

5.1. Arquitetura e Mensagens do Agribot

O Agribot possui três controladoras uma (Cummins) dedicada somente ao controle do motor diesel, uma (Bosch) que está destinada a controlar as bombas da propulsão do robô e um módulo de controle (Sauer Danfoss) MC050-010, o qual controla o sistema de guiagem, tendo conexão direta com os potenciômetros (sensores de esterçamento) e com os solenóides das válvulas proporcionais do sistema hidráulico responsáveis pelo esterçamento. Os sinais provenientes dos potenciômetros, os quais indicam a posição e a velocidade de deslocamento de cada roda, são enviados para a controladora onde são processados e organizados de forma que possam ser parte do frame exigido pelo protocolo CAN, e assim disponibiliza os dados no barramento.

O MC050-010 ainda realiza o processo inverso, recebendo os dados de comando gerados pelo computador ou pela IHM, e os convertendo em sinais PWM, os quais são utilizados para atuar através dos solenóides das válvulas proporcionais do sistema de esterçamento. O módulo da Sauer Danfoss também disponibiliza no barramento CAN J1939 as informações necessárias para que, o módulo de controle do motor diesel Cummins, possa operar de acordo com as necessidades impostas pelo sistema hidráulico. Por sua vez, o controle de propulsão é realizado de forma direta pelo controlador da Bosch, o qual é uma solução proprietária, fornecida pela empresa Bosch Rexroth.

O gerenciamento das mensagens enviadas e recebidas pelos módulos de controle se dá através de um computador industrial embarcado no Agribot, sendo a comunicação entre eles estabelecida por meio de uma interface USB – CAN, que direciona as palavras de controle ao barramento CAN com destino aos respectivos solenóides, passando primeiro pelo controlador MC050-010, que segundo a mensagem recebida pelo barramento CAN, gera os sinais de PWM necessários para atuar os solenóides, que por sua vez, atuarão as eletro-válvulas do sistema hidráulico de esterçamento ou de propulsão.

Cabe destacar que a controladora MC050-010 não é responsável pelo controle do Agribot. Tal controle é realizado através de um computador que atualmente utiliza um programa desenvolvido em linguagem de programação C++ para o controle de baixo nível. Dentro do conceito de sistemas de supervisão, a controladora da Sauer Danfoss exerce a função de mestre e tem o PC como servidor SCADA e as demais controladoras como escravos. Para melhor ilustrar esse conceito, uma arquitetura supervisória que considera como modelo de referência o Agribot, é apresentada na Figura 40.

Figura 40 - Arquitetura do Agribot (TORRES et al., 2013)

A transmissão de dados entre o MC050-010 e o PC se realiza através de um protocolo CAN, seguindo um padrão de endereçamento e ações que foram estabelecidas pela empresa Jacto, a qual foi responsável pela construção mecânica e elétrica e também desenvolveu um programa básico no MC050-010, deixando o robô em condição de operação para realizar o transporte até o laboratório NEPAS na EESC-USP.

Basicamente a programação é utilizada para acionar os atuadores e receber informações provenientes dos sensores, que posteriormente são enviados ao PC. As mensagens trocadas através do protocolo CAN, seguem um padrão de identificação para as variáveis, um exemplo de mensagem fornecido para o computador pelo módulo de controle da Sauer Danfoss pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 - Exemplo de dados via mensagem CAN fornecidos pelo MC050-010.

ID	Repetição	Byte	Bit	Comentário	Faixa de valores
0F000002	1s	0		Volume de combustível	0 a 100
		1		Temperatura do líquido de arrefecimento	0 a 250
		2,3		Pressão do óleo do motor	0 a 100
		4,5		Consumo instantâneo de combustível	0 a 32127
		6,7		Tensão de alimentação do módulo Cummins	0 a 32125

Um formato de mensagens que são trocadas pelo barramento CAN, como o apresentado na Tabela 6, é composto por um ID (*Identification Data*) no caso do exemplo 0F000002, que possui uma repetibilidade de 1s. O byte 0 disponibiliza os dados referentes à variação do volume de combustível, que trabalha em uma faixa de 0 a 100 (valores digitais), sendo as informações transmitidas pelo controlador MC050-010 para o PC.

Utiliza-se uma interface CAN–USB (National Instruments, modelo NI USB-8473), que recebe os dados do barramento CAN e os transmite para o computador via USB, onde um programa desenvolvido em C++ desempacota os frames e os converte em variáveis estruturadas disponibilizando as mesmas para o desenvolvimento de um aplicativo, como por exemplo, um sistema supervisório. Cada mensagem CAN possui sua identificação, tempo de repetição e uma variável física associada. Por sua vez, as estruturas de dados em C++ só apresentam a variável estruturada e um comentário indicando sua funcionalidade. Um exemplo dessa estrutura pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 - Exemplos de dados estruturados em C++.

Variável	Descrição
uFuelLevel	Nível de Combustível no Tanque de 0% a 100%
iTemperature	Temperatura do Motor em Graus Celsius de (-40 a 210)
bOilPressureWarning	Indicador de pressão do óleo do motor (alto/baixo)
bStopLamp	Indicador de parada do motor (on/off)
bTemperatureWarning	Indica temperatura excessiva (acima de 110°)
bWarningLamp	Indica que esta em funcionamento
uOilPressure	Indica pressão do óleo do motor em kPa (0 a 100)
uFuelConsumption	Indica consumo de combustível instantâneo em ml/h (0 a 32127)
uHours	Indica horas trabalhadas do motor (em minutos)
uRealRPM	Indica RPM real de (0 a 8031 rpm)
bOnline	Se verdadeiro IHM online
uBatteryVoltage	Indica Tensão da Bateria em mV (0 a 36000)

O programa atual utilizado para operação e supervisão do Agribot foi desenvolvido com o IDE (Ambiente Integrado de Desenvolvimento) Borland C++. Esse programa faz a identificação das variáveis e as classifica, separando-as em: erros, sinais de controle e sinais de retorno dos sensores. Posteriormente essas variáveis são utilizadas pelo supervisor para disponibilizar informações ao usuário sobre a condição operacional do Agribot.

Um exemplo de mensagens trocadas entre os módulos de controle de guiagem e propulsão e o sistema supervisor pode se visto na Figura 41, a qual apresenta uma tela do programa implementado em C++ para o controle de baixo nível, contendo a configuração da comunicação CAN, os intervalos das mensagens recebidas e, também mostra uma lista de mensagens contendo a hora e uma descrição, a qual posteriormente pode ser utilizada pelo sistema supervisor para alimentar seu banco de dados.

Figura 41 - Histórico de mensagens trocadas entre o computador e os módulos de controle

5.2. Controle e modelo cinemático utilizados pelo Agribot

O desenvolvimento do projeto de controle para o Agribot contemplou um estágio de testes do sistema (concluído), um controle do sistema programado em C++, a sincronização das rodas e a implementação dos modelos de esterçamento. A princípio foram realizados testes utilizando um algoritmo de controle que já estava presente no robô, o qual foi desenvolvido em Labview e após analisar seu comportamento, o presente trabalho desenvolveu um novo algoritmo, dessa vez proporcional ao erro.

Em um segundo momento foi gerado um novo programa desenvolvido em C++, sendo o mesmo programado no NEPAS pelo técnico de laboratório Dr. Alexandre José Tiberti. Nesse programa foram implementados dois novos algoritmos de controle: o primeiro foi um algoritmo de controle proporcional (P), o qual foi testado e seus resultados serviram de base para gerar um segundo algoritmo de controle, dessa vez um proporcional derivativo (PD).

Segundo testes realizados, esse último algoritmo apresentou um bom desempenho e um resultado satisfatório em seu comportamento durante a realização de manobras, dando a opção de alterar parâmetros para estabelecer um controle confiável de velocidade de esterçamento das rodas.

5.2.1. Algoritmo de controle Labview

O primeiro algoritmo testado corresponde ao algoritmo apresentado por Tangerino (TANGERINO et al., 2011) o qual é apresentado de maneira resumida na Figura 42. O algoritmo propõe um erro tolerado e atua na velocidade de esterçamento alterando o PWM, incrementando ou decrementando em cada loop de controle, até atingir a posição angular desejada das rodas do Agribot. Esse algoritmo foi programado em Labview e testado no robô, procurando manter constante a variável do atrito. Os resultados do experimento realizado, o qual utiliza como referência um "setpoint" de 15 graus na roda dianteira esquerda, são apresentados na Figura 43.

Figura 42 - Diagrama de fluxo para controle de esterçamento (TANGERINO et al. 2011)

Figura 43 - Resultados para o esterçamento da roda DE (TANGERINO et al., 2011)

Após a realização de testes no laboratório do NEPAS, utilizando o algoritmo implementado por Tangerino (TANGERINO et al., 2011) foi proposto uma nova versão. O novo algoritmo para controle de esterçamento desenvolvido para Labview teve como objetivo melhorar o tempo de resposta, e envolve as equações de (25) a (27) apresentadas a seguir.

$$\bar{u} = K(e_{\theta}(t)) \left[\frac{(\theta_{t+1} - \theta_t)}{\Delta t} \right]_d \quad (25)$$

$$K(e_{\theta}(t)) = \begin{cases} 1 & \forall e_{\theta} \neq 0 \\ 0 & \forall e_{\theta} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$e_{\theta} = \theta_d - \theta_r(t) \quad (27)$$

O ganho $K(e_{\theta}(t))$ é em função do erro de angulação e_{θ} sendo ele a diferença entre a posição desejada θ_d e a posição real $\theta_r(t)$. O novo algoritmo de controle proposto é proporcional, inicialmente com ganho um. Segundo a lei de controle $\bar{u}$ da equação (25), para obter a resposta em malha fechada, as funções jacobiana $J(u)$ e da função de transferência do potenciômetro $F(\#pot)$ são responsáveis por transformar a posição determinada pelo usuário

no espaço coordenado do robô. O diagrama de blocos do algoritmo é apresentado na Figura 44.

Figura 44 - Diagrama de blocos do controle em Labview

O controle implementado apresentou uma resposta rápida de aproximadamente quatro segundos, partindo de uma posição inicial de zero grau até alcançar o setpoint estabelecido em 90 graus. Porém, durante os testes, o controle não conseguiu estabilizar a roda no setpoint desejado e ficou oscilando com uma amplitude aproximada de mais o menos cinco graus. O resultado do teste do algoritmo é apresentado na forma de gráfico na Figura 45.

Figura 45 - Resposta com o algoritmo proposto para o Labview

Como pode ser visto no gráfico anterior, o algoritmo apresentou uma resposta aceitável, mas apesar de obter uma boa resposta em relação ao tempo de deslocamento em

graus da roda, ainda apresenta oscilações que não foram atenuadas em função do tempo, além de apresentarem um caráter aleatório, o que indica a existência de um problema, o qual pode ser atribuído à instabilidade no tempo de amostragem. Tentou-se controlar o tempo utilizando Labview, porém sem sucesso, partindo-se então para a utilização do algoritmo no programa desenvolvido em linguagem de programação C++, o qual já vinha sendo implementado em paralelo aos testes realizados com o Labview. Os algoritmos de controle em C++, os testes e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.2.2. Algoritmo de controle para C++

O algoritmo de controle utilizado no programa em C++, a exemplo do anterior, também é proporcional e foi implementado no Agribot com o auxílio do técnico de laboratório do NEPAS Alexandre Tiberti, o qual desenvolveu o programa com o apoio da equipe responsável pelo módulo de guiagem e com base nas informações levantadas no presente trabalho. A nova programação utilizada tem como uma de suas principais características a capacidade de controlar o tempo de leitura das mensagens via CAN, podendo assim diminuir o tempo de amostragem e consequentemente suprir a deficiência encontrada em Labview, fator essencial para estabilidade do sistema de controle. O novo algoritmo de controle implementado possui as seguintes equações, sendo a nova lei de controle apresentada nas equações (28) e (29).

$$\bar{u} = \beta_d + K(\beta_d - \beta_r) \quad (28)$$

$$\dot{\beta}(\bar{u}) = \begin{cases} \dot{\beta}_d & \forall \bar{u} \neq \beta_d \\ 0 & \forall \bar{u} = \beta_d \end{cases} \quad (29)$$

A lei de controle é proporcional ao erro da posição angular das rodas e quando chega ao beta desejado a velocidade de esterçamento é zero. Para ilustrar e facilitar o entendimento a seguir, na Figura 46, é apresentado o diagrama de fluxo do controle proporcional que foi utilizado com base para programação em C++.

Figura 46 - Diagrama de fluxo de controle implementado em C++

Para a realização dos testes, se incluiu também uma faixa de erro admissível no algoritmo de controle, buscando considerar o erro de quantificação, uma vez que o sistema de guiagem possui folgas mecânicas. Como resultado do experimento foi possível verificar, que a resposta do sistema melhorou, partindo de zero grau e alcançando o *setpoint* estabelecido em 90 graus, no tempo aproximado de três segundos com um sobre sinal de cinco graus, o qual o controle corrigiu aos sete segundos, estabilizando o sistema com erro de estado

estacionário de dois graus. Os resultados obtidos são apresentados na forma de gráfico na Figura 47.

Figura 47 - Resposta do algoritmo de controle implementado em C++

Analizando o comportamento do sistema durante os testes realizados e considerando a resposta anterior com o intuito de corrigir o erro, foi preciso melhorar o sistema de controle incluindo um novo algoritmo de controle. Dessa vez foi utilizado um proporcional derivativo (PD). Para esse controlador também foi considerado o erro gerado pela velocidade da comunicação do CAN entre a controladora (Sauer Danfoss) e o PC, já que o programa envia as informações com uma taxa definida em 30 milissegundos, limitando assim o tempo das mensagens enviadas por meio do barramento CAN.

Para a análise da influência causada pelo atraso na mensagem no controle de esterçamento, foi gerada uma tabela, na qual foram feitos testes com dois diferentes valores PWM, alterando dessa forma a velocidade de esterçamento. Sabendo que o valor do erro é proporcional ao aumento de velocidade, para o teste foram utilizados dois percentuais de PWM: 40% e 100%. O resultado que demonstra a amplitude do erro para o mesmo delta do ângulo como referencia, é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Erro ocasionado pelo atraso no envio de mensagens via CAN

PWM	Delta teta	Tempo	%/seg.	Tempo CAN	Erro de ângulo no tempo CAN
40%	266	7	38	0,03	1,14
100%	266	2	133	0,03	3,99

Por meio da tabela 8 é possível observar que o erro ocasionado pelo atraso no envio de mensagens sofre uma grande variação e também é inversamente proporcional ao tempo de esterçamento. Com base nos resultados da Tabela 8, e nos testes realizados foi proposto um novo algoritmo de controle, cujas equações são mostradas a seguir.

$$\bar{u} = \beta_d + K_p(\beta_d - \beta_r) + K_d \frac{de_\beta}{dt} \quad (30)$$

$$\dot{\beta}(\bar{u}) = \begin{cases} \dot{\beta}_d \forall \bar{u} \neq \beta_d \pm e_{\beta a} \\ 0 \forall \bar{u} = \beta_d \pm e_{\beta a} \end{cases} \quad (31)$$

A lei de controle é um algoritmo PD modificado, onde a saída do controlador depende da posição desejada, da mudança do erro com o passar do tempo e do erro admissível devido ao incremento do ângulo dentro do período previsto para o envio de mensagens $e_{\beta a}$, o qual varia segundo a velocidade do esterçamento desejado. O algoritmo procura diminuir o erro de estado estacionário com a inclusão do erro ocasionado pelo tempo de envio das mensagens. O diagrama de blocos do algoritmo PD é apresentado na Figura 48.

Figura 48 - Diagrama de blocos do controle PD implementado em C++

O algoritmo foi implementado no Agribot e segundo os testes realizados, com o robô suspenso e em contato com o solo, foram obtidos resultados satisfatórios quando aplicado um degrau de 90 graus. Nesse caso o sistema se mostrou confiável, apresentando uma resposta rápida como uma pequena variação dentro da faixa de erro prevista, a qual foi definida segundo a velocidade de esterçamento, conseguindo estabilizar no *setpoint* desejado após um período de sete segundos a partir do comando. O resultado é apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Resposta do controle PD

Um segundo teste foi realizado dessa vez determinando um degrau de 45 graus e depois do sistema estabilizado retornando para zero grau. O resultado é apresentado na Figura 50.

Figura 50 - Resposta do sistema para 45 e 0 graus

O sistema respondeu de forma adequada obtendo um tempo de resposta de 2,5 segundos para mudanças de 45 graus se mantendo estável. Como os resultados dos testes obtidos ficaram dentro do previsto, o algoritmo de controle foi replicado para as outras rodas do sistema de guiagem do Agribot. Uma tela desse controle de baixo nível programado no Agribot, a qual o modelo do sistema supervisor indica para ser utilizada na manutenção é apresentada na Figura 51.

Figura 51 - Tela para controle de baixo nível do Agribot.

Uma vez definido o sistema de controle a ser utilizado, foram realizados testes buscando o sincronismo das rodas durante o esterçamento. Também foram definidos os limites de esterçamento do Agribot, para uso nos algoritmos de controle de baixo nível, onde respectivamente as rodas são representadas da seguinte forma: DE= dianteira esquerda; DD= dianteira direita; TE= traseira esquerda e TD= traseira direita. Os limites e os ângulos de esterçamento são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Limites de esterçamento do Agribot

Roda	Posições possíveis a partir de 0°		Ângulo total de Esterçamento
DE	-147°	114°	261°
DD	-109°	152°	261°
TE	-109°	152°	261°
TD	-147°	114°	261°

Outro fator importante estabelecido com base nos testes realizados foi a velocidade de esterçamento das rodas, a qual varia de acordo com o número de rodas que estão sendo esterçadas de forma simultânea. A Tabela 10 a seguir lista os intervalos confiáveis para se obter um bom resultado, o qual mantém a mesma velocidade de giro das rodas ao esterçarem simultaneamente. Essas velocidades possuem um valor mínimo inicial igual para todos os modos de esterçamento podendo variar seus valores máximos de acordo com o número de rodas esterçadas ao mesmo tempo.

Tabela 10 - Velocidade angular de esterçamento das rodas do Agribot

Rodas	Velocidade Angular Mínima e Máxima (graus / segundos)	
Unitária	5°/s	90°/s
Aos pares	5°/s	75°/s
As quatro	5°/s	45°/s

Através dos testes, pode ser observado que as rodas ao serem posicionadas apresentam um erro com variação que é proporcional à velocidade estimada, sendo de 0,5° na mínima e chegando até 5° de erro para velocidades de esterçamento acima de 30°/s. Para amenizar essa condição, uma solução encontrada foi à implementação de uma rampa de desaceleração no algoritmo de controle de baixo nível da guiagem, garantindo assim o esterçamento simultâneo das rodas com uma margem de erro máxima de posicionamento de um grau.

Com um sistema de controle testado e confiável, o presente trabalho define a seguir, os modos de guiagem utilizados pelo sistema supervisor do Agribot, os quais utilizam como base a geometria de Ackermann.

5.2.3. Modelos de esterçamento utilizados pelo sistema supervisor do Agribot

Uma vez implementado o controle de esterçamento das rodas é preciso desenvolver um modelo para a sincronização das mesmas, cuja finalidade é esterçar o Agribot através do sistema supervisor seguindo uma trajetória específica ou uma missão desejada como, por

exemplo, sair de um determinado ponto, executar uma missão como aplicar um defensivo agrícola e retornar a seu ponto de origem.

Nesse contexto, para o sistema supervisorio do Agribot foram propostos quatro modos básicos de esterçamento, sendo eles sucessivamente desenvolvidos a partir da geometria Ackermann, a qual foi expandida para a adequação do modo de esterçamento coordenado. O presente trabalho utiliza para o desenvolvimento dos dois primeiros modos de guiagem, basicamente as mesmas equações cinemáticas empregadas na plataforma robótica RAM, que estão disponíveis em Torres (TORRES et al, 2012), e foram apresentadas no capítulo 3.

Também com o intuito de padronizar os desenhos referentes aos modelos cinemáticos que representam cada um dos modos de guiagem utilizados pelo sistema supervisorio do Agribot, foi definido que as linhas da cor azul representadas por (β_0 e β_1) correspondem às rodas esquerdas, e as vermelhas representadas por (α_0 e α_1) às rodas direitas. Além do diferencial gerado pelas cores, ainda serão empregados dois tipos de linhas sendo que as tracejadas representarão as rodas traseiras e as contínuas as rodas dianteiras.

A seguir são apresentados os quatro modos de guiagem propostos para o sistema supervisorio do Agribot.

1. Um primeiro modelo utilizando a geometria Ackermann clássica esterçando duas rodas, sejam elas dianteiras ou invertendo os sinais para esterçar as traseiras;
2. Um segundo modelo cinemático realiza as manobras esterçando as quatro rodas simultaneamente estabelecendo um esterçamento coordenado;
3. Um terceiro modelo conhecido como caranguejo, o qual possibilita a movimentação do robô de forma lateral e diagonal.
4. Um quarto modelo empregado para realizar manobras em espaços reduzidos, rotacionando o robô em seu próprio centro geométrico;
5. O painel ainda conta com um botão de parada e um específico para alinhar as rodas.

O primeiro modo de esterçamento foi pensado para executar manobras em curvas com raio maior e realizar pequenos ajustes de trajetórias durante a operação no campo, uma vez que a velocidade de esterçamento das rodas aos pares chega a ser até 60% maior do que em grupo de quatro rodas. Esse modo utiliza o modelo clássico da geometria de Ackermann e tem como referência o centro geométrico do Agribot para determinar o raio de curvatura durante a execução de uma manobra.

Entre os fatores determinantes para escolha desse modelo está a velocidade de operação, que é relativamente baixa, a facilidade de implementação das equações matemáticas e a possibilidade da escolha de um ponto de referência central. Com isso, uma vez determinados os ângulos de esterçamento das rodas em relação ao raio da curva, os mesmos podem ser utilizados pelo programa para esterçar tanto as rodas dianteiras como as traseiras do robô, apenas alternando os sinais referentes aos ângulos das rodas estabelecidos pelo modelo de Ackermann. Uma vista simplificada do primeiro modo de esterçamento do Agribot é mostrada na Figura 52.

Figura 52 - Modelo de Ackermann do Agribot

O segundo modo de esterçamento definido para o sistema supervisor do Agribot tem uma desvantagem em relação à velocidade de esterçamento quando comparado ao primeiro, porém, emprega um modelo cinemático que realiza o movimento simultâneo e coordenado das rodas, dando maior manobrabilidade ao robô durante sua operação, o que facilita a realização de manobras de cabeceira em plantações. Como no exemplo anterior, esse modelo também está baseado na geometria de Ackermann. Nesse caso o robô percorre uma trajetória curva segundo um raio de giro desejado, com um ponto central de rotação localizado na linha

imaginária do centro geométrico do robô, formando um ângulo de 90 graus com a lateral, como pode ser visto na Figura 53.

Figura 53 - Modelo cinemático para esterçamento das quatro rodas do Agribot

Utilizando as equações do modelo da geometria de Ackermann foi realizada uma simulação com o *Software Matlab*, para o modo de esterçamento coordenado e os resultados são apresentados na Figura 54.

Figura 54 - Resultados da simulação cinemática para o Agribot

Com base nos resultados das simulações e dos testes realizados no Agribot, foi possível determinar um raio mínimo de curvatura para realização de manobras, o qual ficou estabelecido em dois metros. Também possibilitou estimar valores em graus para o esterçamento de cada uma das rodas de acordo com o raio da curva, determinando assim os limites para realizar manobras sejam elas de locomoção ou de cabeceira durante a operação. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados de esterçamento para o Agribot

R[m]	DD= α Alpha0	TD= α Alpha1	DE= β Beta0	TE= β Beta1
2	61,927	-61,927	25,1148	-25,1148
3	39,805	-39,805	19,653	-19,653
4	28,178	-28,178	16,09	-16,09
5	21,541	-21,541	13,6	-13,6
6	17,354	-17,354	11,768	-11,768
7	14,5	-14,5	10,366	-10,366
8	12,439	-12,439	9,26	-9,26

O terceiro modo de esterçamento do sistema supervisor do Agribot não está baseado na geometria de Ackermann, ele é conhecido como caranguejo, sendo o mesmo empregado na execução de movimentos diagonais e laterais do robô. O modelo pode ser utilizado no posicionamento e no desvio de obstáculos. Para tal o usuário seleciona o modo de

esterçamento e determina o valor de um ângulo, o qual é usado pelo supervisor para posicionar as quatro rodas em paralelo, um exemplo pode ser visto na Figura 55.

Figura 55 - Modo de direção paralela do Agribot para um ângulo de 90°

Assim como no modo anterior, o quarto modelo de esterçamento do supervisor do Agribot, o qual tem a função de girar em seu próprio centro geométrico, também não está fundamentado em Ackermann, sendo ele utilizado para manobras em espaços reduzidos como, por exemplo, cabeceiras de alguns tipos de culturas. O modelo possui ângulos fixos que foram definidos através de cálculos geométricos simples e posteriormente implementados e testados no Agribot. Os valores dos ângulos referentes a cada roda podem ser vistos na Tabela 12.

Tabela 12 - Posição das rodas em graus para que o Agribot gire em seu próprio eixo

Rodas	Posições a partir de 0°
DE	51
DD	129
TE	-51
TD	-129

Com a definição dos valores o usuário pode selecionar o modo de guiagem através do supervisor e determinar o sentido de giro do robô utilizando os comandos de propulsão frente para girar no sentido horário e ré no anti-horário. A configuração desse modo de guiagem pode ser vista na Figura 56.

Figura 56 - Modo de guiagem para o Agribot girar em seu próprio eixo

Para essa configuração de esterçamento durante os testes realizados no Agribot, foi possível estimar o tempo gasto pelo robô para sair de 0° e chegar a 90° . Fator importante a ser considerado devido a ausência de um GPS; para estimativa foi utilizado como base o diâmetro da roda, que é aproximadamente 108 cm e o raio formado pelo centro geométrico do robô e sua roda. Com isso, ao girar, o Agribot descreve uma circunferência com diâmetro igual à 747.69990 cm, ficando definido que para o robô girar em torno do seu próprio eixo 90° a uma velocidade de 10 RPM, ele gasta um tempo aproximado de 3.30 s.

5.2.1. Painel principal e teste de validação do supervisor

O painel principal foi gerado em C++ BUILDER utilizando as bibliotecas do programa de controle de baixo nível e com base nos requisitos do modelo de sistema supervisorio proposto no capítulo 4, tendo como característica principal a facilidade de leitura dos instrumentos e a operação pelo usuário. A interface basicamente possui duas funções sendo elas: a de supervisão e a de controle, as quais são detalhadas a seguir e um exemplo do código e da utilização da biblioteca é mostrado no Anexo I.

Supervisão: Os modos de supervisão estão divididos em cinco na tela principal. O “*status do sistema*” possui uma característica mais operacional apresentando informações gerais sobre o funcionamento do Agribot como, por exemplo, nível de combustível, temperatura do motor, horas trabalhadas, alertas como falha no banco baterias, partida liberada, entre outros.

Os outros quatro modos de supervisão da tela principal estão relacionados aos módulos de controle sendo composto pelo “*status dos módulos*” que indica se eles estão ou não *online* e os individuais “*status Bosch*”, “*status Cummins*” e “*status Sauer-Danfoss*”, os quais possuem uma característica mais técnica e apresentam informações ao usuário, como por exemplo, tensão de entrada no módulo, leitura de encoder e se existem falhas na propulsão ou no esterçamento, entre outros.

Controle: O modo de controle que o sistema supervisorio possui em sua tela principal pode ser dividido em três. O “*controle do motor*” que possibilita acionar o motor diesel e ajustar o RPM do mesmo.

O “*controle de propulsão*” possibilita a alteração da percentagem do PWM aplicado nas bombas de propulsão, alterando assim a velocidade de locomoção do Agribot, seja ela para frente ou para trás (ré), utilizando os botões indicados com um triângulo e o indicado com um quadrado para o robô. O modo também possui uma caixa de incremento, a qual permite definir o valor do incremento de PWM a ser utilizado.

O “*controle de direção*” permite selecionar o modo de esterçamento das rodas utilizando os ícones da tela, os quais possuem os modos de esterçamento vistos no tópico anterior e controlar o posicionamento das rodas, por meio de uma barra de deslocamento. Esse modo também possibilita que o operador controle a velocidade e o valor do incremento

em graus utilizado no esterçamento do Agribot. Essa interface do sistema supervisório com o usuário é apresentada na Figura 57.

Figura 57 - Painel principal de controle do sistema supervisório do Agribot

A tela do sistema supervisório também possui na parte superior uma barra onde podem ser selecionadas outras telas do controle de baixo nível utilizadas para manutenção e testes, além da opção do semi-autônomo que aparece no painel de controle principal como “*modo automático*”, neste modo é possível programar uma rotina, baseada em eventos construindo assim uma trajetória determinando o tempo de duração referente a cada evento. Esse tipo de rotina foi utilizada para realizar manobras e validar o sistema supervisório, a tela do modo de guiagem pode ser vista na Figura 58.

Figura 58 - Tela do Modo de Guiagem Semi-Autônomo

Para tal, foi elaborado e programado um roteiro de manobras utilizando o sistema supervisorio, no qual o Agribot percorreu um caminho empregando os diferentes modos de esterçamento vistos no tópico 5.2.3., deste capítulo. Na Figura 59 são apresentadas algumas fotos do Agribot executando manobras durante a inauguração e as instruções de comando do modo automático pode ser encontrado no Anexo II.

Figura 59 - Manobras do Agribot (Embrapa, 2013)

As figuras estão dispostas da seguinte maneira:

- a) Utilizando o modelo Ackerman, utilizando apenas duas no esterçamento, sejam elas traseiras ou dianteiras de acordo com o modo estabelecido no painel principal;
- b) Percorrendo uma curva usando o modelo de esterçamento coordenado, esterçando as quatro rodas no esterçamento;
- c) Seguindo uma trajetória reta, rodas alinhadas;
- d) Seguindo uma trajetória diagonal;
- e) Girando em seu próprio eixo.

Com os testes realizados em ambiente agrícola não estruturado, o robô percorreu o roteiro estabelecido, permitindo validar o sistema supervisor com os seus modos de esterçamento, os quais responderam de forma satisfatória cumprindo com o que foi proposto pelo presente trabalho de pesquisa.

6. Conclusões

O presente trabalho apresentou uma proposta de arquitetura supervisória aplicável na robótica móvel agrícola de grande porte, a qual aceita a integração dos diferentes agentes envolvidos na agricultura de precisão como, por exemplo, o FMIS. Também gera um banco de dados e estabelece a comunicação do Agribot com os sistemas gerenciais, facilitando sua operação e permitindo respostas rápidas frente às mudanças das variáveis espaços temporais e econômicas com que a AP tem que lidar constantemente.

Nesse contexto, o presente trabalho com o intuito de testar e validar a proposta do sistema supervisório, realizou ajustes nos sistemas hidráulicos do Agribot, obtendo como resultado um novo circuito hidráulico de esterçamento com a capacidade de esterçar as quatro rodas de forma simultânea e sincronizada. Também o sistema elétrico foi testado e mapeado para identificação dos sinais e troca de mensagens entre os módulos de controle do robô, sendo também implementado um novo algoritmo de controle, o qual proporcionou um melhor desempenho para o Agribot.

O robô foi apresentado na inauguração do primeiro laboratório de agricultura de precisão do Brasil, utilizando na apresentação um programa supervisório básico desenvolvido em C++ *Builder*, onde foram programados alguns roteiros usando os modelos cinemáticos desenvolvidos no presente trabalho. O sistema supervisório obteve o resultado esperado fazendo com que o Agribot percorresse o campo do laboratório de agricultura de precisão executando manobras pré-estabelecidas, saindo de um marco inicial e retornando ao mesmo ponto após cumprir a rotina estabelecida.

A metodologia empregada no presente trabalho de dissertação permitiu obter uma proposta de uma arquitetura supervisória e a realização de melhorias no Agribot, deixando-o funcional e disponível para a implementação dos diferentes sistemas utilizados para navegação e equipamentos embarcados que são empregados na AP.

6.1. Trabalhos Futuros

O presente trabalho apresentou um avanço significativo nas pesquisas envolvendo a robótica agrícola móvel, desenvolvendo um modelo supervisor e promovendo melhorias em seu sistema hidráulico e de esterçamento, estabelecendo o sincronismo das rodas durante o mesmo. Entre as perspectivas futuras se espera que o trabalho assim como os resultados sirvam de base para o avanço tecnológico e facilite a operação e a integração com outros módulos, como visão e navegação autônoma.

7. Atividades Realizadas

7.1. Disciplinas

As disciplinas cursadas no programa de Pós-Graduação da EESC-USP foram escolhidas com base nas normas do programa da engenharia mecânica e na relação que as mesmas tinham com o presente trabalho. As disciplinas juntamente com seus conceitos são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Disciplinas cursadas

Sigla	Nome da disciplina	Cred.	Freq.	Conc.	Sit. Matrícula
SEM5911/4	Introdução à robótica móvel	12	100	C	Concluída
SEM58755/1	Controle de sistemas robóticos	12	100	A	Concluída
SEM58927/3	Metodologia e pesquisa bibliográfica	6	100	A	Concluída
SEL57533/1	Filtragem robusta	12	100	B	Concluída
SEM57405/3	Matemática para engenheiros	12	100	A	Concluída
SEM57475/2	Simulação de sistemas de manufatura	12	100	A	Concluída

7.2. Participação em Eventos e Publicações

Artigos publicados em periódicos

TORRES C., ARCHILA J., PORTO A., BECKER M., TRONCO M., TIBERTI A., Cinemática directa de una plataforma robótica para agricultura, Revista Colombiana de Tecnologías Avanzada ISSN 1692-7257, N 22, Volume 2, 2013.

Trabalhos publicados em anais de congressos

TORRES C. J., GUERRERO H. B., ARCHILA J. F., TRONCO M., PORTO A. J. V., TIBERTI A. J. Arquitetura supervisória para robótica agrícola móvel. In: XI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, 2013, La Plata. Actas do XI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, 2013. ISBN: 978-950-34-1026-4

DIAZ J. F. A., GUERRERO H. B., TIBERTI A. J., TABILE R. A., TANGERINO G. T., TORRES C. J., SOUZA R. V., BECKER M., PORTO A. J. V., TRONCO M., INAMASU R. Y. Agribot – mobile robot to support of agricultural precision activities. In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, 2013, Ribeirão Preto. Anais 22nd International Congress of Mechanical Engineering, 2013, ISSN 2176-5480.

TORRES C., ARCHILA J., PORTO A., BECKER M., TRONCO M., TIBERTI A., Cinemática directa de una plataforma robótica para agricultura, Congreso Internacional de electrónica y tecnologías de avanzada, Pamplona Noviembre de 2012. (publicação do resumo)

ARCHILA J., TORRES C., PORTO A., BECKER M., TRONCO M., TIBERTI A., Cinemática directa Del robot móvil RAM, Congreso Ingeniería Electrónica UDI, Bucaramanga Octubre de 2012, ISSN 2027-3703

Referências

AUTOMATION-DRIVE.COM. RSView32. 2014. disponível em:< <http://www.automation-drive.com/cms/index.php>> Acesso em: 29/03/2014.

AUTOMATION, R. Descripción Del Producto - RSView32. FTALK-PP007A-ES-P – Junio 2007. disponível em:
<http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/vw32-pp002_esp.pdf> Acesso em: 20/03/2014.

BABOVIC, E., VELAGIC, J. Lowering SCADA development and implementation costs using PtP concept, International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT 2009), IEEE, 2009. p. 1-7.

BAILEY, D., WRIGHT, E. Practical SCADA for Industry, New nessim print of Elsevier, Great Britain, 2003. p. 298.

BATTE, M.T. Changing computer use in agriculture: evidence from Ohio. Computer, Electronic and Agriculture. 2005. Vol. 47, p. 1–13.

BEKEY, G. A. Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control. Cambridge. USA: The MIT Press, 2005. p. 577.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. UML: Guia do Usuário. Rio de Janeiro: ed. Campus, 2006. p. 472.

CASIMIRO, A. C. Uma panorâmica sobre sistemas SCADA, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1995. p. 57.

DANEELS, A.; SALTER, W. What is SCADA? International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Trieste, Italy, 1999.

ELIPSE SOFTWARE. Tutorial HMI/SCADA, versão 2.29, 2008. Disponível em: <http://www.elipse.com.br/port/download/scada/v2.29/b136/scadatutorial_br.pdf> Acesso em: 24/05/2013.

EVERETT, H. Sensors for mobile robots: Theory and Application. A.K. Peters, 1995.

FALLIERE, N.; MURCHU, L.; CHIEN, E. W32. stuxnet dossier. Symantec Security Response, [Online], Accessed, v. 14, 2010.

FAN, R.; CHEDED, L.; TOKER, O. Internet-based SCADA: a new approach using java and xml. Computing Control Engineering Journal. 2005. Vol. 16, N. 5, p. 22 – 26. ISSN 0956-3385.

FAVORETTO, F. Uma Contribuição ao Processo de Gestão da Produção Pelo Uso da Coleta Automática de Dados de Chão de Fábrica. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. p. 222.

FIELDING, R. T. Architectural styles and the design of network-based software architectures. University of California, Irvine, 2000.

FREITAS, R. R. Estudo de uma estrutura em pórtico para utilização em um veículo agrícola autônomo. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2008. p. 93.

GHEZZI, C.; JAZAYERI, M.; MANDRIOLI, D. Fundamentals of Software Engineering. 2nd. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2002. ISBN 0133056996.

GRIEPENTROG H. W.; ANDERSEN N. A.; ANDERSEN J. C.; BLANKE M.; HEINEMANN O.; MADSEN T. E.; NIELSEN J.; PEDERSEN S. M.; RAVN O.; WULFSOHN D. Safe and reliable: further development of a field robot, Precision agriculture'09: papers presented at the 7th European conference on precision agriculture, Wageningen, The Netherlands, 6-8 July 2009. p. 857-866.

INAMASU, R. Y.; TANGERINO, G. T.; PORTO, A. J. V.; LUCHIARI JR, A.; SCHEPERS, J. S.; SHANAHAN, J. F.; FRANCIS, D. D. ; SIMÕES, M. S. . Using active sensor and ultrasound sensor readings to assess plant N status. In: 9th International Conference on Precision Agriculture, 2008, Denver. 9th International Conference on Precision Agriculture. Denver, CO : Colorado State University, 2008

INDUSOFT. Prospecto do InduSoft Web Studio, versão 7.1. Disponível em: <<http://www.indusoft.com/br/Marketing-e-Imprensa/Literatura>> Acesso em: 03/01/2014.

KALOXYLOS, A; EIGENMANN, R.; TEYE, F.; POLITOPOULOU, Z; WOLFERT, S.; SHRANK, C.; DILLINGER, M.; LAMPROPOULOU, I.; ANTONIOU, E; PESONEN, L.; NICOLE, H.; THOMAS, F.; ALONISTIOTI, N.; KORMENTZAS, G. Farm management systems and the Future Internet era, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 89, November 2012, p. 130-144. ISSN 0168-1699, 10.1016/j.compag.2012.09.002.

KLOSE, R., MOLLER, K., VIELSTADTE, C., RUCKELSHAUSEN, A. Modular system architecture for individual plant phenotyping with an autonomous field robot, Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Control & Guidance, March 9-11, 2010, p. 299-307.

LAKHOUA, M. N. Application of functional analysis on a SCADA system of a thermal power plant. Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol. 9.N.2.2009.

LAMBERT, M., RIERA, B., MARTEL, G. Application of functional analysis techniques to supervisory systems, Reliability Engineering and System Safety 64, 1999, p. 209–224.

LOPES, W. C. ; SOUSA, R. V. ; PEREIRA, R. R. D. ; INAMASU, R. ; PORTO, A. J. V. ; TRONCO, M. L. . Architecture and model of data integration between management system and agriculture machines for Precision Agriculture.. In: 11th International Conference on Precision Agriculture (ICPA), 2012, Indianápolis. 11th International Conference on Precision Agriculture (ICPA), 2012.

MARCHI, J. Navegação de robôs móveis autônomos: estudo e implementação de abordagens. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2001.

MARCUSE, J.; MENZ, B.; PAYNE, J. R. Servers in SCADA Applications. IEEE Transaction on industry applications, V. 33, N. 5, 1997.

MOLIN, J. P. Agricultura de Precisão – O Gerenciamento da Variabilidade. Piracicaba, V. 1, 2001.

MURAKAMI, E.; SARAIVA, A. M.; RIBEIRO JUNIOR, L. C. M.; CUGNASCA, C. E.; HIRAKAWA, A. R.; CORREA, P. L. P.. An infrastructure for the development of distributed service-oriented information systems for precision agriculture, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 58, Issue 1, August 2007, p.37-48. ISSN 0168-1699,10.1016/j. compag. 2006.12.010.

NIKKILÄ, R.; SEILONEN, I.; KOSKINEN, K. Software architecture for farm management information systems in precision agriculture, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 70, Issue 2, March 2010. p. 328-336, ISSN 0168-1699,10.1016/j.compag.2009.08.013.

OZDEMIR, E., KARAÇOR, M. Run time position estimate on with basic sensors in real-time SCADA applications. In: 7th International Workshop on Advanced Motion Control, 2002.

PEETS, S; MOUAZEN, A. M.; BLACKBURN, K; KUANG, B; WIEBENSOHN, J. Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on the-go sensors with application to on-the-go soil sensors, Computers and Electronics in Agriculture, Vol 81, February 2012, p. 104-112, ISSN 0168-1699,10.1016/j.compag.2011.11.011.

PERRY, D.; WOLF, A. Foundations for the study of software architecture. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, ACM, v. 17, n. 4, p. 40–52, 1992.

PIERI, E. R. Curso de robótica móvel. Apostila - Universidade Federal de Santa Catarina, programa de pós-graduação Engenharia Elétrica. Florianópolis, 2002. p. 141.

POLÔNIA, P. V. Proposta de arquitetura orientada a recursos para SCADA na WEB. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2011. p. 144.

QUEIROZ, J. F. P. Uma arquitetura multiagente para sistemas de supervisão e controle de processos. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus São José do Rio Preto, São José do Rio Preto, 2013. p. 165.

RAJAMANI, R. Vehicles Dynamics and Control, Springer. USA. 2006.

RUCKELSHAUSEN, A.; BIBER, P.; DORNA, M., et al.: “BoniRob – an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping”, Joint International Agricultural Conference JIAC 2009 Wageningen

SALAMI, P., AHMADI, H., Review of Farm Management Information Systems(FMIS).New York, 2010. p. 87–95.

SAVAGE. Suportive autonomous vehicle for agriculture. Disponível em: <<http://www.savage.gr/about.html>> Acesso em: 18/05/2013.

SECCHI, H. A.Una introducción a los robots móviles, Instituto de Automática – INAUT, Universidade Nacional de San Juan – UNSJ – Argentina, 2008. p. 91.

SIEGWART, R; NOURBAKHSH, I. R.Introduction to Autonomous Mobile Robots. A Bradford Book. Massachusetts London, England: The MIT Press Cambridge, 2004.

SORENSEN,C.A.G.; FOUNTAS,S.; NASH E; PESONEN L; BOCHTIS D; PEDERSEN SM; BASSO, B; BLACKMORE, S.B. Conceptual model of a future farm management information system.Computers and Electronics in Agriculture. 2010. 72(1): p. 37-47.

SORENSEN, C. A. G., PESONEN, L., BOCHTIS, D., VOUGIOUKAS, S. G., & SUOMI, P. Functional requirements for a future farm management information system. Computers and Electronics in Agriculture, 2011. 76(2), p. 266-276.

SOUSA, R. V. Robô Agrícola Móvel (RAM): Uma arquitetura baseada em comportamentos hierárquicos e difuso para sistemas autônomos de guiagem e navegação. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. p. 211.

TABILE, R. A.; GODOY, E. P.; PEREIRA, R. R. D.; TANGERINO, G. T.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. (2011). Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.31, n.1, p.130-142, jan./fev., 2011.

TABILE, R. Desenvolvimento de uma plataforma robótica multifuncional e modular para aquisição de dados em agricultura de precisão. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. p. 207.

TANGERINO, G. T.; TABILE, R. A.; GODOY, E. P.; PEREIRA, R. R. D.; INAMASU, R. Y. Sistemas de sensoriamento embarcado para controle de aplicações agrícolas. Congresso Brasileiro de Automática, 18, Bonito, MS, 2010.

TANGERINO, G. T. Sistemas de sensoriamento embarcado para uso em controle de aplicações de insumos agrícolas à taxa variável. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. p. 125.

TANGERINO, G. T.; INAMASU, R. Y. ; FREITAS, R. R.; PEREIRA, R.R.D.; GODOY, E. P.; SOUSA, R. V. Uso de Sensor Ultra-sônico para Medição da Variabilidade Espacial da Altura de Plantas em Cultura de Cana-de-Açúcar. In: III Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2008, Piracicaba. Anais do CONBAP 2008. Piracicaba: ESALQ, 2008. p. 393-404.

TANGERINO, G. T.; GODOY, E. P.; SANCHES, R. M.; INAMASU, R. Y.; PORTO, A. J. V. Controle de esterçamento de robô agrícola móvel de quatro rodas guiáveis. In: X Símpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2011, São João Del Rei. Anais do SBAI 2011.

TORRES, C. J. ; ARCHILA, J. F.; BECKER, M.; TRONCO, M. L.; TIBERTI, A. J. ; PORTO, A. J. V. Cinemática directa de una plataforma robótica para agricultura. In: Anais do XI Congreso Internacional de electrónica y tecnologías de avanzada, Pamplona, 2012.

TORRES, C. J. ; GUERRERO, H. B.; ARCHILA, J. F.; TRONCO, M.L.;BECKER, M.; PORTO, A. J. V.; TIBERTI, A. J. Arquitetura supervisória para robótica agrícola móvel. In: Anais do XI Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica, La Plata, Argentina, 2013.

URDANETA, G. et al. A reference software architecture for the development of industrial automation high-level applications in the petroleum industry. Comput. Ind., Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 58, p. 35–45, January 2007. ISSN 0166-3615.

VILLANI, E. ; MIYAGI, P. E. ; VALETTE, R. Redes de Petri e orientação a objetos para o desenvolvimento de sistemas de controle híbridos. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), 2001, Uberlândia. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro: ABCM, 2001.

VILLANI, E. Modelagem e análise de sistemas supervisórios. Tese de Doutorado - Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. p. 339.

WEISS, U.; BIBER, P. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D-lidar Sensor. Proceedings of the 4th European Conference on Mobile Robots, September 2009, p 205-210

Anexo I

I. Exemplo de código utilizado no desenvolvimento do painel principal do sistema supervisorio.

Para o desenvolvimento da tela do sistema supervisorio do Agribot, foi utilizado a programação orientada a objeto (POO), na qual foram implementas algumas classes como, por exemplo a "*TAgribotInitializer*". sendo a mesma utilizada para inicializar a "*wxWidgets*" e criar o ambiente para o Controlador PC do Agribot (*Agribot Controller*), cuja utilização se aplica para instanciar um único objeto no programa principal "*WinMain()*".

Todos os componentes do Agribot estão definidos na classe (*Agribot Components*), sendo eles adicionados automaticamente a classe e, podem ser controlados através de dois métodos:

- *Initialize()* - utilizado por *TAgribotInitializer* para instanciar e inicializar os objetos do sistema *Agribot Controller*;
- *Uninitialize()* - utilizado por *TAgribotInitializer* para finalizar e destruir os objetos do sistema *Agribot Controller*.

Um exemplo de uso do "*TAgribotInitializer*" é apresentado a seguir:

```
WINAPI WinMain(HINSTANCE, HINSTANCE, LPSTR, int)
{
    // Don't remove this line. Agribot Components need this object to work
    // without problems!!!
    TAgribotInitializer oInit;
    try
    {
        Application->Initialize();
        Application->CreateForm(__classid(TFormIHMMMain), &FormIHMMMain);
        Application->Run();
    }
    catch (Exception &exception)
    {

```



```

    Application->ShowException(&exception);
}
return 0;
}

```

O Anexo I, traz na sequência a classe de objetos "*AgribotComponents*" demonstrando com o auxílio da Figura abaixo, como ela está dividida na tela de desenvolvimento do C++ *Builder*, explicando a seguir a função de cada um dos componentes criados.

Agribot Components:

Ambiente:

- *TAgribotFactory*
- *TSyslog*
- *TXMLObjectSettings*

Controlador:

- *TAgribotController*

Despachadores de Mensagens:

- *TAgribotDispatcher*
- *TAgribotMultiDispatcher*
- *TAgribotCANDispatcher*
- *TAgribotInfoDispatcher*
- *TAgribotRespDispatcher*

Ambiente:

- **TAgribotFactory:**

1. Controla o acesso à Fábrica de Objetos do sistema, sendo que, a classe "*TAgribotFactory*" é utilizada para instanciar de forma automática o objeto no "*Agribot Controller*" que, uma vez omitido, gera o evento "*OnGetInstance*";
2. Possui rotinas para instanciar o "*Agribot Controller*" e *drivers* CAN;
3. Emprega um componente "*TXMLObjectSettings*" para obter as informações sobre a configuração dos objetos, quando as mesmas são omitidas, utiliza as configurações do sistema (*SysSettings*).

- **TSysLog:**
 1. Direciona o registro de *log* do sistema para o evento "*OnLogMessage*".
- **TXMLObjectSettings:**
 1. Gerencia um arquivo de configuração de objetos em formato *XML*.

Controlador:

- **TAgribotController:**
 1. Instancia e controle o acesso ao objeto do Controlador PC do Agribot (**Agribot Controller**).

Despachador de Mensagens:

O Despachador de Mensagens, é utilizado no envio de mensagens da saída do controlador como, por exemplos, eventos que quando omitidos, automaticamente são enviadas para o evento "*OnMessage*". Neste contexto o Despachador de Mensagens utiliza os seguintes recursos:

- **TAgribotDispatcher:**
 1. Despachador de mensagens padrão – gera eventos para tratar as mensagens das classes base de mensagens do Agribot.
- **TAgribotMultiDispatcher:**
 1. Similar ao "*TAgribotDispatcher*", mas redireciona mensagens especializadas para outros despachadores.
- **TAgribotCANDispatcher:**
 1. Despacha mensagens das classes de base *CAN* e especializadas, sendo as outras mensagens ignoradas.

- **TAgribotInfoDispatcher:**

1. Despacha mensagens das classes base de Informação e especializadas, as demais são ignoradas.

- **TAgribotRespDispatcher:**

1. Despacha mensagens das classes base de Resposta a Comandos e especializadas, ignorando as outras mensagens.

Para obter uma visão mais detalhada da ordem utilizada na geração de eventos, o presente Anexo utiliza como recurso visual um diagrama de blocos e, na sequência um exemplo que emprega esse tipo de eventos de mensagens, juntamente com seu código em C++.

Exemplo de utilização de eventos de mensagens.

Bosch/Bodas Status	
Tensão de entrada (V)	14,18
Falha na propulsão	☐
Encoders de velocidade	0
	0
Velocidade de rotação	0,0
	0,0

```

/*****
*
Agribot Propulsion State Message event handler.

Update Propulsion State UI controls.
*****/

void __fastcall TFormIHMMMain::AgribotInfoDispatcherAgribotInfoPropulsionStateMessage(
    TObject *Sender, const CAgribotInfoPropulsionState *AMsg)
{
    const SAgribotPropulsionState &state = AMsg->getState();

    // Updates UI controls of Dashboard
    stextSpeedEncoder1 Value->Caption =
    IntToStr(state.uEncoderValue[PROPULSION_SENSOR_1]);
    stextSpeedEncoder2 Value->Caption =
    IntToStr(state.uEncoderValue[PROPULSION_SENSOR_2]);
    stextSpeedRotation1 Value->Caption =
    FloatToStrF((double)state.uSpeedSensorRPM[PROPULSION_SENSOR_1]*0.1, ffFixed, 5,
    1);
    stextSpeedRotation2 Value->Caption =
    FloatToStrF((double)state.uSpeedSensorRPM[PROPULSION_SENSOR_2]*0.1, ffFixed, 5,
    1);

    // Updates UI controls of Guidance control panel
    uint16_t speed = max(state.uSpeedSensorRPM[PROPULSION_SENSOR_1],
    state.uSpeedSensorRPM[PROPULSION_SENSOR_2]);
    stextWheelSpeedValue->Caption = FloatToStrF((double)speed*0.1, ffFixed, 5, 1) + " rpm";
}

```

Com base na utilização dos recursos apresentados e o conhecimento prévio da parte mecânica e eletroeletrônica, assim como características relevantes no que diz respeito a

robótica agrícola, se fez possível desenvolver uma interface supervisória para atender as necessidades básicas da plataforma robótica Agribot.

A seguir é apresentado um exemplo do desenvolvimento de um botão de comando do painel principal utilizado para controle e supervisão, disponibilizando o código fonte em C++ e exemplificando a base utilizado para a implementação da tela. o componente escolhido é um botão utilizado no controle de propulsão e está indicado na Figura abaixo.

Programa principal para criação do botão em C++, este programa também serve de base para os demais componentes utilizados no painel principal.

```
void __fastcall TFormMain::btnGuidanceCmdClick(TObject *Sender)
{
    SAgribotPropulsionSetState state;
    int iPWM, iInc = 5;

    GetPropulsionSetState(&state);
    state.bConjugatedTransm = true;
    state.bSpeedAB = !state.bSpeedAB;
    iPWM = (state.uState == PROPULSION_FRONT)? (int)state.uPumpPWM[0] :
        (state.uState == PROPULSION_REAR)? -(int)state.uPumpPWM[0] :
        0;
    try
    {
        iInc = cboxPropulsionPWMInc->Text.ToInt();
    }
    catch(...)
```

```

{ cboxPropulsionPWMInc->Text = "5";
}

if (Sender == bitbtnFrontPWM)
{ if (iPWM <= 100) iPWM += iInc;
}
else if (Sender == bitbtnRearPWM)
{ if (iPWM >= -100) iPWM -= iInc;
  if (iPWM < -100) iPWM = -100;
}
else if (Sender == bitbtnStopPWM)
  iPWM = 0;

if (iPWM > 100)    iPWM = 100;
else if (iPWM < -100) iPWM = -100;

if (iPWM > 0)
  state.uState = PROPULSION_FRONT;
else if (iPWM < 0)
  state.uState = PROPULSION_REAR;
else
  state.uState = PROPULSION_PARKING;

state.uPumpPWM[PROPULSION_PUMP_1] =
state.uPumpPWM[PROPULSION_PUMP_2] = (uint16_t)abs(iPWM);
SetPropulsionSetState(&state);
SendPropulsionState();
}

```

Forma de envio para mensagens de comando, contendo o novo estado de propulsão:

```

void TformMain::SendPropulsionState()
{
  PAgriBotResponse pResp;

```

```
if (ControllerIsOnline())
{ LogMsg("Enviando novo estado de propulsão ao controlador...");
  if (SendCommand( new CAgribotSetPropulsionState(*GetPropulsionSetState()), 2000,
&pResp ))
  { if (pResp->getResult() == AGRIBOT_CMD_OK)
    tsLogMsg("Novo estado de propulsão enviado com sucesso ao controlador!");
    else
      tsLogMsg("Erro: ocorreu um erro ao tentar definir o novo estado de propulsão!");
    delete pResp;
  }
}
```

Anexo II

II. Exemplo das instruções utilizadas pelo modo de controle automático do sistema supervisorio do Agribot.

<op-code> <param-list>

<op-code> código da operação / comando

<param-list> parâmetros do comando - lista de valores separador por espaço

Tabela de Propulsão

op-code*	param-list	descrição
PP	t	Parking mode - parado com freios acionados
PD	t spd	Drive - para frente
PR	t spd	Rear - para trás / ré
PN	t	Neutral - parado sem freios acionados

* case insensitive

Tabela de Esterçamento

op-code*	param-list	descrição
GA	0 t spdg	Alinhar rodas em 0 graus
GF	dg t spdg	Esterçar rodas dianteiras
GR	dg t spdg	Esterçar rodas traseiras
GD	dg t spdg	Esterçar rodas diagonalmente (caranguejo)

GC	dg t spd	Esterçar as 4 rodas de forma coordenada (radial)
GX	dg t spd	Giro no próprio eixo geométrico
GS		Interrompe o comando de esterçamento atual (uso interno)

* case insensitive

Tabela de Comandos de Controle

op-code* param-list descrição

CD	t	Delay
CS		Stop

* case insensitive

Tabela de Parâmetros

param-list descrição

dg	posição desejada em graus - depende do modo de esterçamento
spd	velocidade de deslocamento em centímetros por segundo - 0 a 150
spd	velocidade máxima de esterçamento em graus por segundo - 5 a 90
t	tempo de deslocamento / esterçamento / delay em milisegundos

Observações

Esterçamento:

t e spdg são concorrentes - se t for > 0 , spdg é ignorado.

Cada comando é executado de forma bloqueante - o executor só executa o próximo comando quando o comando de esterçamento atual terminar.

Propulsão:

t - determina o tempo de execução da operação - se for 0, executa a instrução e salta imediatamente para a próxima instrução (não bloqueante) - use "delay" para aguardar.

Se spd for 0, o Agribot é freado.