

CLAYTON JOSÉ TORRES

Sistema de Controle e Supervisão para Robô
Agrícola Móvel Baseado em Fusão de Dados Sensoriais

São Carlos

2018

CLAYTON JOSÉ TORRES

Sistema de Controle e Supervisão para Robô
Agrícola Móvel Baseado em Fusão de Dados Sensoriais

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Doutor em Ciências.

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

2018

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 elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo (a) autor (a).

Torres, Clayton José

T622s Sistema de Controle e Supervisão para robô agrícola móvel baseado em fusão de dados sensoriais / Clayton José Torres; orientador Mário Luiz Tronco. São Carlos, 2018.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Sistema de Controle e Supervisão. 2. Robótica Agrícola Móvel. 3. Fusão de Dados Sensoriais. 4. Visão Computacional. I. Título

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Tecnólogo CLAYTON JOSÉ TORRES.

Título da tese: "Sistema de controle e supervisão para robô agrícola móvel baseado em fusão de dados sensoriais".

Data da defesa: 05/12/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

Prof. Associado Dennis Brandão
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado Evandro Luis Linhari Rodrigues
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

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

Aprovado

Prof. Dr. Orides Morandin Junior
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado Gherhardt Ribatski

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado Luís Fernando Costa Alberto

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

Ao meu eterno pai: *Eurides Torres (in memoriam).*

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, 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, Iara e Ana Paula.

Aos amigos do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Automação e Simulação, em especial a John Faber, Ingrid Pedraza, Leonardo Bonacini, 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 Doutorado.

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. Sistema de Controle e Supervisão para Robô Agrícola Móvel Baseado em Fusão de Dados Sensoriais. São Carlos, 194 p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

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. A automação de máquinas e implementos agrícolas vem auxiliando diretamente esta tarefa, provendo ferramentas para o produtor responder rapidamente às mudanças impostas pelo mercado, como melhor aproveitamento na área de plantio, entre outros benefícios. Nesse contexto, pesquisas voltadas ao desenvolvimento de plataformas robóticas móveis, com elevado número de sistemas embarcados, estão ganhando cada vez mais espaço no setor agrícola. Considerando esse cenário, no presente trabalho apresenta-se uma proposta de um Sistema de Controle e Supervisão, desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica sobre robótica móvel agrícola, técnicas de navegação, fusão de dados sensoriais e sistemas supervisórios. A implementação do Sistema de Controle e Supervisão está baseado na fusão de dados sensoriais com redundância na definição de medidas angulares relacionadas ao deslocamento da plataforma, e tem como característica, ser modular e independente de uma plataforma específica. Também, possui uma interface homem máquina (IHM) e promove ações automáticas de controle, as quais tem como objetivo a prevenção de riscos operacionais que possam ocorrer durante a condução do robô. O Sistema de Controle e Supervisão proposto foi implementado e testado utilizando a plataforma robótica agrícola móvel (RAM), sendo que, os experimentos foram realizados em um ambiente agrícola e os mesmos comprovaram a viabilidade do sistema proposto. Os resultados experimentais obtidos servem de base para a implementação de um sistema que utiliza uma arquitetura aberta, com a possibilidade de ser embarcada em qualquer plataforma agrícola móvel, e que possa atuar como camada *Middleware* entre o sistema de acionamento e controle e a camada de aplicação (navegação).

Palavras chave: Sistema de Controle e Supervisão, Robótica Agrícola Móvel, Fusão de Dados Sensoriais, Visão Computacional.

Abstract

Torres, C.J. Control and Supervision System for Mobile Agricultural Robot Based on Sensory Data Fusion. São Carlos 194 p. Doctoral Thesis – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

National agriculture, seeking greater integration and participation in the global market, tends to invest and more in the automation of agricultural machinery and implements, aiming for greater efficiency and quality in its products. The automation of agricultural machinery and implements has directly assisted this task, providing the producer with tools to respond timely to changes imposed by the market, such as better use in the area of planting, among other benefits. In this context, research aimed at the development of robotic mobile platforms with high number of on-board systems, are gaining more and more space in the agricultural sector. Taking this into account, this work presents an innovative proposal of a Control and Supervision System, based on solid bibliographical research on mobile agricultural robotics and navigation techniques and supervisory systems. The implementation was based on a fusion of sensory data with redundancy in attitude definition and its main characteristic is to be modular and independent from a specific platform, besides providing a user-friendly interface (HMI) as well as to promote automatic actions of control that avoid risking the robot operation during its conduction. To validate the system, tests were performed using the RAM Platform, in an agricultural environment, which proved the feasibility of the system. The experimental results obtained serve as the basis for the implementation of an open architecture system that can be used on any mobile agricultural platform and that can act as a Middleware layer between the starting and controlling system and the application layer (navigation).

Keywords: Control and Supervision System, Mobile Agricultural Robotics, Sensory Data Fusion, Computational Vision.

Lista de Figuras

Figura 1 - Plataforma RAM (a) e Plataforma AgriBot (b), do Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP	28
Figura 2 - Trabalho com associação de sistemas.....	37
Figura 3 – Versão final do Agrobot.....	38
Figura 4 – Conceito de Módulos do BoniRob.....	39
Figura 5 - Estrutura do Sistema de Avaliação	44
Figura 6 - Esquemático do sistema desenvolvido	46
Figura 7 - Estrutura do sistema de integração de sensores	47
Figura 8 - Estratégia de Sistema de Navegação Utilizado na Simulação	51
Figura 9 - Diagrama de controle básico para veículos autônomos.....	55
Figura 10 -Algoritmo do Filtro de Kalman	57
Figura 11 - Diagrama de blocos da arquitetura do sistema	59
Figura 12 - Fluxograma do algoritmo proposto	60
Figura 13 – Filtro complementar básico.....	61
Figura 14 – Aplicações de filtragens: (A) aplicação com dois graus de liberdade e (B) aplicação com um grau de liberdade, restrição complementar.....	63
Figura 15 - Software para tele operação	66
Figura 16 - Amadillo coletando imagens de erva daninha em um campo de milho ao anoitecer	67
Figura 17 - O indicador de semeador e o sistema de mapeamento	69
Figura 18 - Estrutura funcional do veículo autônomo.....	71
Figura 19 - Arquitetura Supervisória do AgriBot.....	72
Figura 20 - Painel principal de controle do sistema supervisorio do AgriBot	73
Figura 21 - captura de tela “iniciar a aceitação de dados”.....	74
Figura 22 - Esqueletos de caminho usando o algoritmo de desbaste	75
Figura 23 - Interface do usuário do software LabVIEW	77
Figura 24 – Tela do cliente no Software OPC UA para colheitadeira	78
Figura 25 - Interface gráfica do usuário do <i>software</i> desenvolvido	79
Figura 26 - Visualização de um dos níveis da interface gráfica de usuário hierárquico de janelas da rede de laboratório da Internet.....	80
Figura 27 – Robô agrícola pulverizador	81

Figura 28 - Fluxograma do processo de desenvolvimento do Sistema de Controle e Supervisão	82
Figura 29 - Robô Agrícola Móvel - RAM.....	86
Figura 30 - Robô Agrícola Móvel (RAM). Detalhe do módulo da roda dianteira e sistema de propulsão e guiagem.....	86
Figura 31 - Diagrama simplificado de funcionamento do RAM.....	88
Figura 32 - Diagrama de bloco simplificado da IG-500N.....	89
Figura 33 - Configuração do veículo (A) e das câmeras utilizadas na captura de imagem (B).....	90
Figura 34 – Processo de transmissão do vetor para o Sistema de Controle e Supervisão.....	91
Figura 35 - Sistema de Visão Omnidirecional sobre a Plataforma RAM (A) e detalhe do conjunto catadióptrico (B).....	92
Figura 36 – Esquema contendo todo processo do módulo omnidirecional.....	93
Figura 37 - Diagrama de conexão entre os subsistemas do RAM.....	95
Figura 38 - Diagrama com as entradas e as interações do Sistema de Controle e Supervisão.....	97
Figura 39 - Diagrama interação Sistema de Controle e Supervisão e operador	98
Figura 40 - Camadas com os blocos do Sistema de Controle e Supervisão	104
Figura 41 - Camada de processamento de entradas em destaque.....	105
Figura 42 - Módulo de Fusão Sensorial	107
Figura 43 - Ângulos de Euler	108
Figura 44 - Algoritmo do Filtro de Kalman Estendido	116
Figura 45 -Redundância na definição dos ângulos de Euler	118
Figura 46 - Filtro complementar ângulos de Euler.....	118
Figura 47 - Diagrama do Filtro Complementar do Deslocamento Angular	119
Figura 48 - Diagrama de blocos da definição da distância percorrida	121
Figura 49 - Sistema de visão omnidirecional	124
Figura 50 - Sistema de visão estéreo	126
Figura 51 - Inclinação lateral do RAM.....	129
Figura 52 - Diagrama do bloco comparador para inclinação lateral do RAM	129
Figura 53 - Inclinação frontal do RAM	130
Figura 54 - Diagrama do bloco comparador para inclinação frontal do RAM	130
Figura 55 - Camada de controle e supervisão em destaque.....	131

Figura 56 – Diagrama de blocos simplificado referente ao funcionamento bloco controle e tomada de decisão no Sistema de Controle e Supervisão do RAM.....	132
Figura 57 – Diagrama de blocos da interação do Sistema de Controle e Supervisão	133
Figura 58 - Esquema de funcionamento do bloco de controle e tomada de decisão.....	134
Figura 59 - Camada de saída de comandos em destaque	135
Figura 60 - Diagrama do Sistema de Controle e Supervisão do RAM	137
Figura 61 - Dados controle de baixo nível e ângulos de Euler do experimento sítio1	142
Figura 62 - Dados controle de baixo nível e ângulos de Euler do experimento sítio2.....	143
Figura 63 - Dados controle de baixo nível e ângulos de Euler do experimento sítio3.....	145
Figura 64 - RAM experimento no campo da EESC-USP	146
Figura 65 - Aplicativo Teseu.....	146
Figura 66 - Comparativo dos ângulos de Euler.	147
Figura 67 - Filtro complementar ângulos de Euler.....	148
Figura 68 - Resultado da aplicação do filtro complementar.....	149
Figura 69 - Dados do magnetômetro referentes aos três experimentos.....	151
Figura 70 – Filtro complementar básico.....	152
Figura 71 - Filtro complementar para definição de psi linha	154
Figura 72 – Distância percorrida e deslocamento pontual com os dados do experimento sítio 1	155
Figura 73 - Distância percorrida e deslocamento pontual com os dados do experimento sítio 2	156
Figura 74 – Distância percorrida e deslocamento pontual com os dados do experimento sítio 3	157
Figura 75 - Deslocamento pontual em x e y.....	160
Figura 76 - Fluxograma de entradas com prioridade da camada de controle e tomada de decisão	163
Figura 77 - Tela do Sistema de Controle e Supervisão do RAM	165
Figura 78 - Comandos utilizados em operação manual do RAM.....	166
Figura 79 – trajetória descrita pelo algoritmo <i>Pure Pursuit</i>	167
Figura 80 - tela do sistema supervisorio, com os campos contendo as informações referentes a cada parte da combinação das câmeras	168
Figura 81 - Lista de falhas tela do sistema de supervisão e controle do RAM	169

Figura 82 - Geometria de Ackermann	190
Figura 83 - Comportamento angular das rodas em relação à variação de (R)	194
Figura 84 - Diferencial de velocidade das rodas do RAM	194

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Plataformas Robóticas Móveis Agrícolas	36
Tabela 2 - Classificação dos sensores em robótica	41
Tabela 3 - Fonte de dados de navegação para robôs agrícolas.....	42
Tabela 4 – Comparação entre resultados de algumas pesquisas de avaliação.....	54
Tabela 5 - Sequência de combinações de saídas do sistema de visão omnidirecional.....	125
Tabela 6 - Sequência de combinações de saídas do sistema de Visão Estéreo	127
Tabela 7 - Dados experimento sítio1	141
Tabela 8 - Dados experimento sítio2.....	143
Tabela 9 - Dados experimento sítio3.....	144
Tabela 10 – Sequência das combinações das saídas dos módulos de Visão	162
Tabela 11 – Alteração de prioridade realizado pela camada de controle e tomada de decisão	164

Lista de Siglas

AP	Agricultura de Precisão
CAN	Rede de Controle de Área
CVT	Transmissão Continuamente Variável
DAC	Desenho Assistido por Computador
ECU	Unidade de Controle Eletrônica
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EKF	Filtro de Kalman Estendido
FAO	Organização para a Agricultura das Nações Unidas
FC	Filtro Complementar
FK	Filtro de Kalman
GPS-RTK	Sistema de Posicionamento Global – Cinemático em Tempo Real
GNSS	Sistemas de Navegação Global por Satélite
ID	Dados de Identificação
IHM	Interface Homem Máquina
IMU	Unidade de Medida Inercial
ISO	Organização Internacional para Padronização
ISOBUS	Padronização de Eletrônica Embarcada
NDVI	Diferença Normalizada do Índice de Vegetação
NEPAS	Núcleo de Ensino Pesquisa em Automação e Simulação
PC	Computador Pessoal
RAM	Robô Agrícola Móvel
RTU	Unidade Terminal Remota
T2FNN	Tipo-2 Fuzzy Rede Neural
TCP/IP	Protocolo de Controle de Transmissão/ Protocolo de Internet
USP	Universidade de São Paulo
SLAM	Localização e Mapeamento Simultâneos

Sumário

1	<i>Introdução</i>	27
1.1	Objetivos	29
1.2	Justificativa	29
2	<i>Revisão da Literatura</i>	31
2.1	Robótica Agrícola Móvel	31
2.1.1	Sensores Utilizados em Plataformas Robóticas Móveis Agrícolas.....	40
2.1.2	Navegação e Planejamento de Trajetória para Plataformas Robóticas Móveis.....	48
2.1.3	Filtro de Kalman.....	56
2.1.4	Filtro Complementar	61
2.2	Sistemas de Controle e Supervisão para Plataformas Robóticas Móveis Utilizadas na Agricultura	65
3	<i>Metodologia</i>	82
3.1	Robô Agrícola Móvel (RAM)	85
3.1.1	Sistema Eletrônico e Módulos de Controle	87
3.2	Sensores e Sistemas de Visão Computacional	89
3.2.1	Módulo de Visão Estéreo.....	90
3.2.2	Módulo de Visão Omnidirecional	92
3.3	Arquitetura do Sistema de Controle e Supervisão	94
3.4	Sistema de Controle e Supervisão	103
3.5	Camada de Processamento e Entradas	105
3.5.1	Fusão de Dados Sensoriais	106
3.5.2	Sugestões de Controle	123
3.5.3	Lista de Falhas e Método para Detectar Falhas.....	128
3.6	Camada de Controle e Supervisão	131
3.6.1	Controle e Tomada de Decisão.....	132
3.7	Camada de Saída de Comandos	135

3.7.1	Executa Tarefa	136
4	Resultados Experimentais	139
4.1	Fusão Sensorial.....	139
4.2	Módulos Auxiliares.....	161
4.3	IHM e o funcionamento do Sistema de Controle e Supervisão.....	164
5	Conclusão	171
5.1	Trabalhos Futuros.....	172
	Referências	173
	Anexos	190
	Anexo 1:.....	190
	Ackerman – Resultados.....	193

1 Introdução

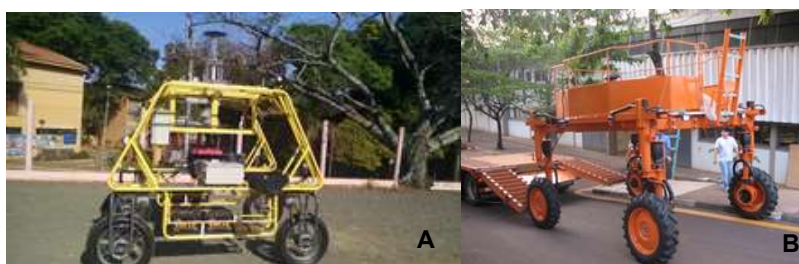
A utilização cada vez mais frequente da agricultura de precisão no cenário nacional, como um conjunto de tecnologias e procedimentos empregados para aperfeiçoar o sistema de produção agrícola, levando em consideração o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e fatores relacionados (MOLIN, 2001; SORENSEN et al., 2011), tem direcionado cada vez mais as pesquisas envolvendo o emprego da tecnologia, um bom planejamento e ferramentas de gerenciamento agrícola. Nesse contexto, a automação de máquinas e equipamentos e o uso da tecnologia de informação, que se faz presente em outros segmentos, tem ganhado espaço no setor agrícola e motivado as pesquisas relacionadas a automação de máquinas e implementos aplicados à agricultura no âmbito nacional.

O sistema de manejo desenvolvido com técnicas empregadas na agricultura de precisão conduz a práticas agrícolas com alto nível de automação, fator que, de forma paralela contribui com a preservação do meio ambiente, operações de amostragem e coleta de dados em grande escala. Tais Fatores, impulsionam o aprimoramento, a instrumentação e a automação de máquinas agrícolas, o qual tende a viabilizar a utilização de sensores e sistemas embarcados como, por exemplo, sistemas de georreferenciamento em plataformas robóticas agrícolas móveis, provendo-as da capacidade de coleta e processamento de dados relativos ao seu ambiente de operação.

Os conceitos de automação e robótica aplicados ao setor agrícola são o foco de inúmeras pesquisas e têm passado por diversos avanços tecnológicos, o que permite direcionar os estudos, tanto na automação de máquinas agrícolas convencionais, como, no desenvolvimento de plataformas robóticas específicas, para realizar determinadas tarefas. Porém, o uso e a comercialização de robôs ou máquinas autônomas em uma aplicação de campo, ainda tem um longo caminho a percorrer.

No Brasil, por exemplo, especificamente no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, duas plataformas vêm sendo desenvolvidas para uso agrícola, com características de veículos autônomos: o RAM (Robô Agrícola Móvel) e o AgriBot. Ambas as plataformas são multifuncionais, e capazes de coletar dados durante seu deslocamento na área agrícola, e contam com diversos níveis de sensoriamento e sistemas de comunicação para dados. Na Figura 1 são mostradas as duas plataformas.

Figura 1 - Plataforma RAM (a) e Plataforma AgriBot (b), do Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP



Fonte: Próprio autor

Uma característica a ser considerada nas plataformas experimentais desenvolvidas no Brasil, está relacionada à inexistência de um Sistema de Controle e Supervisão específico para aplicação em robótica agrícola móvel nacional de médio e grande porte. Tal sistema deve operar entre as camadas de controle de baixo nível e o gerenciamento de missões, de modo que, a partir dos dados fornecidos por ambas, possa tomar decisões de forma automática e disponibilizar informações para o operador. Esse tipo de arquitetura já existe na indústria a anos, mas ainda é pouco explorado em aplicações envolvendo a robótica móvel, principalmente a que está relacionada com o setor agrícola. Algumas pesquisas vêm reportando iniciativas para o desenvolvimento de uma camada responsável pelo controle e monitoramento de tarefas em robôs agrícolas móveis (MURAKAMI et al., 2008; MOUSAZADEH, 2013; BASHIRI & MANN, 2014). No entanto, não foi reportado na literatura um sistema supervisor específico para robôs agrícolas móveis, com características de acoplamento entre camadas de usuário e de controle.

Baseado no levantamento bibliográfico realizado, o presente trabalho, que tem como foco, o desenvolvimento de um Sistema de Controle e Supervisão, o qual seja modular e aplicável à robótica agrícola móvel, tendo como característica principal a fusão de dados sensoriais para auxiliar na tarefa de condução autônoma do robô. Outro critério estabelecido, é que o sistema seja flexível, facilitando assim a substituição dos sensores sem realizar grandes alterações no *Software* principal, e que o sensoriamento e a transmissão de informações para o controle de condução sejam realizados de forma independente do modelo cinemático utilizado pelo controle de baixo nível da plataforma, possibilitando, assim, a utilização do Sistema de Controle e Supervisão em uma gama maior de robôs, independentemente de suas características construtivas. Contudo, para que fosse possível o seu desenvolvimento foi necessário a utilização de uma plataforma robótica como base, ou seja, um laboratório que possibilitasse a

realização de experimentos de campo e a validação da teoria empregada. Para tal, utilizou-se a plataforma robótica RAM do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC – USP, equipamento desenvolvido para uso em tarefas de coleta de dados e monitoramento de áreas agrícolas, dotado de um sistema de tração independente nas quatro rodas e um sistema de controle de esterçamento individual nas rodas dianteiras.

1.1 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um Sistema de Controle e Supervisão para robô agrícola móvel baseada em fusão de dados sensoriais, a qual seja independente em relação à plataforma utilizada e seja aplicável para condução de uma plataforma robótica agrícola móvel no âmbito nacional. Deve ser eficiente e dinâmico, no sentido de ponderar os dados obtidos, os quais possibilitem a definição de ações de controle. Tendo as características necessárias para futura utilização em pesquisas com módulos de navegação autônoma.

1.2 Justificativa

Fatores como o alto custo e a escassez da mão-de-obra, cada vez mais frequentes devido ao envelhecimento da população rural e questões ambientais, se destacam entre os problemas enfrentados pelo setor agrícola, e têm incentivado e justificado as pesquisas relacionadas à utilização de robôs agrícolas móveis (TABILE, 2012), os quais trabalham em ambientes geralmente não estruturados. Para não causar dano as culturas e alcançar qualidade no trabalho realizado, o desenvolvimento de robôs é muito específico em relação aos objetivos, estruturas, métodos, técnicas e sensores, que compõem a proposta para sua utilização em campo. Esse panorama tem influência direta nas dificuldades ainda encontradas para a comercialização de robôs agrícolas móveis. Uma solução envolve a padronização de termos, do sistema medição, das metodologias e a adequação dos requisitos tecnológicos. Tais fatores são considerados vitais para comparar o desempenho e o progresso técnico da robótica empregada no setor, e limitam a comercialização e a assimilação de sistemas de robôs agrícolas autônomos, os quais acabam sendo únicos, tendo seu sistema e estrutura desenvolvidos de acordo com cada tarefa (BECHAR & VIGNEAULT, 2017). Um exemplo é o trabalho de Sellmann (SELLMANN et al., 2014), o qual promove a interação entre Homem-Máquina utilizando serviços *Web* para

realizar o combate de ervas daninhas, detectando-as e identificando-as remotamente, possibilitando a aplicação pontual de agrotóxicos.

Pesquisas envolvendo automação de máquinas robóticas no setor agrícola, atualmente vêm se baseando em sistemas de robôs autônomos (*ARS - Automous Robotic Systems*), os quais requerem aplicação de tecnologias avançadas para produzir, lidando com ambientes complexos e altamente variáveis (NOF, et al., 2013). Apesar dos avanços obtidos no setor, poucos *ARS* estão operacionais na produção de sistemas agrícolas, tendo como fatores limitantes as ineficiências de produção e a falta de justificativa econômica (BECHAR & VIGNEAULT, 2016).

Trabalhos como esses mostram um avanço significativo nas pesquisas relacionadas à automação de máquinas agrícolas e a necessidade de interação entre o homem e o equipamento. Porém, o fato de serem únicos em termos de concepção baseados em tarefas distintas, limitam a comercialização e a comparação entre os sistemas robóticos. No entanto, trabalhos como o de Becher (BECHAR & VIGNEAULT, 2017), identificaram lacunas que são comuns e podem ser preenchidas para se adequarem a ambientes não estruturados e dinâmicos como, por exemplo, desempenho de detecção deficiente, tomada de decisão inadequada e baixa taxa de sucesso na ação. Uma solução proposta pelos autores é direcionar as pesquisas no desenvolvimento de algoritmos versáteis e adaptativos, os quais se adequem a mudanças sem a necessidade de grandes alterações em sua estrutura, integrados em plataformas multisensores, com o tempo de ciclo reduzido, aumentando a taxa de produção, justificando economicamente, a utilização de robôs autônomos no campo.

Para tal, é fundamental que se aprimore a integração entre todos os subsistemas envolvidos e se direcionem as pesquisas para fatores que limitam a comercialização de robôs agrícolas móveis, disponibilizando plataformas onde a aquisição de informações seja robusta e confiável como, algoritmos de fusão sensorial e análise de dados, os quais tenham capacidade de serem adequados às condições dinâmicas encontradas em ambientes não estruturados encontrados no setor agrícola.

Em nível nacional, no entanto, existe ainda uma enorme carência em relação ao desenvolvimento de equipamentos que tenham a capacidade de operar com certo grau de autonomia utilizando Sistemas de Controle e Supervisão. Fator esse, que pode ser considerado motivador, além de justificar a continuidade dos trabalhos de pesquisa, relacionados ao desenvolvimento e a nacionalização de tecnologias aplicáveis na robótica agrícola móvel.

2 Revisão da Literatura

Trabalhos científicos relacionados ao setor agrícola, os quais buscam alternativas para solucionar os desafios encontrados pelos agricultores como, por exemplo, a escassez de mão de obra tem motivado as pesquisas voltadas para a automação de máquinas e equipamentos convencionais, além do desenvolvimento de robôs agrícolas móveis. Tais equipamentos apresentam avanços significativos, impulsionados por facilidades tecnológicas que melhoraram a qualidade e reduziram os custos de sensores e equipamentos eletrônicos, aumentando significativamente sua utilização pelos modernos processos de manejo agrícola, que passaram a ser instrumentados e tiveram um aumento na utilização de computadores embarcados.

As pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de robôs apontam a necessidade de utilizar uma grande variedade de sensores e técnicas de integração ou fusão dos seus dados, e o desenvolvimento de *softwares* específicos para o controle e supervisão de plataformas robóticas agrícolas. Baseado nessas considerações, nesta revisão bibliográfica, inicialmente apresenta-se um levantamento introdutório sobre a robótica móvel agrícola, sua morfologia, os sensores empregados e os principais algoritmos utilizados para fusão sensorial. Posteriormente são apresentados alguns exemplos de plataformas robóticas agrícolas existentes e técnicas de navegação. A revisão é finalizada com uma abordagem relacionada às técnicas e conceitos utilizados em sistemas de controle supervisorio e aquisição de dados, os quais juntamente com os métodos de fusão de dados sensoriais são a base para o desenvolvimento do presente trabalho.

2.1 Robótica Agrícola Móvel

Na literatura científica é possível encontrar algumas definições sobre plataformas robóticas móveis como, por exemplo, as de Marchi (MARCHI, 2001) e Bekey (BEKEY, 2005), as quais definem um robô móvel como um dispositivo mecânico montado sobre uma base instável, controlado por um sistema computacional e dotado de sensores e atuadores, que consentem a sua interatividade com o ambiente. Também podem ser definidos como dispositivos de transporte automático, ou seja, plataformas mecânicas capazes de se locomover

em um determinado ambiente de trabalho com certo nível de autonomia, portando ou não cargas (SECCHI, 2008).

Robôs móveis, em sua maioria, são bem específicos e possuem características particulares, as quais os habilitam a executar determinadas tarefas. Geralmente, a própria tarefa é determinante para definição construtiva de sua estrutura e, desta forma, não deve ser ignorada no desenvolvimento do projeto de um robô móvel, sendo de extrema importância na definição das características construtivas, dos tipos de controle e as suas funcionalidades.

Dentre os protótipos utilizados em pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações, destacam-se os que são empregados no setor agrícola, o qual passa por um processo de aprimoramento, que vai desde a automação de máquinas e equipamentos até a concepção de um robô agrícola móvel específico, introduzindo, assim, cada vez mais um elevado nível de automação para auxiliar nas tarefas do campo como, por exemplo, cultivo e coleta seletiva com o mínimo de interferência humana. Para atingir este objetivo, os robôs agrícolas devem ser capazes de adaptar-se em resposta a variadas condições e circunstâncias (MAHADHIR et al, 2014).

Estudos realizados na década passada por Pieri (PIERI, 2002) e Secchi (SECCHI, 2008), foram importantes para definição de fatores que podem ser determinantes na concepção de boa parte dos modelos de plataformas robóticas móveis empregados no setor agrícola nacional. Baseando-se nos modelos descritos por esses autores é possível determinar as características construtivas de um robô, os tipos de sistemas utilizados pelo controle operacional e a funcionalidade da plataforma. Porém, em um contexto mais recente Ingrand e Ghallab (INGRAND & GHALLAB, 2014) citaram a necessidade de adotar um sistema robótico com funcionalidades mais adaptáveis e robustas, cujas funções de decisão devem ser identificadas e analisadas: planejamento, ação, monitoramento, observação e aprendizagem.

Como descrito por Secchi (SECCHI, 2008), robôs agrícolas móveis que atuam em ambientes externos não estruturados que podem ou não serem previamente modelados, são considerados robôs de serviço de campo, os quais são projetados para operarem em ambientes externos e com uma grande variação de tipos de solos e em culturas diversas. Nesse cenário, é comum a ocorrência de deslizamentos laterais do robô durante o deslocamento ao longo de sua trajetória. Tal efeito deve ser considerado no projeto estrutural da plataforma. Um exemplo de solução que busca amenizar essa condição é o emprego de roda tipo *torus-shaped*, a qual é utilizada em conjunto com uma suspensão que possui dois graus de liberdade, baseada em um mecanismo formado por quatro barras, conhecido como D4Bar. Segundo o trabalho de Appala

e Ghosal (APPALA & GHOSAL, 2015), o conjunto é responsável por realizar o movimento de inclinação lateral independente da roda e apresenta bons resultados, diminuindo o deslizamento lateral da plataforma quando se navega em terrenos irregulares.

O desenvolvimento desse segmento da robótica móvel, ainda apresenta grandes desafios, os quais estão relacionados à forma eficiente de lidar com questões como, por exemplo, confiabilidade, segurança e definir um padrão de manutenção. Desta forma, é fundamental considerar a grande dependência dos sensores para se localizar e se locomover de forma segura e introduzir regras de confiabilidade durante o projeto, propondo uma abordagem global e estruturada, que sirva de orientação para introdução de princípios de tolerância a falhas em uma arquitetura de controle (CRESTANI, GODARY-DEJEAN & LAPIERRE, 2015).

Robótica móvel aplicada à área agrícola

Existem diversas pesquisas e progressos significativos no que diz respeito à robótica móvel agrícola, impulsionados por avanços tecnológicos, os quais possibilitaram a produção de equipamentos com grande poder de processamento, alta precisão, baixo consumo de energia e de tamanho reduzido, fatores esses que favoreceram a utilização de sistemas embarcados em plataformas robóticas e a automação de máquinas agrícolas convencionais. Porém, na escolha de qual melhor sistema, devem ser consideradas as vantagens e desvantagens do emprego de um robô em relação à automação de uma máquina convencional.

As máquinas convencionais possuem um custo relativamente baixo para automação e facilidade na padronização de implementos. Suas desvantagens estão relacionadas à compactação do solo e com sua estrutura mecânica, a qual impossibilita a adição de sistemas de controle de transmissão (especialmente a variável), além da dificuldade de locomoção (MOUSAZADEH, 2013). Na literatura científica relacionada à área, no entanto, é possível encontrar diversos exemplos de tratores que passaram por adequações e se tornaram plataformas robóticas semi-autônomas, dotadas de sistemas de controle embarcado e um número variado de sensores para auxiliar em sua navegação. Nesse contexto, encontram-se modelos como, por exemplo, o trator autônomo (GRIEPENTROG et al., 2009), o qual foi utilizado para o estudo e desenvolvimento de métodos de guiagem e navegação, sem que estivesse relacionada a ele alguma aplicação específica. Para sua concepção, utilizou-se um trator de pequeno porte, que passou por um processo de automação, associado à um RTK-GPS

(*Real-time kinematic global positioning system*) e uma IMU (*Inertial measurement unit*), o capacitando para realizar missões e se manter em rotas preestabelecidas.

No trator autônomo, as instruções são programadas diretamente no controlador, na forma de um plano de rota ou missão, que por sua vez gera uma rotina de controle para executar e manter a rota ou missão pré-determinada pelo operador. Exemplo similar ao descrito é o trator robô (TAKAI, BARAWID e NOGUCHI, 2011). Nesse caso, porém, os autores utilizaram como base para automação um trator de esteira, também de pequeno porte.

Em contrapartida, os Robôs Agrícolas Móveis são atraentes por serem equipamentos de pequeno porte, fato que contribui para evitar a compactação do solo. Porém, possuem uma limitação de tamanho, o que impossibilita a execução de determinadas tarefas agrícolas como, por exemplo, preparar a terra para o plantio. Na literatura científica é possível encontrar diversos trabalhos relacionados à robótica móvel agrícola. As primeiras gerações incluem o *Aurora* (MANDOW *et al.*, 1996; GÓMEZ-DE-GABRIEL *et al.*, 1996; MANDOW MUÑOZ *et al.*, 1995, OLLERO *et al.*, 1995, MANDOW GÓMEZ-DE-GABRIEL *et al.*, 1995, MANDOW MARTÍNEZ *et al.*, 1995), uma plataforma para navegação autônoma e teleoperada em ambiente agrícola, o *Six-Wheeled Omnidirectional Autonomous Mobile Robot - Utah State University* (MOORE *et al.*, 1999; MOORE & FLANN, 2000), veículo agrícola autônomo com seis rodas independentes, o *Autonomous Crop Treatment Vehicle* (HAGUE *et al.*, 2000 e HAGUE & TILLET, 1996.) para uso em horticultura, o *Halmstad*, desenvolvido na *Halmstad University* - Suécia (ÅSTRAND & BAERVELDT, 2002), que consiste de um robô agrícola móvel para controle de ervas invasoras e o *Autonomous ChristmasT Weeder* desenvolvido pela *Royal Veterinary and Agricultural University*– Dinamarca (BLACKMORE HAVE *et al.*, 2002 e HAVE *et al.*, 2005), que consiste de um veículo autônomo para controle mecânico de ervas daninhas em áreas cultivadas com “árvores de natal”.

Desenvolvimentos posteriores geraram o *SOLERO* e o *SHRIMP*, desenvolvidos no *Eidgenössische Technische Hochschule – Swiss* (SIEGWART & NOURBAKHS, 2004), que são robôs agrícolas especialmente desenvolvidos para superar obstáculos, o *Autonomous Platform and Information system*, do *Department of Control and Engineering Design da Technical University of Denmark* (BAK & JAKOBSEN, 2004; BISGAARD *et al.*, 2004 e MADSEN & JAKOBSEN, 2001), o qual foi projetado especificamente para uso agrícola em linhas de plantio baixas e em terreno limpo, o *Weed Robot* (RUCKELSHAUSEN *et al.*, 2006) para o controle mecânico de plantas invasoras, o *Autonomous tractor from the Copenhagen University* (MEJNERTSEN & RESKE-NIELSEN, 2006; MOGENSEN *et al.*, 2007; RESKE-

NIELSEN et al., 2006; BLACKMORE, S. et al., 2004; BLACKMORE et al., 2007; BLACKMORE, SIMON VOUGIOUKAS, STAVROS et al., 2004; BLACKMORE, SIMON GRIEPENTROG, HANS WERNER et al., 2004; BLACKMORE et al., 2001; BLACKMORE FOUNTAS et al., 2002) que foi concebido para operar em ambientes externos e não controlados de forma autónoma e o *Hortibot*, desenvolvido no *Danish Institute of Agricultural Sciences no Department of Agricultural Engineering da AARHUS University*– Dinamarca (JØRGENSEN et al., 2006; JØRGENSEN et al., 2007; SØRENSEN et al., 2006; NØRREMARK et al., 2006 e SØRENSEN et al., 2007), veículo autónomo destinado ao corte de grama e capina.

Plataformas mais recentes envolvem o *Weeding robot from the University of Wageningen– Netherlands* (BAKKER et al., 2007; BAKKER, 2009; BAKKER et al., 2009; BAKKER et al., 2006), projetado para realizar o controle de plantas invasoras em culturas de hortaliças, o *Autonomous Rice Transplanting - Department of Farm Mechanization and Engineering, National Agricultural Research Center* - Japão (NAGASAKA et al., 2004 e NAGASAKA et al., 2009; NAGASAKA, 2008; NAGASAKA et al., 2007; NAGASAKA et al., 1999; NAGASAKA et al., 2002), que consiste de um veículo transplantador de arroz que opera de forma autónoma, o *SAVAGE - Supportive Autonomous Vehicle for Agriculture*, do *Department of Agriculture, Crop Production, and Agricultural Environment da Universidade de Thessaly* – Grécia (SAVAGE, 2010), que consiste em um veículo autónomo de baixo custo projetado para desempenhar tarefas específicas dentro dos limites de um campo.

Alguns modelos de robôs agrícolas móveis considerados mais relevantes para o presente trabalho são apresentados na Tabela 1, onde são destacadas suas características básicas estruturais, seus sensores e atuadores e sua estrutura de controle. Os modelos descritos estão dispostos da seguinte forma: o primeiro é um trator comercial modificado para se tornar uma máquina autónoma, seguido de duas plataformas robóticas específicas para agricultura, sendo que a primeira utiliza motores elétricos na guiagem e na propulsão e a segunda utiliza atuadores hidráulicos e a tabela é finalizada com o AgriBot (TABILE, 2012), robô agrícola móvel utilizado para pesquisa e desenvolvimento na EESC-USP.

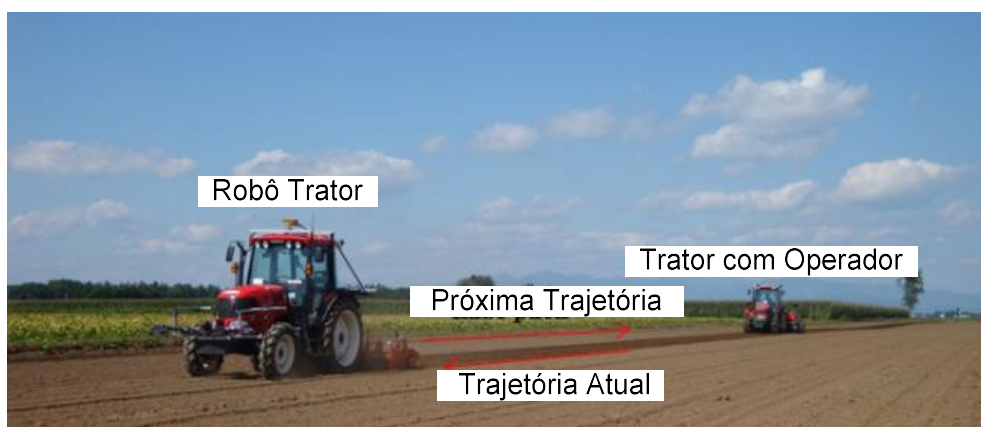
Tabela 1 - Plataformas Robóticas Móveis Agrícolas

Figura	Nome/Características	Mód. Controle	Sensor/Rede	Referencias
	Trator Autônomo. Veículo agrícola comercial de pequeno porte.	Transmissão Continuamente Variável; ECU (Unidade de Contr. Eletrônico)	GPS RTK; Botões de emergência; CAN.	GRIEPENTROG et al., 2009
	Trator Autônomo (V2). Veículo agrícola comercial de pequeno porte.	Válvulas hidráulicas para o esterçamento das rodas dianteiras	Telemetria a laser; Visão estérea; Chaves de emergência;	GRIEPENTROG et al., 2009
	SAVAGE. Plataforma mecânica robusta para uso geral, baseada em uma arquitetura aberta, para diferentes subsistemas.	Unidade principal de controle e é baseada em um computador industrial; Eletromecânico.	GPS; Bússola.	SAVAGE, 2010
	BoniRob. A Plataforma possui um chassi complexo, o qual possibilita o ajuste da largura de faixa e a altura. Cujas funções é adaptar-se às diferentes situações encontradas.	Computador industrial; Hidráulico com sistema de guagem independente.	Telemetria laser 2D e 3D; acelerômetros; ultrassom; Giroscópio; RTK-DGPS; Ethernet; CAN; Wireless;	KLOSE et al., 2010; RUCKELSHAUSE N et al., 2009; WEISS; BIBER, 2009.
	BoniRob (V2). Robustez aumentada com a finalidade de proporcionar o uso em ambientes externos. Adequações a sua estrutura, Fez da versão uma plataforma reutilizável que pode servir para vários fins agrícolas.	"BoniRob Aplicativos" é comparável à combinação trator/implementos sendo que os aplicativos podem ser integrados mecanicamente, eletricamente e através de interfaces lógicas	Telemetria laser 2D e 3D; acelerômetros; ultrassom; Giroscópio; RTK-DGPS; Ethernet; CAN; Wireless;	SELLMANN et al., 2014.
	AgriBot. Plataforma robótica modular.	PC industrial; Dois Módulos de Controle; Hidráulico.	GPS; Encoders; IMU. CAN.	TABILE, 2012.

Fonte: Próprio autor

A utilização de máquinas convencionais que passam por um processo de automação não se restringe mais somente à navegação, ganharam novos sensores além dos que já vinham sendo empregados, que melhoraram significativamente sua acuracidade, tornando possível o desenvolvimento de outras aplicações. Um exemplo é o trabalho realizado por Yang (YANG e NOGUCHI, 2014), onde os autores utilizaram um robô trator equipado com sensores similares aos dos exemplos anteriores, um sensor laser e um sistema de visão, o qual possui quatro câmeras e um transmissor de vídeo sem fio. Tais recursos possibilitaram uma significativa redução no tempo de algumas operações agrícolas, como, por exemplo, o plantio. Outra vantagem está relacionada à operação, já que um único operador consegue dirigir o trator e, por meio de acesso remoto, monitorar e tomar decisões de controle sobre o mesmo. Esse sistema foi projetado para funcionar com o operador humano seguindo e acompanhando as atividades exercidas pelo robô que vai a frente. Na Figura 2 é mostrado o sistema em operação.

Figura 2 - Trabalho com associação de sistemas



Fonte: Adaptado de Yang & Noguchi (2014)

No segmento da agricultura de precisão, existem diversas linhas de pesquisas relacionadas a plataformas robóticas agrícolas móveis. Entre elas, pode-se destacar o desenvolvimento de algoritmos de controle e fusão sensorial, e estratégias de navegação autônoma. Para tal, a utilização de plataformas de pequeno porte apresenta algumas vantagens como, por exemplo, baixo consumo de energia, facilidade de transporte para realizar os testes em ambientes externos. Um exemplo de plataforma de pequeno porte é o Agrobot (DURMUS, et al., 2015), que possui seis rodas, enquanto a maioria das plataformas possuem apenas quatro. O protótipo pode ser visto na Figura 3. Essa configuração tem como objetivo aumentar a eficiência produtiva no setor agrícola e, com sua capacidade de processamento, realizar o

acompanhamento de operações de campo, tais como pulverização, fertilização, diagnóstico de doenças, análise de solo, entre outras atividades ligadas a agricultura de precisão.

Figura 3 – Versão final do Agrobot

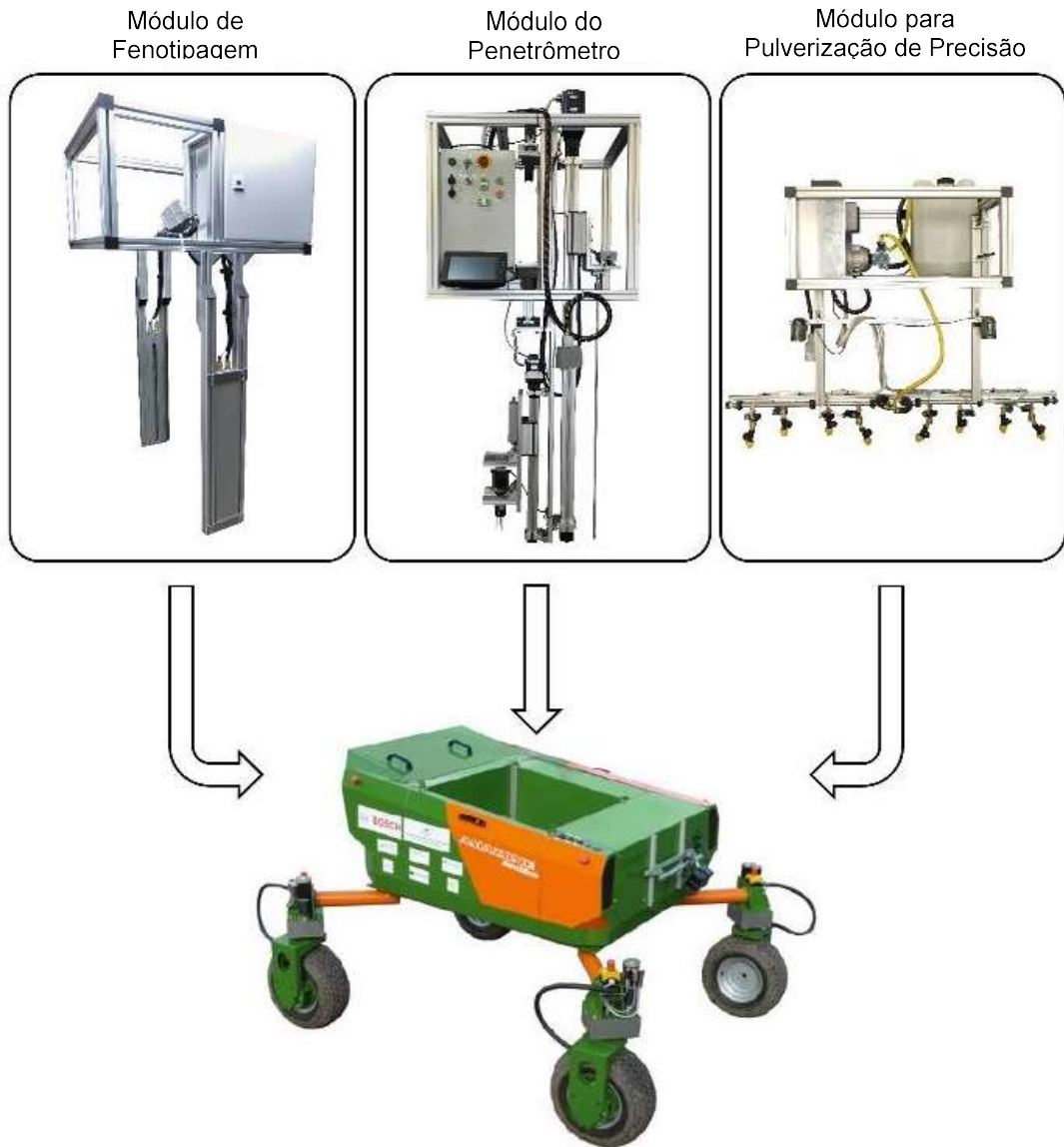


Fonte: Durmus, et al. (2015)

Existem ainda plataformas robóticas de maior porte, capazes de carregar módulos que são empregados no manejo de culturas e no sensoriamento remoto em agricultura de precisão. Um exemplo é o robô multifuncional BoniRob (SELLMANN et al., 2014), o qual consegue navegar de forma autônoma no campo e ainda conta um atuador mecânico, utilizado para o controle de ervas daninhas. Também possui um sistema de câmeras síncronas e unidades de iluminação capazes de gerar variados comprimentos de ondas, que possibilita a captura de imagens de alto contraste das plantas.

A sua estrutura ainda permite o acoplamento de diferentes módulos utilizados na agricultura de precisão, chamados de aplicativos, os quais são padronizados e de fácil substituição, adequando-se rapidamente ao BoniRob para executar missões específicas. Exemplos desses aplicativos e o robô podem ser vistos na Figura 4. Os módulos que se acoplam ao robô são: um equipamento que realiza a fenotipagem de plantas, um penetrômetro para realizar a coleta de solo para análise laboratorial e um sistema de pulverização de precisão.

Figura 4 – Conceito de Módulos do BoniRob



Fonte: Adaptado de Sellmann et al. (2014)

O BoniRob, atualmente faz parte de um projeto denominado *RemoteFarming.1* e seus idealizadores (SELLMANN et al., 2014) buscam promover a interação Homem-Máquina utilizando serviços *Web*, para realizar o combate de ervas daninhas. Para tal, primeiramente se faz a detecção e a identificação, a qual é realizada remotamente via *Web* por um operador, que marca as ervas daninhas em imagens capturadas pelo robô no campo. Na sequência, um atuador mecânico instalado no robô desloca-se para as posições que foram marcadas no campo e elimina as plantas daninhas.

2.1.1 Sensores Utilizados em Plataformas Robóticas Móveis Agrícolas

Os sensores de um robô agrícola móvel têm como característica principal a orientação da plataforma, reportando informações sobre seu funcionamento durante a operação e também realizando a aquisição de dados de campo, os quais são utilizados no contexto da Agricultura de Precisão.

A utilização de sensores na robótica móvel está diretamente relacionada com seu campo de atuação (SECCHI, 2008). Dessa forma, seu uso tem basicamente dois papéis fundamentais: monitorar as funções do Robô e aquisição de dados de campo, ambas descritas a seguir.

Funções do Robô – Os sensores que estão relacionados às funções do robô, em sua grande maioria, são conhecidos como proprioceptivos (internos), e são responsáveis por obter informações a respeito do funcionamento da plataforma robótica, tais como velocidade, deslocamento, temperatura, sentido, entre outros. Exemplos incluem a odometria visual, que define uma estimativa *online* e incremental do robô em movimento a partir de uma sequência de imagens geradas por uma ou mais câmeras instaladas no mesmo (MATTHIES, 1989 e GONZÁLEZ et al., 2011) e a utilização de uma bússola magnética, para indicar a direção e o sentido do robô durante sua navegação (GONZÁLEZ et al., 2011).

No âmbito da robótica agrícola, devido ao ambiente de trabalho não estruturado, se torna comum o emprego de sensores exteroceptivos (externos), os quais estabelecem uma relação direta com o ambiente, cuja percepção determina o estado atual do robô (SECCHI, 2008; EVERET, 1995; PIERI, 2002). Tais sensores são classificados seguindo alguns critérios como, por exemplo, o princípio de funcionamento, o tipo de informação, o tipo de sinal, entre outros. Além disso, estes sensores podem ser separados em grupos. No trabalho de Hague (HAGUE; MARCHANT e TILLET, 2000), os autores categorizaram os sensores comumente utilizados em robôs agrícolas móveis em três classes: medição de movimento (odômetro, unidade inercial de medida), marcos artificiais (posicionamento a laser e por GPS) e detecção de recurso local (sonar, visão de máquina).

Na Tabela 2, são apresentados os principais tipos de sensores que estão ligados às funções básicas do robô, sendo que um estudo mais detalhado sobre sensores empregados na robótica agrícola móvel pode ser encontrado nos trabalhos de (PIERI, 2002; SECCHI, 2008; SIEGWART e NOURBAKHS, 2004).

Tabela 2 - Classificação dos sensores em robótica

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

Fonte: Adaptada de Secchi (2008)

Aquisição de Dados de Campo: é realizada por sensores embarcados em uma plataforma robótica agrícola, e está relacionada à coleta de informações obtidas no campo. Para tal podem ser utilizados sensores como, por exemplo, o óptico que pode ser utilizado para medir o vigor das plantas por meio de refletância das folhas, o sensor de condutividade do solo, câmeras para aquisição de imagens, além de equipamentos de amostragens do solo para análises físico-químicas.

Integração Sensorial

Os atuais sistemas embarcados em plataformas robóticas móveis tornaram-se mais complexos e, como consequência, proporcionaram um aumento significativo na quantidade de sensores utilizados para adequar a plataforma às inúmeras condições impostas por um processo como, por exemplo, a navegação em um ambiente agrícola, onde são usados diversos sensores dos mais variados tipos e modelos, além de uma série de equipamentos para realizar a medição dos estados de um robô móvel em operação. Porém, para que se obtenha uma resposta eficiente é necessária a utilização de um método de integração sensorial, considerando o fato de que parte dos sensores convencionais sozinhos não conseguem gerar uma resposta satisfatória se tratando de navegação (EMMI, et al., 2014).

Existem vários métodos de integração sensorial. Uma das possibilidades é combinar os sinais de sensores inerciais com os não-inerciais, técnica conhecida como fusão sensorial, e consiste de um algoritmo computacional resultante de um modelo matemático, cujo objetivo é determinar um conjunto de propriedades, representadas por um vetor de estados (SANTANA, 2011). A Tabela 3, a seguir, correlaciona alguns parâmetros comuns utilizados para navegação de robôs agrícolas móveis com sensores convencionais de amplo uso em veículos *off-road*, tendo como finalidade, auxiliar na definição dos estados do veículo autônomo, medido com sensores de natureza diversificada (ROVIRA-MÁS et al., 2010).

Tabela 3 - Fonte de dados de navegação para robôs agrícolas.

Sensores	Posição	Tempo	Velocidade	Designação (Yaw)	Atitude (pitch/roll)
GNSS	Seqüência direta GGA	Seqüência direta GGA	Seqüência diretaVTG Seqüência derivada	Seqüência diretaVTG Seqüência derivada Dois Receptores	Dois Receptores
Giroscópio / IMU	estima direção e distância		Taxa de Guinada	Por meio de uma integração	
Radar	estima direção e distância		Direto		
Bússola				Direto	
Visão de Máquina	Local, derivado de recursos		Fluxo de vídeo Derivado	Local, derivado de recursos	

Fonte: Adaptado de Rovira-Más et al., (2015).

Observando o conteúdo da Tabela 3, nota-se que o radar é basicamente utilizado para fornecer uma estimativa independente da velocidade no solo, os giroscópios e bússolas são mais apropriados para definir a posição angular e a visão de máquina que está limitada à percepção do ambiente, o que pode não ser apropriado para veículos *off-road* em ambientes não estruturados onde ocorrem deslizamento lateral do veículo (ROVIRA-MÁS et al., 2015). Para tal, obter uma boa estimativa de estados como, por exemplo, a velocidade lateral do veículo e a taxa de aceleração, podem ser fundamentais para melhorar o controle de direção. Desta forma, as velocidades diferenciais em todas as rodas contribuem efetivamente para o melhor desempenho do veículo.

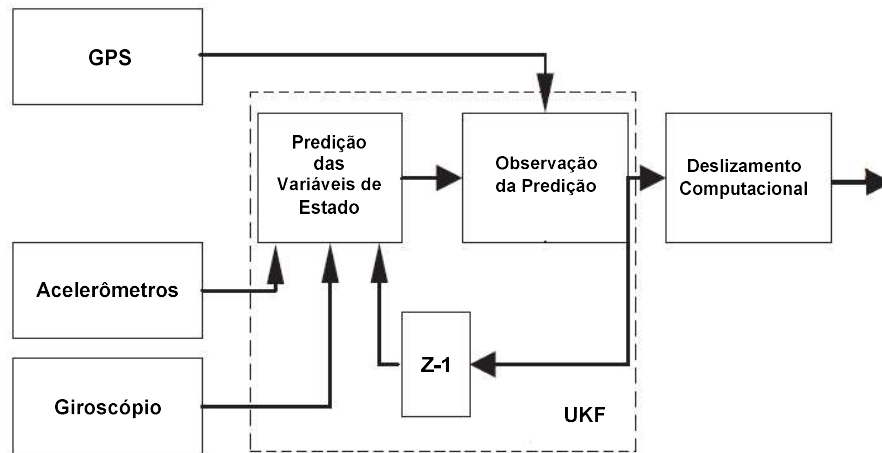
Para conseguir melhor desempenho e um controle eficaz das rodas, pesquisas levam à utilização de uma combinação entre sensores de odometria, com unidades inerciais de baixo custo, e GPS (KADMIRY, 2015; HAY, 2005; REZAEI e SENGUPTA, 2005). Nesse caso, em aplicações empregando mais de um modelo de sensor, destacam-se os métodos de análises estatísticas, os quais já são utilizados para realizar a fusão sensorial há alguns anos. Os mais aplicados são descritos a seguir:

1. Mínimos quadrados – em seu trabalho, Mizushima (MIZUSHIMA et al., 2002), utilizou o método dos mínimos quadrados para desenvolver um sistema de navegação para uma plataforma robótica agrícola, empregando sensores de baixo custo, incluindo DGPS para posicionamento, dois inclinômetros para medida de inclinação e três giroscópios para estimar a posição angular e os ângulos de rotação/inclinação. Para erros derivados de giroscópios e estimativa de posição, foi aplicado na fusão sensorial o método dos mínimos quadrados considerando o modelo dinâmico do veículo. Tal combinação apresentou bons resultados.
2. Redes bayesianas - método estatístico que pode ser utilizado para aumentar a precisão de um sensor de baixo custo, que geralmente não possui boa resolução e apresenta bastante ruído em seu sinal. Embora pouco estudado para o emprego em robôs móveis agrícolas, no trabalho de Tripathi (TRIPATHI et al., 2014) foi utilizada uma rede bayesiana para integrar as informações obtidas a partir de dois sonares e dois sensores laser, cujos dados foram combinados para realizar a identificação de diferentes objetos.
3. Filtro de Kalman – juntamente com suas extensões é um método estatístico bastante utilizado para realizar a fusão sensorial aplicada em robôs agrícolas. Devido a isso e ao fato de ser o método de fusão utilizado pelo presente trabalho, algumas aplicações encontradas na literatura científica serão expostas a seguir de forma simplificada.

O primeiro exemplo a ser abordado é o trabalho de Anderson (ANDERSON & BEVLY, 2010), no qual os autores propuseram medir a velocidade a partir da combinação de um GPS com um Giroscópio de baixo custo, por meio de um estimador baseado em Kalman. Tal experimento, apesar de complexo, permitiu mensurar alguns estados do veículo, entre eles, o escorregamento lateral, a taxa de guinada, além da direção e velocidade de deslocamento.

Outro exemplo, de estimativa utilizando uma variação do filtro de Kalman, pode ser visto de forma detalhada em Jiao (JIAO et al., 2014), onde os autores utilizaram o UKF (*Unscented Kalman Filter*), que é um filtro de regreção linear, em uma aplicação agrícola utilizando um trator de esteira. Um diagrama referente a essa implementação pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Estrutura do Sistema de Avaliação



Fonte: Adaptado de Jiao, et al. (2014)

Analisando a estrutura do UKF, mostrada na Figura 5, nota-se que o filtro utiliza os sinais do acelerômetro e do giroscópio, juntamente com o valor das variáveis de estado do robô e fornece o valor referente à predição do próximo estado do robô. Na sequência, o resultado da predição, junto com os dados fornecidos pelo GPS, gera o sinal de saída do filtro Kalman. Nesse modelo de aplicação do UKF, o autor controlou o fluxo dos dados de saída utilizando um método conhecido como janela deslizante, que é um protocolo de entrega de mensagens ordenado e confiável, o qual primeiramente garante se a conexão está ativa para iniciar o envio de dados, garantindo que as mensagens, quando enviadas, cheguem a seu destinatário sem que sejam corrompidas e na ordem correta de envio.

Para realizar o experimento foi utilizando um método com deslizamento lateral conhecido, construído com base no modelo cinemático do trator robô e dessa forma foi possível considerar os deslizamentos longitudinal e lateral, sendo que o parâmetro desconhecido do deslizamento é estimado pelo UKF com os dados dos sensores e do GPS. A análise do experimento demonstrou que o sistema pode estimar as variáveis de deslizamento, mesmo alterando os parâmetros do deslizamento lateral, indicando robustez no sistema de estimativa que foi proposto.

Além dos métodos estatísticos citados, também existem outros métodos para realizar a fusão sensorial como, por exemplo, as redes neurais e a lógica *Fuzzy* com um algoritmo de aprendizagem (KOBAYASHI, 2001). Santiago (SANTIAGO et al., 2014) desenvolveu e implementou um sistema de controle baseado em redes neurais, o qual foi aplicado em um robô móvel para evitar o choque com algum obstáculo durante seu deslocamento e em tempo real. Nesse experimento, foram desenvolvidas estratégias para tomada de decisão com base nos dados disponibilizados por sensores de ultrassom, tendo como meta evitar obstáculos. Porém, apesar dos experimentos apresentarem bons resultados, eles foram realizados em ambiente estruturado e com uma plataforma de pequeno porte, sendo constatado que para pesquisas com aplicações mais avançadas, se faz necessário utilizar um outro modelo de rede neural e o emprego de mais dois sensores, um giroscópio e uma bússola para garantir a posição do robô no espaço.

Kadmiry (KADMIRY, 2015) fez uso de um EKF (*extended Kalman filter*), com o objetivo de aperfeiçoar a estimativa dos dados sensoriais, atenuando o efeito ruidoso ao realizar uma fusão, além de implementar um modelo de navegação de um robô móvel, baseado em abordagem FGS (*Fuzzy Gain Scheduled*), no domínio de tempo contínuo. Para tal o autor projetou um FGS EKF para aplicações robóticas, baseando-se no modelo não linear de direção do escorregamento – SSMR (*Skid-Steered Mobile Robot*). No projeto o autor utilizou como parâmetro uma modelagem não linear e dinâmica SSMR, e aplicou uma velocidade com sentido oposto nas rodas para gerar um escorregamento lateral, além de considerar os ruídos existentes no processo e nos sensores de uma IMU, um GPS e da odometria.

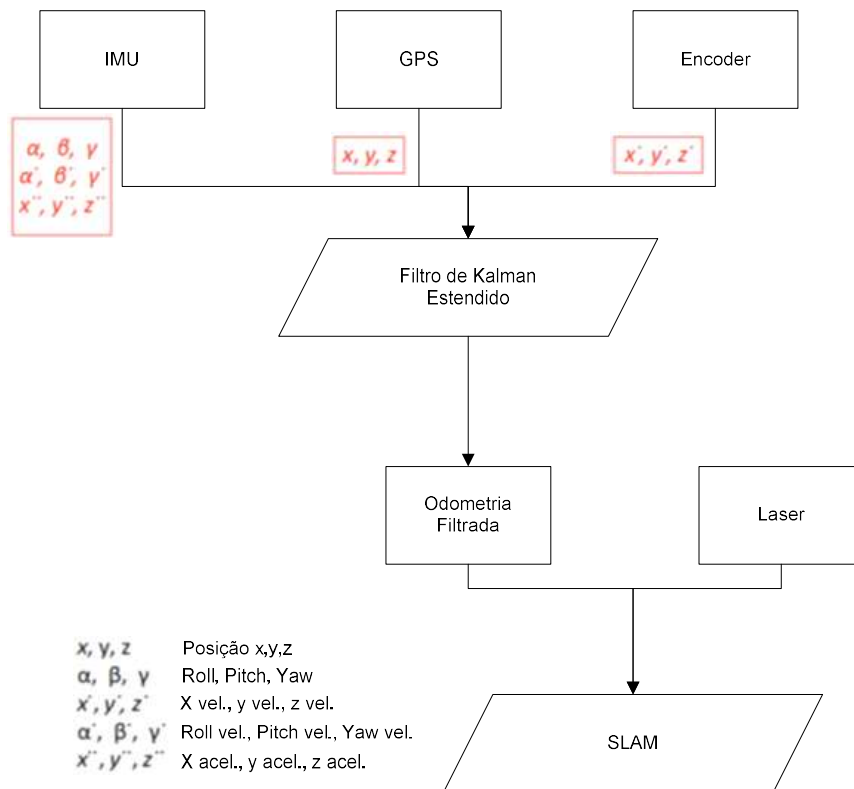
A vantagem da utilização dessa abordagem está no modelo local linearizado no FGS, cuja finalidade é a não necessidade de se calcular o jacobiano dos modelos não lineares, que uma vez sendo mal classificado tem impacto direto na estabilidade do robô. Além disso, tem o benefício do controle ser verificado localmente, facilitando sua sintonização. Segundo o autor, o FGS EKF tem como característica um melhor funcionamento quando comparado a uma abordagem baseada no modelo não linear que utiliza o Jacobiano. Porém, desigualdades matriciais devem ser consideradas na obtenção de uma observação robusta e precisa.

Em trabalhos mais atuais também se utiliza o EKF para realizar fusão sensorial. Um exemplo pode ser encontrado no trabalho de Gan (GAN & LEE, 2018), que está relacionado ao desenvolvimento de robôs autônomos, com capacidade de navegação, os quais poderiam poupar a tarefa de dirigir além de fornecer localizações precisas para realizar tarefas em fazendas inteligentes. Para tal, foi utilizado como *Software* principal o *Robot Operating System*

(ROS), tendo como elementos principais o Nó, que é um processo em execução que realiza cálculos e tópicos cuja função é realizar a comunicação entre diferentes nós. Com base no ROS, foi desenvolvido um método de comunicação via *WiFi*, para envio de dados entre o computador embarcado e um remoto, que armazena e visualiza os dados e envia comandos para o robô quando necessário.

Em seu sistema de navegação, são utilizados, para realizar o sensoriamento, GPS, IMU, encoder, LIDAR e sensor RGB do *Kinect*. Usou-se o GPS, a IMU e os encoders de roda, integrados por um filtro de Kalman estendido para fornecer informação de odometria. Combinando os dados com os do LiDAR se obtém a localização simultânea e o mapeamento (SLAM), possibilitando ao robô seguir um caminho planejado por mapas gerados em um servidor remoto e navegar com base em varreduras laser. O esquemático dessa configuração pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Esquemático do sistema desenvolvido



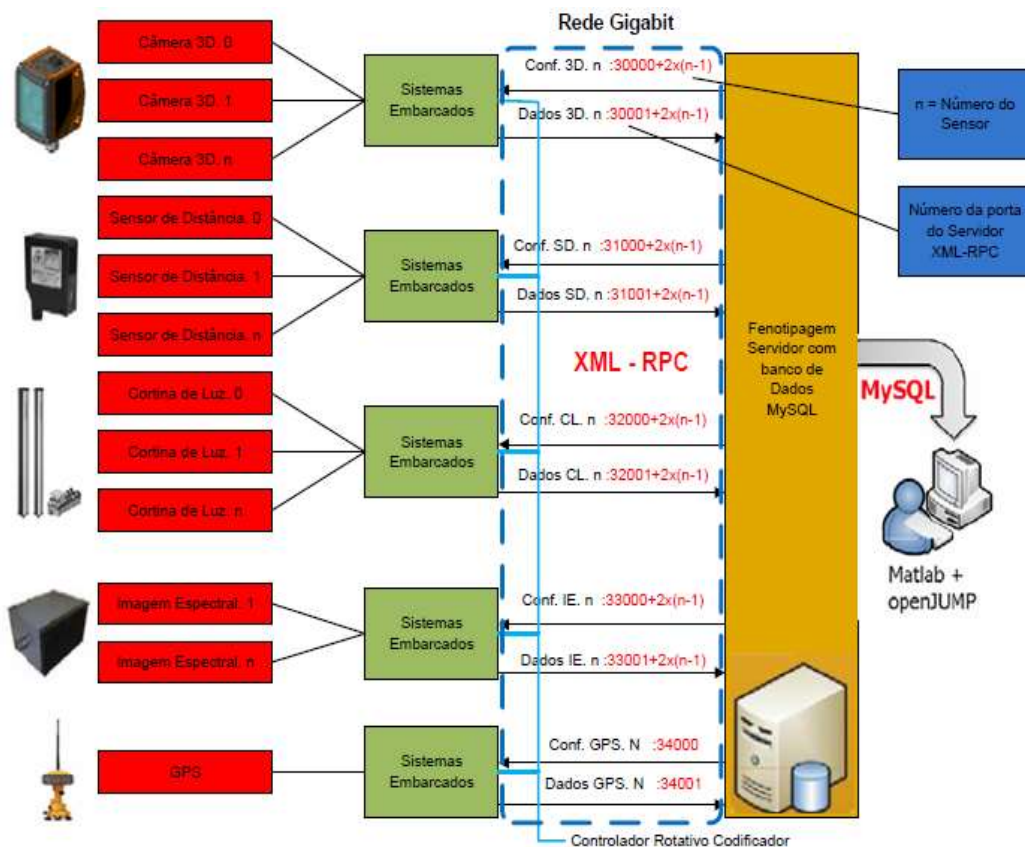
Fonte: Adaptado de Gan & Lee, (2018)

O resultado obtido com a aplicação descrita demonstrou a possibilidade dos dados sensoriais e o status do robô, serem monitorados e registrados a partir de uma estação da fazenda

em tempo real. O sistema também utilizou um computador remoto para interromper e controlar o robô manualmente em situações de emergência, sendo sua comunicação com o robô estabelecida via uma rede *WiFi*. Com esta configuração, outros sistemas e sensores poderiam ser adicionados facilmente.

A fusão sensorial não se limita apenas à navegação de plataformas, sendo também utilizada em aplicações agrícolas como, por exemplo, na fenotipagem de plantas, a qual tem sua arquitetura e o tipos de sensores utilizados nessa técnica descritos no trabalho de Ruckelshausen (RUCKELSHAUSEN, 2009), sendo configurada pelo seguinte modelo, mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Estrutura do sistema de integração de sensores



Fonte: Adaptado de Ruckelshausen (2009)

Um exemplo mais atual é a técnica utilizada por Emmi (EMMI et al., 2014), para detecção de ervas daninhas, onde se utiliza a visão de máquina para detectar o centro das linhas de uma cultura e as ervas daninhas presentes, enquanto o robô segue por um caminho pré-estabelecido e definido por pontos de GPS.

2.1.2 Navegação e Planejamento de Trajetória para Plataformas Robóticas Móveis

A navegação é um tema bastante abrangente no que diz respeito à robótica móvel, e pode ser definida como a capacidade de se localizar de forma precisa em seu ambiente de trabalho, possuir recursos para tomada de decisão de forma dinâmica e ter o controle de suas ações durante a navegação autônoma (CAI & LI, 2013). O conceito de navegação é um assunto muito extenso e complexo de ser estudado, por isso, alguns autores sugerem a separação de suas principais tarefas. Um exemplo pode ser visto no trabalho de Vougioukas (VOUGIOUKAS et al., 2005), onde os autores propõem a seguinte divisão:

1. Inicialização da Tarefa
2. Calibragem da Tarefa
3. Planejamento de Trajetória
4. Controle de Trajetória
5. Assistir - e - Esperar
6. Desvio de Obstáculos
7. Falha de Tarefa
8. Conclusão de Tarefa

As tarefas enumeradas acima podem ser consideradas reativas ou determinísticas. Por exemplo, o rastreamento do caminho, é um modo puramente determinístico, enquanto o desvio de obstáculos é totalmente reativo. Nesse contexto, na literatura científica é possível encontrar inúmeros trabalhos que propõem diversos métodos reativos ou determinísticos, os quais têm como objetivo comum e principal conduzir uma plataforma robótica móvel em um ambiente, seja ele estruturado ou não, conduzindo o robô para uma posição designada evitando colisões e de forma precisa (CHINAG & DING, 2014).

O tema navegação já vem sendo estudado a um bom tempo. Um exemplo é o trabalho de Silva (SILVA, 2008), onde a autora afirmou que um robô móvel pode realizar uma navegação reconhecendo sua posição através de informações coletadas por um sistema sensorial e confrontando-as com um mapa global do ambiente, com uma representação de sua estrutura física. Porém, esse tipo de abordagem se mostra eficiente somente em ambientes estruturados, o quais permitem confeccionar um mapa do recinto considerando suas dimensões, e ainda,

definir a posição e o volume dos possíveis obstáculos que o robô encontrará em sua trajetória enquanto executa uma missão. Robôs que operam em ambientes estruturados, em sua maioria utilizam sensores infravermelhos, e um sistema de rastreamento de linha. Dessa forma, sua operação se limita a atividades realizadas em ambientes pré-construídos, e sua condução está baseada em linhas de visão infravermelho.

Um modelo de aplicação com as características descritas pode ser visto em Mariappan (MARIAPPAN et al., 2009), onde os autores utilizam um dispositivo de rastreamento óptico (OTD) para fornecer as coordenadas exatas da localização atual do robô. Essa forma, com a navegação sendo baseada em um mapa existente, favorece a resolução de alguns problemas como, por exemplo, sua localização em relação ao ambiente, planejamento de trajetórias e a possibilidade de verificar se a posição final desejada foi atingida ou não.

Para as demais tarefas, se faz necessária a utilização de algum tipo de descrição ou representação do espaço. Além disso, para que ocorra a realização de trabalhos ou missões mais complexas de forma eficiente na robótica móvel autônoma, os robôs precisam ter a capacidade de criar, adquirir e conservar os modelos referentes ao ambiente no qual executam sua tarefa ou missão. Na exploração de ambientes não estruturados, por exemplo, o robô navega adquirindo informação para a construção do seu próprio mapa. Neste caso, surge uma tarefa adicional; o robô precisa se localizar de forma precisa e autônoma enquanto constrói o mapa do ambiente que está navegando (SILVA, 2008).

Outro fator não menos importante está relacionado ao planejamento de trajetória de um robô móvel, que basicamente é encontrar um caminho livre de colisão e otimizado e, a partir de um ponto inicial ou um referencial, se locomover até uma determinada posição em seu ambiente de navegação, obedecendo alguns critérios como, por exemplo, a distância de locomoção, o tempo gasto para executar a tarefa e a energia consumida pelo robô (CHINAG & DING, 2014; RAJA & PUGAZHENTHI, 2011).

Seguindo essa vertente, pesquisas que estão diretamente relacionadas com a navegação de plataformas robóticas móveis vêm diversificando suas abordagens, desenvolvendo e aprimorando seus métodos, os quais utilizam as mais variadas técnicas e ferramentas computacionais. Exemplos deste tipo de aplicação pode ser encontrado em Luo (LUO et al., 2014) onde os autores desenvolveram um algoritmo e empregaram uma técnica baseada em sensoriamento, utilizando como ferramenta uma rede neural para navegação e mapeamento de um robô móvel autônomo, em um ambiente completamente desconhecido, com respostas em tempo real e evitando colisões. Outra solução utilizada para evitar obstáculos em movimento é

encontrada no trabalho de (CHINAG & DING, 2014). Nele os autores estabeleceram um intervalo tempo de segurança para o robô organizar seu caminho. Tal método diminui o número de estados que precisam ser pesquisados, não sobrecarregando o sistema e otimizando o tempo de planejamento da ação seguinte. Essa abordagem consiste em um método de navegação e um planejamento de trajetória dinâmica.

A parte estática utiliza um controlador de lógica *Fuzzy* na identificação de obstáculos que se encontram parados. Se o obstáculo tiver um comportamento dinâmico, o robô ao detectar o mesmo é capaz de identificar parâmetros como velocidade e direção do movimento. A partir dos dados obtidos, gera uma tabela de previsão de trajetória e com base nessa tabela, o controle do robô consegue identificar se existe a possibilidade de haver colisão, e o planejador de trajetória dinâmico utiliza a estratégia de espera para aguardar a passagem do objeto ou traça um novo caminho para desviar da rota de colisão. Este método é intuitivo e eficaz, sendo capaz de prever a trajetória dos obstáculos dinâmicos, ao serem detectados pelo robô (WU e FENG, 2012; SUN et. al., 2014 e PHILLIPS E LIKHACHEV, 2011).

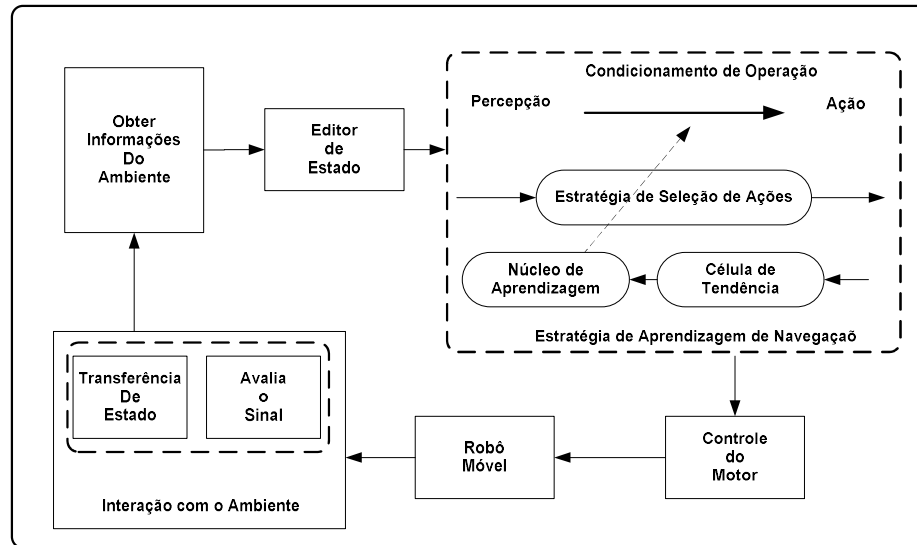
Experimentos como o descrito geralmente são realizados em ambientes estruturados e conhecidos ou em maquetes com objetos móveis, com sentido de movimento e velocidades conhecidos. Também, o ambiente pode ser simulado por meio de *Software*, durante a realização dos experimentos. Tal procedimento é descrito em Cai (CAI & LI, 2013) onde as autoras o chamam de estratégia de aprendizagem biônica, e está baseada no condicionamento da navegação do robô móvel autônomo, interagindo com o ambiente repetidas vezes até alcançar seu objetivo. Um diagrama utilizado para descrever o método de simulação pode ser visto na Figura 8, o qual é dividido em dois módulos:

- Módulo estratégia de aprendizagem de navegação – recebe informação do ambiente, depois de passar pelo editor de estados, e informação gerada internamente, resolvendo dessa forma o mapeamento do espaço de estados e gerando uma ação correspondente, mantendo o robô em interação com o ambiente. Dessa forma, o processo de aprendizagem de navegação consegue antecipar ações via aprendizagem e treinamento.
- Módulo de interação com o ambiente – nesse processo o robô aprende continuamente sobre a navegação que está sendo executada e o ambiente onde ele está inserido, sendo que as informações são utilizadas para gerar novas interações e estimular a melhor ação

a ser tomada pelo robô. Assim, gradativamente o robô vai se adaptando ao ambiente devido à repetição de interações.

O uso do sistema proposto pressupõe o deslocamento do robô móvel em um ambiente desconhecido, partindo de um ponto inicial até uma meta determinada sem que ocorra colisão com obstáculos durante o trajeto.

Figura 8 - Estratégia de Sistema de Navegação Utilizado na Simulação



Fonte: Adaptado de Cai & Li (2013)

Para realizar a simulação de ambientes desconhecidos foi utilizado o *Software Robotsim*. Segundo as autoras, o método desenvolvido apresenta algumas vantagens como, por exemplo, rápida aprendizagem autônoma e capacidade de navegação precisa. Também foi observado que se obteve sucesso em realizar desvios de obstáculos e na otimização de trajetória para alcançar seu objetivo. Além disso, foram comprovados os efeitos benéficos da simulação para o robô, apresentando melhores resultados em relação à utilização de campo artificial ou maquete.

Os métodos e técnicas exibidas acima, em sua maioria, são muito utilizados e apresentam bons resultados em ambientes estruturados empregando plataformas robóticas móveis de pequeno porte.

Técnicas de Navegação e Planejamento de Trajetória para Robótica Móvel Agrícola

As ferramentas computacionais, algoritmos e sensores utilizados para a navegação e controle de trajetória de plataformas robóticas agrícolas são similares aos apresentados anteriormente. Porém, o que os diferencia são suas aplicações e implementações. Um fator

relevante é o fato de que o ambiente de trabalho geralmente não é estruturado, expondo o robô a realizar operações em terrenos irregulares, com grande diversidade de solos, alterações climáticas, entre outros fatores, os quais tem influência direta nas condições operacionais do robô agrícola móvel enquanto executa sua missão.

Estudos de caso, envolvendo questões relacionadas a sistemas de navegação de veículos autônomos para agricultura, podem ser encontrados no trabalho de revisão realizado por Mousazadeh (MOUSAZADEH, 2013). Nele, o autor trata as técnicas, conceitos e equipamentos utilizados nesse segmento da robótica móvel, fazendo um levantamento sobre os principais recursos empregados para a navegação em um ambiente agrícola até 2013, destacando em seu trabalho alguns dos principais algoritmos utilizados na robótica agrícola móvel. Entre eles:

- Navegação baseada em processamento de imagens - a navegação baseada em visão de máquina tem sua aplicação voltada para evitar obstáculos, detecção de linha de plantio e processos de locomoção. Geralmente utilizada em modo exploratório tem como desvantagem a falta de confiabilidade para operações de campo. Isso se dá devido à variação na luminosidade. A técnica tem evoluído com as inovações tecnológicas e vem sendo empregada em diversos trabalhos, tais como o de Sharifi e Chen (SHARIFI & CHEN, 2015), onde os autores utilizaram a transformada de Hough para extrair as características e classificar as imagens de um pomar e, finalmente, gerar o melhor caminho.
- Algoritmos estatísticos - utilizados para navegação, tem suas decisões sobre o estado atual do veículo baseadas em um estado anterior, não podendo assim estimar o próximo passo. Possui a vantagem de utilizar sensores de baixo custo e o *software* de aplicação para navegação não é complexo. Um exemplo de aplicação pode ser encontrado em Contente (CONTENTE et al., 2015), onde os autores fizeram o uso de um mapa de pontos referentes às linhas de plantio, denominado esqueleto, e aplicaram um algoritmo estatístico para minimizar a função da distância da média quadrática aplicada aos pontos do esqueleto em relação a trajetória real.
- Navegação baseada em lógica *Fuzzy* – Em robôs agrícolas móveis, a utilização de algoritmos baseados em lógica *Fuzzy*, tem como principais aplicações a navegação entre linhas de plantio, operações de navegação em corredores de estufas, bordas de detecção

em colheitadeiras autônomas e desvios de obstáculos. Possui a vantagem de utilizar sensores com baixa resolução e custo. Em contrapartida, tem como desvantagem o fato de não gerar estimativa futura com base no estado atual do robô. Um exemplo do uso de um algoritmo *Fuzzy* para aprendizagem baseada em teoria de controle pode ser visto em Kayacan (KAYACAN et al., 2015). Nesse trabalho os autores usaram a técnica para amenizar os efeitos causados por escorregamento, ajustando os parâmetros e avaliando o resultado dos ajustes em tempo real no controle dinâmico, executando uma guinada em um trator autônomo. No experimento, para determinar o controle da velocidade longitudinal da plataforma, utilizou-se um controlador PID (proporcional integral derivativo) e um PD (proporcional derivativo) para o deslocamento angular da plataforma, sendo que ambos trabalham em paralelo com uma rede Neuro-Fuzzy tipo 2 – T2FNN, a qual assegura a estabilidade e realizando a aprendizagem dinâmica do sistema, sendo assim considerado o principal controlador. Os resultados obtidos demonstram que o T2FNN usado em paralelo com o controlador PD possui melhor desempenho e menor tempo para estabilizar. O uso da combinação da lógica difusa, redes neurais artificiais e teoria de controle melhora as interações entre os subsistemas, incertezas e a falta de informações de modelagem, além de ser robusto e possuir simplicidade computacional.

- Redes neurais – O algoritmo baseado em rede neural é bastante empregado na orientação de robôs autônomos, recebendo dados e gerando saídas como, por exemplo, direção e período de navegação. Tem seu cálculo baseado no estado atual utilizando informações do estado anterior.
- Navegação baseada em filtro de Kalman – Entre os algoritmos utilizados na robótica móvel agrícola, o filtro de Kalman é o único capaz de gerar uma estimativa futura baseado em um estado anterior (MOUSAZADEH, 2013). Essa técnica é empregada na definição de parâmetros como velocidade, posição, entre outros. Sua principal aplicação é a navegação, tendo a vantagem de ter uma boa acuracidade utilizando sensores de baixo custo, porém se faz necessário a utilização de um algoritmo bastante complexo.

Com relação às técnicas utilizadas para navegação gerou-se uma tabela onde é possível relacionar cada algoritmo a uma aplicação e realizar um comparativo entre determinados parâmetros. Tais resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre resultados de algumas pesquisas de avaliação

Algoritmo de Navegação	Operação	Velocidade (m/s)	Padrões de Comparação			
			Média de Erro de Offset (cm)	RMSE de Desvio (cm)	Desvio Padrão (cm)	Erro de Posição (°)
Mestre / Escravo	Colheita de laranja	0.66 - 1.33				
<i>Dead reckoning</i>	Colheita de Aspargo Branco	0.16				
	Navegação	0 - 2.3	30			
Visão de Máquina	Navegação em Pomar de Citros	0 - 3.1	3			
	Navegação Cultura de Beterrabas	0.3	0.1		1.6	
	Navegação em Milharal		0.1		0.7	
	Navegação com Robô em Estufa	0.11	12.4			8
	Navegação em Pomar	0.36	11			1.5
Algoritmos Desenvolvidos com Base Estatísticas	Navegação	3.5		3		
	Navegação					1.59
	Plantio de Arroz	0.7	5.5			
	Navegação	1.1 - 2.4		1		
	Navegação no <i>flat meadow</i>	0.5	3.1			
Controlador com Lógica Fuzzy	Navegação em <i>maize pots</i>	0.12	1.63			2.2
	Pulverização em Estufa	0.1 - 0.35		6.5 - 7.6		
	Pulverização em Estufa	0.45		2.5		
Redes Neurais e Algoritmo Genético	Navegação em Terreno Inclinado	0.5	5		6	-0.1
	Navegação em Inclinação	0.5	0.5		6.7	
	Navegação em Inclinação	0.6	15			
	Plantio de Arroz					
Filtro de Kalman	Navegação	1.34	42			
	Detecção de Obstáculos	0.11		5.2		1.2
	Orientação em linhas de Pomar	1.8 - 3.1	10			

Fonte: Adaptado de Mousazadeh (2013)

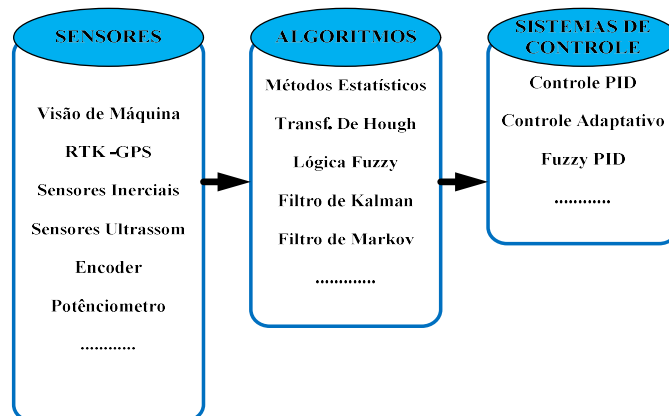
Analisando as informações contidas na Tabela 4, fica claro que é praticamente impossível estabelecer uma relação entre os algoritmos e suas aplicações. Isso se dá devido a

vários fatores, tais como, o tipo de plataforma utilizada para realizar o experimento, tipo de cultura e ambiente, entre outros. Dessa forma, se torna muito difícil especificar um algoritmo padrão que atenda qualquer aplicação agrícola, independente do robô, no qual, será implementado. Porém, o autor define em seu trabalho, alguns parâmetros que servem de referência básica para aplicação de determinados algoritmos, relacionando-os de tal forma que sejam eficientes ao atenderem aplicações específicas. Para tal são destacados os seguintes algoritmos com sua respectiva utilização:

- Filtro de Kalman - Navegação precisa;
- Visão de máquina - Detecção de linha de plantio;
- Rede Neural - Detecção de ervas daninhas;
- Sistemas *Fuzzy* - Desvios de obstáculos.

As plataformas robóticas agrícolas móveis contam com o sensoriamento e alguns dispositivos que realizam a coleta de informações sobre o seu ambiente de trabalho durante a operação e os disponibilizam na forma de variáveis de estado para o veículo. Os dados resultantes podem ser inseridos em um algoritmo, o qual tem a característica necessária para realizar a fusão dos dados, e seja capaz de antecipar o próximo estado das variáveis e o ângulo de direção do veículo, disponibilizando-o para o controle de direção executar uma ação. Um modelo característico de controle básico utilizado em robôs agrícolas móveis, que apresenta as características que foram descritas anteriormente pode ser visto a seguir, na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama de controle básico para veículos autônomos



Fonte: Adaptado de Mousazadeh (2013)

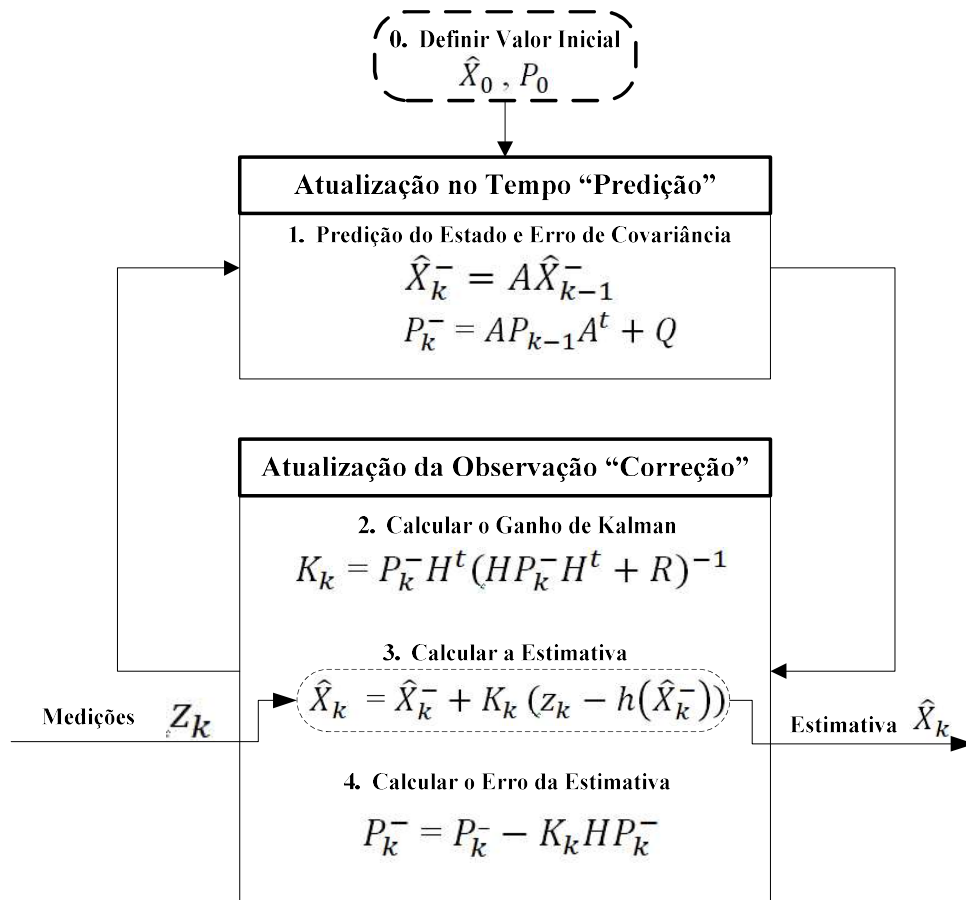
O diagrama apresenta uma forma básica de controle. Por meio dele é possível observar a gama de recursos existentes que podem ser empregados na navegação de robôs agrícolas móveis, com certo grau de autonomia e tem evoluído bastante no que diz respeito a questões como segurança de veículos autônomos, escorregamento durante navegação e manobras de cabeceira, os quais ainda são desafios a serem superados no desenvolvimento desse segmento da robótica. Nesse sentido, existe a dúvida quanto à definição de qual a melhor técnica e equipamento utilizar em uma aplicação que envolve a robótica. Dúvidas como, por exemplo, realizar a automação de um equipamento convencional e comercial ou projetar e construir uma plataforma robótica. Essas questões não são de fácil solução, devido às pesquisas estarem sempre direcionadas a algum tipo de aplicação específica. Contudo, independentemente do tipo de plataforma a ser utilizada nas pesquisas, pode-se considerar que dentre os algoritmos mais utilizados para realizar a fusão de dados sensoriais em uma aplicação na robótica agrícola móvel, o filtro de Kalman e suas variações se destacam.

2.1.3 Filtro de Kalman

O algoritmo recursivo conhecido como filtro de Kalman (*Kalman Filter* - KF) é utilizado desde a década de 1960 em aplicações relacionadas à teoria do controle de sistemas, e está baseado em um conjunto de equações matemáticas, as quais são eficientes para realizar estimativas, uma vez que tem o erro quadrático minimizado. Segundo Kim (KIM, 2011), o filtro trabalha com dois tipos principais de variáveis para a estimação, aquelas diretamente mensuráveis e as que representam os estados do robô e que não são diretamente mensuráveis, tendo suas aplicações relacionadas a estimativas nos espaços de estados, sejam eles passados, presente ou futuros, dependendo da aplicação. Outro fator relevante é a forma como são agrupadas as equações, as quais são dispostas em predição e atualização da medição ou correção. Esses dois grupos de equações funcionam em conjunto, um alimentando o outro com novas informações.

As equações de predição são responsáveis pelo avanço das variáveis de estado e das covariâncias no tempo para se obter as estimativas a priori, e as equações de atualização utilizam os dados das medições e as incorporam nas estimativas a priori para obter o ganho do filtro, o qual é utilizado para realizar o processo de estimação (KIM, 2011). O diagrama de funcionamento que contém o conjunto de equações do filtro de Kalman pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 -Algoritmo do Filtro de Kalman



Fonte: Adaptado de Kim (2011)

O diagrama que representa o algoritmo do filtro de Kalman pode ser dividido em dois blocos de equações, sendo um de predição e o outro de correção, e sua utilização segue uma sequência de passos, a qual se inicia com a definição dos valores iniciais das variáveis de estados \hat{X}_0 e da matriz de covariância P_0 , os quais são inicializados com valor igual a zero. Os blocos de equações que compõem o filtro trabalham de forma cíclica, estabelecendo uma relação de dependência entre eles. A parte que está relacionada com a predição conta com duas equações:

- ✓ Predição do Estado \hat{X}_k^- - atualiza o vetor de estados gerando uma previsão futura do mesmo, utilizando para tal o estado anterior \hat{X}_{k-1}^- multiplicado pela matriz A.

- ✓ Erro de Covariância P_k^- - atualiza os valores da matriz de covariância multiplicando a matriz A pela matriz de covariância P_{k-1} , que na sequência é multiplicada pela matriz A^t . Ao resultado é somado um erro Q.

Por sua vez, o bloco que contém as equações que realizam a correção do filtro possui três equações, que estão dispostas da seguinte maneira:

- ✓ Ganho de Kalman K_k – valor utilizado para realizar a correção do filtro, dado pela multiplicação do erro de covariância P_k^- pela matriz identidade transposta H^t . O resultado multiplica $(HP_k^-H^t + R)^{-1}$, onde R representa o ruído de medição.
- ✓ Cálculo de Estimativa \hat{X}_k – valor da saída do filtro de Kalman, é obtido pela soma da predição \hat{X}_k^- com o ganho de Kalman K_k após seu valor ser multiplicado pela diferença dos dados do sensor z_k e da predição $h(\hat{X}_k^-)$.
- ✓ Erro da Estimativa P_k^- - o valor encontrado nada mais é que a correção da matriz de covariância do erro, sendo o mesmo encontrado pela diferença entre o erro da covariância P_k^- e a multiplicação do ganho K_k pela matriz H multiplicado pelo erro de covariância P_k^- .

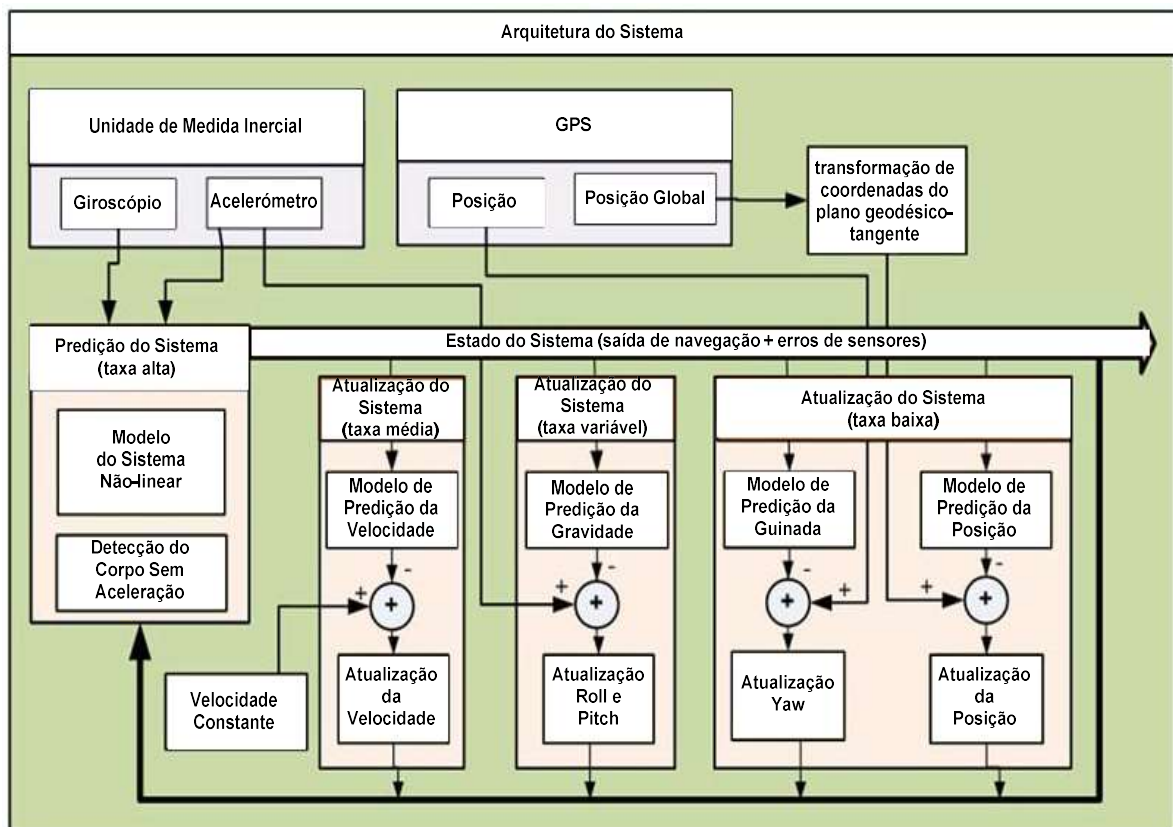
O filtro de Kalman é um algoritmo que pode ser utilizado no processo de fusão sensorial e em sistemas de controle e se aplica geralmente em sistemas lineares. Nos casos não lineares, é necessário realizar uma linearização do sistema. Quando a aproximação é feita por expansão da série de Taylor recebe a denominação de Filtro de Kalman Estendido (*Extended Kalman Filter - EKF*). Também pode ser obtido por outras formas de linearização como, por exemplo, o UFK (*Unscented Kalman Filter*), o qual realiza uma aproximação estocástica através do uso de processos estocásticos de regressão linear. Porém, serão são descritas somente as equações do KF e do EKF, os quais tem suas aplicações abordadas no capítulo de implementação do Sistema de Controle e Supervisão, utilizando os mesmos dados para definir qual melhor abordagem para ser empregada no presente trabalho.

Na literatura científica, em publicações relacionadas à robótica móvel é possível encontrar inúmeras aplicações que utilizam o filtro de Kalman estendido na fusão de dados

sensoriais, as quais trabalham em conjunto com o modelo cinemático ou dinâmico da plataforma onde está implementado.

Munguia (MUNGUIA, 2014), propôs um método para estimar o estado cinemático de um veículo juntamente com os parâmetros do erro sensorial, por meio da integração de medições inerciais e GPS. O sistema pode ser utilizado para determinar atitude e posição de plataformas tripuladas ou não. Para tal, o autor utilizou o algoritmo do filtro de Kalman estendido de forma direta, ou seja, o filtro é explicitamente derivado do modelo cinemático, bem como os modelos de erro dos sensores. Este trabalho apresenta um método prático para estimar o estado cinemático total de um veículo, juntamente com os parâmetros de erro dos sensores. O diagrama de blocos referente ao sistema pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama de blocos da arquitetura do sistema



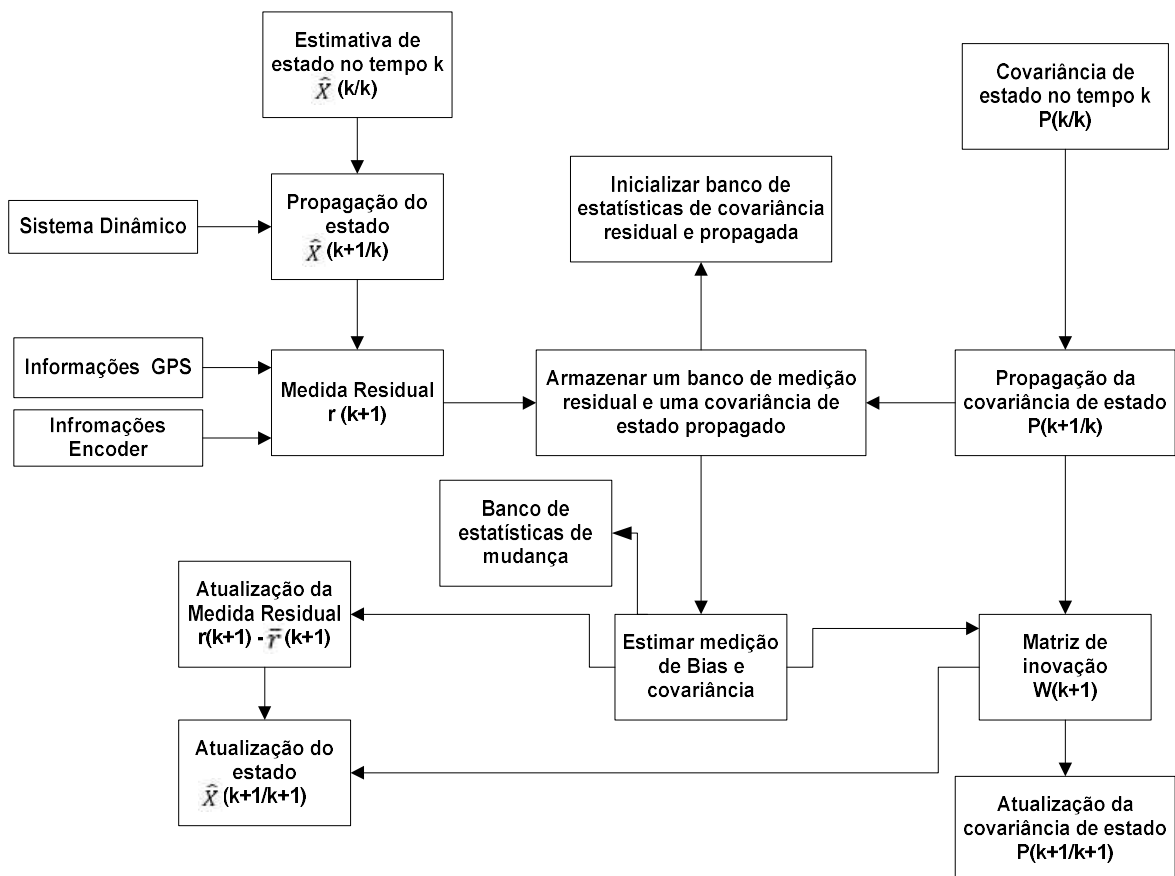
Fonte: Adaptado de Munguia (2014)

Segundo o autor, tal método possui algumas vantagens como, por exemplo, clareza e simplicidade associadas a implementação do EKF em uma configuração direta, permite a escalabilidade do sistema, pode ser facilmente modificado para o uso envolvendo outro tipo de

veículo. Com amostras de dados reais, os resultados experimentais mostraram que o método é capaz de estimar os erros sensoriais de forma satisfatória, compensando as interrupções que ocorrem com o GPS, além de se mostrar um método robusto mesmo utilizando sensores de baixo custo.

Um trabalho com características semelhantes pode ser encontrado em (MAMOUN, et al., 2015), no qual foi proposta uma solução com baixo custo, alta precisão e integridade do algoritmo. Para tal, foram utilizados um GPS e uma IMU de baixo custo para realizar as medições e obter os parâmetros e as restrições não-holomônicas de uma plataforma robótica móvel. O método buscou a detecção e a localização de erros, trabalhando de forma contínua com alta precisão e integridade durante a navegação, para posteriormente ser utilizado como fator de segurança de tráfego, quando exposto a condições não ideais. O fluxograma a seguir, na Figura 12, representa o algoritmo utilizado no trabalho.

Figura 12 - Fluxograma do algoritmo proposto



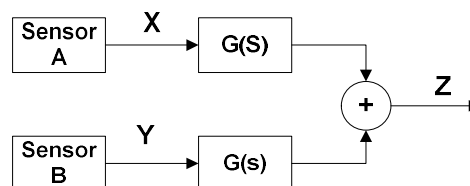
Fonte: Adaptado de Mamoun, et. al. (2015)

Os resultados experimentais obtidos demonstraram que o desempenho obtido com a aplicação do algoritmo de estimativa proporciona trabalhar com alta precisão e, também, prever a existência ou não de erros durante a medição dos parâmetros do robô. Além dos exemplos citados, é possível encontrar outros na literatura. Porém, como no presente trabalho foi previsto somente a utilização do filtro de Kalman para realizar a fusão sensorial na definição dos ângulos de Euler, tais trabalhos não foram incorporados ao texto.

2.1.4 Filtro Complementar

Um segundo filtro empregado pelo presente trabalho para realizar a fusão de dados sensoriais é o modelo básico estrutural do filtro complementar, o qual se mostra adequado para utilização em sistemas de condução de plataformas robóticas, cujo desenvolvimento está baseado em medidas auxiliares como, por exemplo, um sistema de navegação inercial auxiliado por outros sensores. O conceito de filtro complementar básico, descrito por Duong (DUONG et al., 2016) que tem seu modelo representado na Figura 13, onde os autores descreveram que duas medidas representadas por X e Y, as quais pertencem a sensores distintos, mas que medem a mesma variável, podem gerar como saída uma única variável Z, a partir de duas medidas. Para tal, são adicionados os filtros passa-baixa e passa-alta, de tal modo que a filtragem passa-baixa é aplicada nos dados de um sensor enquanto no outro se aplica uma filtragem passa-alta. Assim é possível definir qual o tipo de frequência de ruído referente a cada sensor utilizado, e aplicar o filtro que melhor se comporta para amenizar o erro. Para ilustrar o exemplo pode-se considerar que o sensor A (X) possui um ruído de alta frequência enquanto o sensor B (Y) de baixa frequência.

Figura 13 – Filtro complementar básico



Fonte: Adaptado de Duong et al. (2016)

Para obter um bom resultado na saída Z é preciso filtrar os ruídos referentes a cada um dos sensores de acordo com a característica dos seus respectivos ruídos. Nesse caso, G (s) é

referente a um filtro passa-baixa enquanto $1 - G(s)$ é o seu complemento, um filtro passa-alta, dando origem a um filtro complementar básico.

Analicamente, o conceito de filtragem complementar pode ser descrito como a combinação de duas medidas ruidosas, as quais são filtradas independentemente por meio de filtros passa-alta e passa-baixa. No trabalho de Cardeira (CARDEIRA, 2009), o autor utiliza para realizar a filtragem, independente das medidas ruidosas, as funções de transferência $H_1(s)$ e $H_2(s)$, sendo o $s(t)$ determinístico ou não. Porém se $s(t)$ não dispõe de um modelo próprio. Pode ser empregada a forma genérica do filtro complementar, visto na Figura 14 a. A saída do filtro no domínio do tempo é dada pela seguinte equação:

$$\hat{S}(t) = H_1(s)[y_1(t)] + H_2(s)[y_2(t)], \quad (2.1)$$

Nessa equação, y representa o sensor e H a função de transferência. As variáveis $H_1(s)$ $[y_1(t)]$ e $H_2(s)$ $[y_2(t)]$ podem ser substituídas pelas saídas $z_1(t)$ e $z_2(t)$ determinadas pelas funções de transferência $H_1(s)$ e $H_2(s)$ respectivamente, e tendo como sinais de entrada $y_1(t)$ e $y_2(t)$. O objetivo do filtro complementar nesse caso é sintetizar $H_1(s)$ e $H_2(s)$ para estimar o sinal $S(t)$, a partir das medidas ruidosas $y_1(t)$ e $y_2(t)$ no domínio da frequência e com características espectrais de $S(t)$ conhecidas e estacionárias. Nesse contexto, denomina-se o problema como filtragem de *Wiener* e a equação pode ser reescrita da forma que segue:

$$\hat{S}(s) = H_1(s) (S(s) + N_1(s)) + H_2(s) (S(s) + N_2(s)) \quad (2.2)$$

$$= (H_1(s) + H_2(s)) S(s) + H_1(s)N_1(s) + H_2(s)N_2(s) \quad (2.3)$$

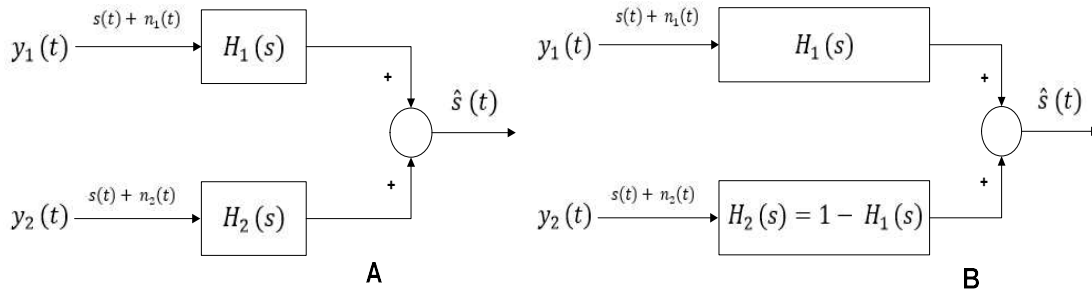
Onde $S(s)$ e $\hat{S}(s)$ são, respectivamente, a transformada de Laplace do sinal a estimar e da sua estimativa, $N_1(s)$ e $N_2(s)$ são as transformadas de Laplace do ruído aditivo às medidas $s_1(t)$ e $s_2(t)$. Para introduzir o sinal $s(t)$, utilizam-se as funções de transferência $H_1(s)$, e a sua complementar $H_2(s)$. O diagrama que ilustra essa definição pode ser visto na Figura 14, e a equação pode ser reescrita como segue.

$$H_1(s) + H_2(s) = 1 \Leftrightarrow H_2(s) = 1 - H_1(s), \text{ para todos os } (s).$$

Reescrevendo a equação, tem-se:

$$\hat{S}(s) = S(s) + (H_1(s)N_1(s) + (1 - H_1(s))N_2(s)) \quad (2.4)$$

Figura 14 – Aplicações de filtragens: (A) aplicação com dois graus de liberdade e (B) aplicação com um grau de liberdade, restrição complementar.



Fonte: Adaptado de Cardeira (2009)

O resultado obtido com a aplicação do filtro complementar, indica que $\hat{S}(t)$ é constituído por uma cópia do sinal $S(t)$ e que os ruídos $n_1(t)$ e $n_2(t)$ são amenizados pelas funções de transferência $H_1(s)$ e sua complementar $(1 - H_1(s))$. Desta forma assume-se que os dados sensoriais possuem ruídos com largura de banda complementar, sendo N_1 banda alta e N_2 banda baixa. Dessa forma, se $H_1(s)$ é um filtro passa-baixa, vai rejeitar o ruído $n_1(t)$ e, de forma análoga, $H_2(s) = (1 - H_1(s))$ vai ser um filtro passa-alta, rejeitando, portanto $n_2(t)$, (CARDEIRA, 2009). Analiticamente, fica:

$$\hat{S}(s) = S(s) + (H_1(s)N_1(s) + (1 - H_1(s))N_2(s)) \approx S(s) \quad (2.5)$$

Assim pode-se considerar que $H_1(s) N_1(s) \approx 0$ e $(1 - H_1(s)) N_2(s) \approx 0$, enquanto o sinal não for distorcido o filtro complementar tem a capacidade de remover as componentes ruidosas. Esta abordagem apresenta-se como uma solução invariante no tempo muito eficiente, tendo os seus parâmetros definidos considerando as características de largura de banda complementares dos sensores, cuja informação pretende-se fundir (CARDEIRA, 2009). Se $H_1(s)$ é tido como um filtro passa-baixa de primeira ordem, então:

$$H_1(s) = \frac{k}{s + k}$$

A equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\hat{S} = S + \frac{k}{s + k} * N_1 + \frac{s}{s + k} * N_2. \quad (2.6)$$

Desta forma, o parâmetro k é o determinante da frequência de corte do filtro e deve ser ajustado de acordo com a largura de banda do ruído. Ele afeta diretamente o ruído e não tem influência alguma sobre o sinal $S(t)$. O valor determinado de k deve levar em conta as características dos sensores empregados e o efeito que ele tem na estimativa $\hat{S}(t)$. A definição do parâmetro k não depende de outro fator e os referidos parâmetros podem ser vistos como parâmetros de ajustes botões, relacionados com um determinado critério que moldam a resposta em frequência (CARDEIRA, 2009).

Existem ainda, além da forma básica do filtro complementar apresentada, existem algumas variantes, entre as quais, o algoritmo do filtro complementar baseado em descida gradiente, o qual tem sua representação baseada em *quaternions* e pode ser explorado para IMU, utilizando dados de acelerômetros e giroscópios para estimativa de orientação em 2D. Também com a introdução de mais um sensor, como um magnetômetro ou um sistema sensorial de taxa angular e gravidade (MARG), pode-se estimar a atitude de um veículo em 3D. O algoritmo utiliza um filtro de ganho fixo e é adequado para a estimativa de atitude do sistema em condições estáticas, e tanto o ganho de filtro fixo quanto a taxa de amostragem tem efeito sobre o desempenho do filtro. Maiores detalhes sobre esse tipo de filtro e sua aplicação podem ser encontrados em Madgwick (MADGWICK, et al., 2011).

Existem outras abordagens que utilizam o filtro complementar devido às suas propriedades de filtragem de frequência para realizar a estimativa de atitude. Em Yoo (YOO, et al., 2011), os autores aplicam um filtro complementar em um sistema de referência de atitude e direção AHRS (*attitude and heading reference system*), sendo realizada primeiramente a combinação das saídas do giroscópio e do acelerômetro para estimar os ângulos *Roll* e *Pitch*, e, na sequência as saídas do giroscópio com a do magnetômetro para estimar o ângulo *Yaw*. Dessa forma, consegue-se uma boa estimativa de orientação e compensa o desvio gerado pelo giroscópio em relação à taxa de amostragem dinâmica do acelerômetro e do magnetômetro.

Para realizar a fusão dos dados sensoriais do presente trabalho, foram estudados modelos de filtros complementares utilizados na definição da estimativa de atitude. Porém, devido às limitações encontradas nos dados referentes ao acelerômetro, o filtro complementar linear convencional, torna-se inadequado para realizar sozinho uma boa estimativa da atitude. Outro fato identificado nos filtros estudados é que o magnetômetro apresenta perda de fase quando utilizado em alta frequência dinâmica. Com base nas pesquisas realizadas pelos autores, pode-se definir quais requisitos básicos um filtro precisa ter para definição de atitude de um veículo:

- Amplificação constante e perda de fase pequena até em frequências acima da estabelecida como frequência de corte do magnetômetro;
- Estabelecer o uso do magnetômetro com as mais amplas gamas possíveis de frequências, a fim de manter a sensibilidade ao deslocamento em relação ao giroscópio em uma taxa mínima de variação.

O resultado do trabalho demonstrou que as estimativas tendem a seguir o seu referencial de forma satisfatória em todas as condições, sendo que os ruídos e perdas de fase do magnetômetro são minimizados. Baseado nas informações obtidas, e com os resultados apresentados nos trabalhos citados, conclui-se que o filtro complementar atende às exigências estabelecidas para determinadas fusões, as quais são utilizadas pelo Sistema de Controle e Supervisão do RAM.

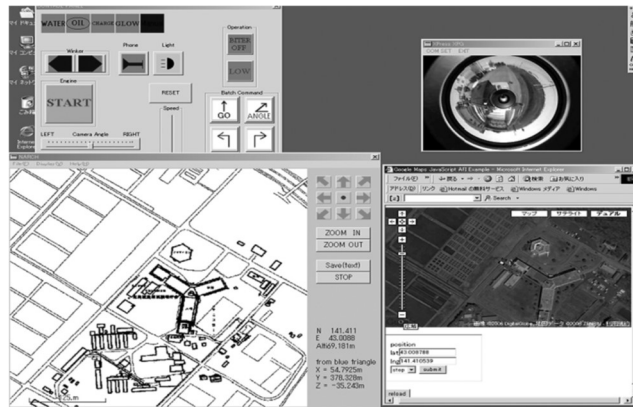
2.2 Sistemas de Controle e Supervisão para Plataformas Robóticas Móveis Utilizadas na Agricultura

Conceitos de automação e robótica aplicados ao setor agrícola são foco de inúmeras pesquisas a um bom tempo e têm passado por diversos avanços tecnológicos, o que permite direcionar os estudos, tanto na automação de máquinas agrícolas convencionais, como no desenvolvimento de plataformas robóticas específicas para realizar determinadas tarefas, embora ainda existam grandes desafios a serem superados para uma aplicação de campo real. Uma das principais razões para isso é a preocupação com a segurança, uma vez que é extremamente difícil e imprevisível determinar as condições de trabalho durante a execução de operações autônomas no campo (MURAKAMI et al., 2008; BASHIRI & MANN, 2014). A partir do momento que foram introduzidos sistemas automatizados em máquinas agrícolas, o operador passou a trabalhar com veículos semi-autônomos, fator que tem um impacto direto em relação à garantia de uma operação segura e eficiente desses sistemas.

Esse tipo de abordagem, que promove uma maior interação entre operador e robô através da integração homem máquina é descrito no trabalho de Murakami (MURAKAMI et al., 2008), no qual os autores implementaram uma interface com o usuário baseada em imagens de uma câmera omnidirecional e os mapas provenientes do *GoogleMaps*. Por meio das imagens

observam-se os acontecimentos que ocorrem ao redor do veículo como, por exemplo, a existência de obstáculos ou a quantidade de materiais agrícolas (fertilizantes) a serem espalhado, e os mapas auxiliam o operador na compreensão do deslocamento da máquina durante o trabalho de campo. A interface implementada pode ser vista na Figura 15.

Figura 15 - Software para tele operação



Fonte: MURAKAMI et al., (2008)

O *Software* de teleoperação da Figura 15 foi implementado em uma plataforma que tem como base um equipamento comercial (um espalhador de fertilizantes), o qual passou por um processo de automação. O veículo com o controle de supervisão apresentou resultados de navegação com baixo erro lateral. Porém, segundo os autores, em uma operação contínua se torna difícil a conclusão de tarefas que exigem precisão, devido ao atraso existente entre os comandos dados pelo operador e a resposta da máquina.

Vale destacar também protótipos baseados em arquiteturas abertas, como o descrito no trabalho de Nielsen (NIELSEN, et al., 2012) onde os autores propuseram o desenvolvimento de um robô de campo configurável e adaptável a uma ampla gama de projetos de pesquisa em agricultura de precisão, denominado *Armadillos* que pode ser visto na Figura 16. Ele tem sua estrutura computacional baseada em *Linux FroboBox*, com um computador que executa o *Arquitetura FroboMind*, que é baseada no Sistema Operacional de Robô (ROS).

Figura 16 - Amadillo coletando imagens de erva daninha em um campo de milho ao anoitecer



Fonte: Nielsen, et al., (2012)

A arquitetura utilizada *FroboMind*, possui como característica design modular, o qual otimiza a extensibilidade, escalabilidade, tempo de desenvolvimento e reutilização de código. Sua implementação está baseada na divisão estruturada do sistema ROS em pilhas, pacotes e nós, e é composta pelos seguintes pacotes:

Percepção

fmSensors	Estímulos → Dados
fmExtractors	Dados → Informação
fmProcessors	Informação → Conhecimento

Tomada de decisão

fmMissions	Conhecimento → Comportamento → Planos
fmBehaviours	Biblioteca de comportamentos
fmMonitors	Biblioteca de monitoramento
fmActions	Biblioteca de ação

Ação

fmExecuters	Planos → Comandos
fmControllers	Comandos → Sinais
fmActuators	Sinais → Posição

Abstração de camadas e interface

fmIncident	Diagnóstico de falhas e tratamento de incidentes
fmCore	ROS
fmMsgs	ROS mensagens de comunicação entre nós
fmCSP	Pacotes de Suporte para Computador
fmPSP	Pacotes de Suporte para a plataforma
fmKinematics	Cinemática do veículo
fmHMI	Interface Homem Máquina
fmSim	Simulação

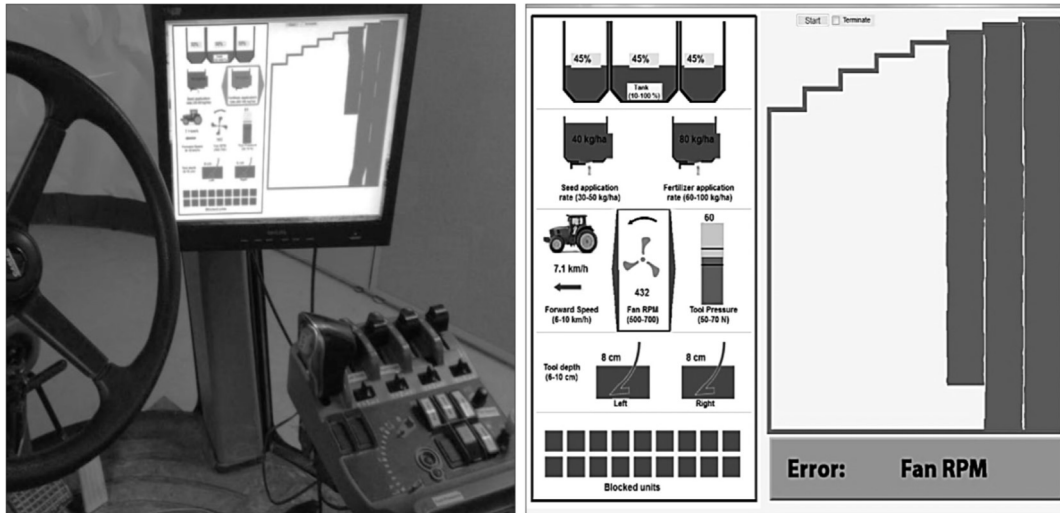
Segundo os autores, o robô possui o código de todos os componentes do software aberto *FroboMind*, mas ainda precisa melhorar alguns aspectos em relação à confiabilidade mecânica do sistema de transmissão, otimizar a modularidade e a flexibilidade, e a arquitetura *FroboMind*. Porém, os resultados dos experimentos de campo, utilizando os protótipos do robô, demonstraram que o conceito geral proposto é uma solução funcional e inovadora, e que uma interface para executar tarefas de alto nível como, por exemplo, navegação e controle de implementos, está em fase de desenvolvimento.

Em uma plataforma semi-autônoma, o operador tem a tarefa primordial voltada para o controle e o monitoramento de parâmetros da máquina, incluindo o diagnóstico e tratamento de erros, que porventura vierem a ocorrer. Nesse sentido, Bashiri e Mann (BASHIRI & MANN, 2014), realizaram um estudo com o auxílio de um simulador para investigar os efeitos da automação na direção do veículo, e fundamentado no resultado implementou um sistema de controle e monitoramento de tarefas, com base no conhecimento dos operadores. Dessa forma, foi possível aprimorar o conhecimento já existente em relação à segurança operacional de máquinas e equipamentos agrícolas e desenvolver sistemas teleoperados com maior eficiência, compostos por uma arquitetura de controle e uma interface, para que o usuário possa comandar, conduzir e monitorar todo o sistema do veículo, além de possibilitar uma ação de controle em situações de emergência. Tais sistemas que se assemelham aos sistemas supervisórios empregados na indústria, estão sendo cada vez mais utilizados e adequados para a aplicação na robótica móvel agrícola, com o intuito de melhorar a segurança operacional.

O uso de uma interface amigável com o usuário facilita bastante a operação de uma máquina agrícola, a qual pode ser considerada uma tarefa primária do operador. Nesse sentido, Bashiri e Mann (BASHIRI & MANN, 2014) propôs um sistema de mapeamento para auxiliar

o operador na sua localização no campo, evitando assim lacunas ou sobreposições sobre as faixas paralelas de navegação utilizando um semeador a ar. O sistema proposto gerou uma interface que apresenta alguns parâmetros do equipamento, além de mapear as faixas navegadas em relação ao ambiente. Tal interface pode ser vista na Figura 17.

Figura 17 - O indicador de semeador e o sistema de mapeamento



Fonte: Bashiri & Mann (2014)

A utilização de uma IHM e um Sistema de Controle e Supervisão facilita o trabalho operacional da máquina ou robô, mapeando variáveis e disponibilizando na tela informações referentes ao equipamento e a trajetória percorrida por ela. A camada de *Software* considerada supervisória é responsável por atuar entre a camada de controle de baixo nível e a camada de gerenciamento de missões e, a partir de informações de ambas, tomar decisões e disponibilizar informações para o operador.

Em trabalhos como o de Bakker (BAKKER et al., 2011) é possível encontrar de forma superficial um exemplo de uma camada supervisória com algumas funções relacionadas. Nesse caso, a camada foi empregada para acompanhar o comportamento do robô durante a navegação e o mapeamento das linhas de plantio. Para tal, foram estabelecidos três critérios básicos para verificação:

1. Se o robô está no modo de operação autônomo ou por controle remoto;
2. Se o atuador está centrado;
3. Se a câmera está posicionada em relação à linha de plantio.

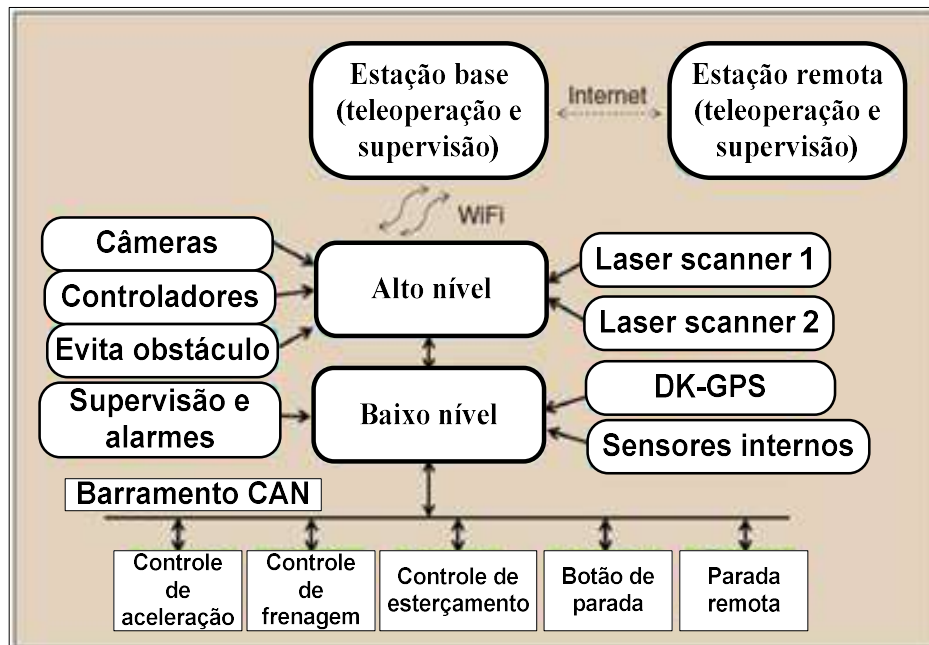
A partir dessas informações são liberados os seguintes componentes operacionais:

1. Parada de emergência;
2. Controle de velocidade das rodas;
3. Controle de velocidade;
4. Ângulo de esterçamento das rodas;
5. Módulo de operação do engate.

Nesse ponto a camada supervisória recebe a missão que será executada pelo robô e pode navegar de forma autônoma pelo campo enquanto realiza o mapeamento das linhas de plantio.

No trabalho de Cheein e Carelli (CHEEIN & CARELLI, 2013), os autores abordam um estudo a respeito do desempenho de veículos autônomos para realizar a tarefa de supervisão contínua em campo. Para tal, durante a navegação é fundamental que o veículo tenha referência da sua posição em relação ao seu ambiente de trabalho e seus elementos. Dessa forma é possível realizar um mapeamento do campo. Os autores citaram a importância da geração de um mapa completo e bem detalhado para ser utilizado para fins de navegação, amenizando o risco de ocorrer colisão e habilitando o robô a executar suas tarefas com sucesso. Além disso, ele abordou a interação entre um veículo agrícola automático com os trabalhadores de campo e o gerenciamento de tarefas prioritárias, problema bastante atual na área. Para realizar o experimento foi projetada uma unidade de serviço para monitorar e supervisionar um bosque, a qual conta com uma estação que permite realizar a teleoperação do veículo. O projeto também realizou a interação da unidade de serviço com os trabalhadores de campo. Para estabelecer essa condição, ela foi projetada para prestar assistência aos trabalhadores das plantações de oliveiras. Os trabalhadores têm que carregar a unidade de serviço com azeitonas, enquanto ela realiza a navegação pelo bosque, e tendo como objetivo a segurança dos trabalhadores e cumprir sua tarefa agrícola. Um diagrama que descreve o método utilizado para essa aplicação, contendo ferramentas robóticas como, por exemplo, o estudo da interação homem-robô, trabalho cooperativo e colaborativo e sistemas de controle, pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Estrutura funcional do veículo autônomo

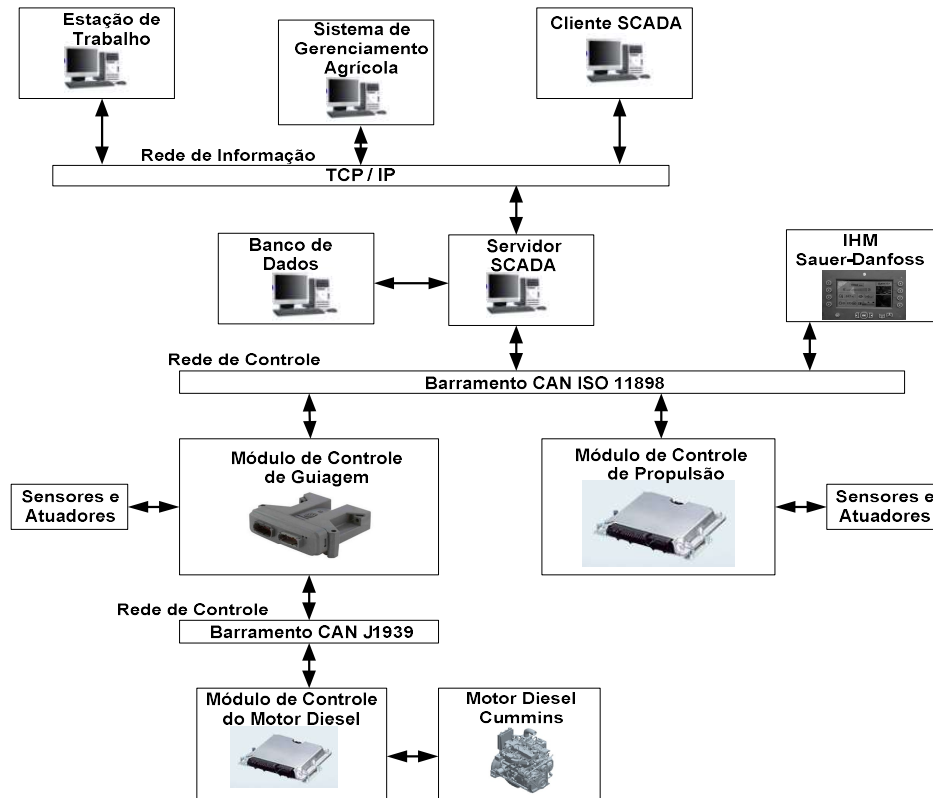


Fonte: Adaptado de Cheein & Carelli, (2013)

O trabalho resultou em analisar detalhadamente as habilidades, relacionando-as de forma a demonstrar o quanto são dependentes e como a precisão da localização de um sistema é crucial para garantir o sucesso de uma tarefa agrícola. Também foi determinado que um sistema de posicionamento ruim resulta em baixa credibilidade de um mapa, condução arriscada, e aumenta a probabilidade de ocorrência de falha em uma tarefa agrícola. Concluiu-se que o algoritmo SLAM é uma solução barata para solução do problema de localização.

Uma aplicação envolvendo arquitetura supervisória para uso em robótica móvel agrícola pode ser encontrada nos trabalhos de Torres (TORRES et al., 2013; TORRES, 2014). A implementação foi baseada nos modelos de controle e supervisão utilizados pela indústria, adaptando-os às necessidades impostas para uma aplicação de agricultura de precisão, na plataforma AgriBot. Para tal, foi implementado um sistema de controle supervisório e aquisição de dados, fundamentado em uma arquitetura supervisória do tipo Cliente-Servidor, a qual pode ser vista na Figura 19, que proporciona uma visão geral do modelo e seus respectivos componentes e subsistemas.

Figura 19 - Arquitetura Supervisória do AgriBot



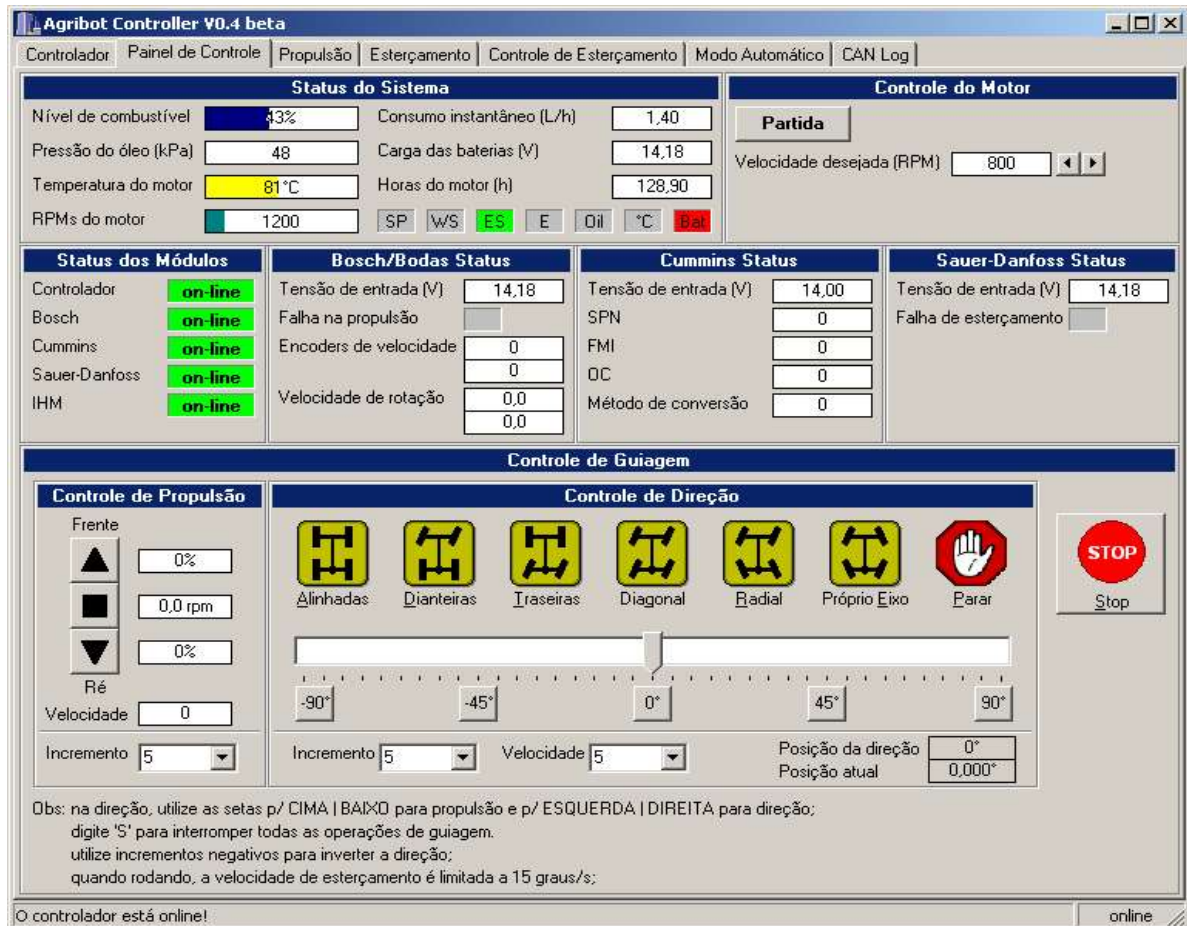
Fonte: Torres, et al., (2013)

O sistema supervisório implementado realiza a leitura dos dados (frames), que contém as informações provenientes dos módulos de controle, e envia os comandos referentes à operação de campo para o robô executar. As mensagens são enviadas e recebidas através do protocolo CAN e são disponibilizadas para um Módulo de Controle, o qual é responsável pela troca de dados correspondentes a cada um dos subsistemas funcionais do AgriBot e o sistema de supervisão. Com o resultado da implementação, foi possível estabelecer os requisitos do sistema, os quais estabelecem uma relação entre o sistema supervisório e eventos externos.

Os comandos referentes ao robô disponibilizados pelo sistema supervisório por meio da IHM para o operador seguem uma sequência, e só é permitido ao usuário enviar comandos passando 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 sistema supervisório verifica os status das controladoras e os dados dos sensores. A partir dessas informações é atualizada a interface e se estiver adequado aos requisitos estabelecidos, libera a partida. Caso contrário, sinaliza a falha e aguarda uma ação corretiva. A indicação de falha gera um alarme que contém data, hora e localização, criando assim um banco de dados

referente ao robô. Uma vez em funcionamento, cabe ao usuário escolher o modo de operação, que pode ser manual ou automático. Todo procedimento descrito é realizado por meio de uma interface homem máquina, e sua tela principal, pode ser vista na Figura 20.

Figura 20 - Painel principal de controle do sistema supervisor do AgriBot



Fonte: Torres, (2014)

O modelo de sistema supervisor descrito foi implementado na sua forma mais básica na plataforma robótica agrícola AgriBot, possibilitando assim, adquirir experiência necessária para buscar soluções mais amplas, as quais serviram de base no desenvolvimento do presente trabalho.

Seguindo a linha de aplicação relacionada ao desenvolvimento de sistemas supervisórios para robôs agrícolas. Em Ishbashi (ISHBASHI, et al., 2013) os autores descrevem o desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto usando uma aplicação Web para um robô agrícola móvel, com o intuito de combinar e gerir adequadamente os dados referentes às tarefas agrícolas. Para tal o sistema faz a combinação dos dados, disponibilizando e

armazenando-os em um banco de dados, que possui acesso remoto. A página específica, ao ser acessada, exibe uma caixa de seleção contendo mapa, medidores digitais e botões. Na Figura 21 pode ser vista a IHM desenvolvida.

Figura 21 - captura de tela “iniciar a aceitação de dados”



Fonte: Adaptado de Ishbashi, et al. (2013)

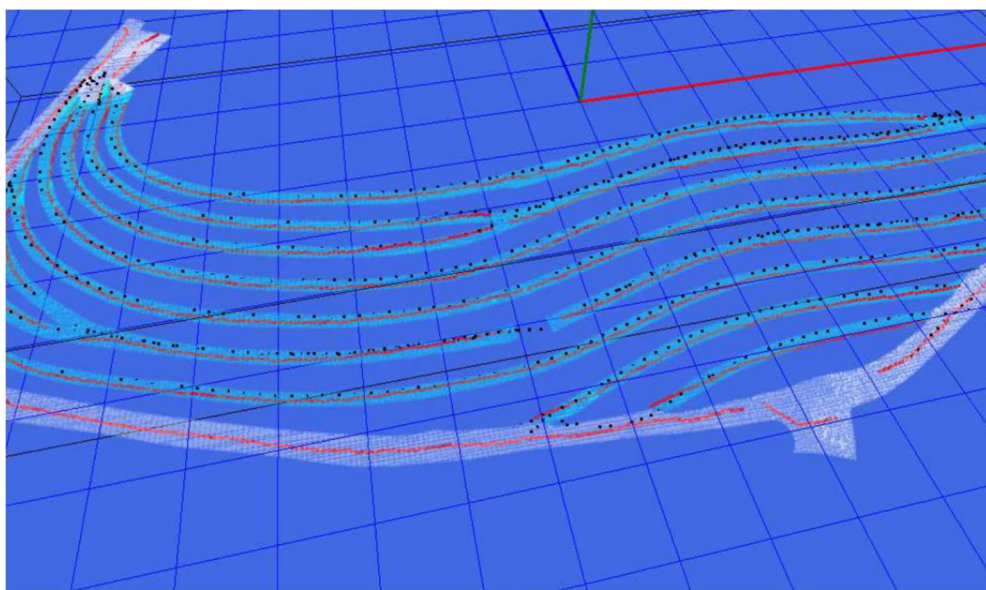
Analisando a figura é possível observar que o ícone no mapa mostra a localização do robô em seu ambiente de trabalho, e desenha sua trajetória no mapa, além dos instrumentos virtuais que apresentam ao usuário informações como, por exemplo, velocidade, rotação do motor, número de satélites e qualidade do sinal do GPS e taxa de enchimento do tanque de grãos.

O sistema desenvolvido obteve, segundo os autores, bom resultado em relação ao monitoramento do robô, apresentando dados e emitindo alertas de erro, provando também ser capaz de atuar gerenciando informações de múltiplos robôs agrícolas, preservando os dados referentes à combinação dos robôs em um banco de dados e desenvolveu uma página da Web, onde o usuário tem acesso aos dados e informações do robô, consegue extrair os dados de rastreamento, entre outros.

Existem ainda outras aplicações que utilizam interface. Uma delas se aplica à navegação de uma plataforma robótica móvel em um terreno desigual, onde uma pequena intercorrência

pode resultar e um grande desvio vertical, provocando um acidente com o robô que pode trazer graves consequências ao equipamento (CONTENTE et al., 2015). Neste trabalho, os autores propuseram uma forma de gerar possíveis rotas nesse tipo de terreno, utilizando algoritmos denominados de curva-esqueleto para superfícies geradas em 3D em um vinhedo, onde o robô navega. As curvas-esqueleto e a trajetória real foram representadas utilizando uma aplicação gráfica *OpenGL*, desenvolvida para esta finalidade. Uma imagem do *software* pode ser vista na Figura 22.

Figura 22 - Esqueletos de caminho usando o algoritmo de desbaste



Fonte: Contente, et al., (2015)

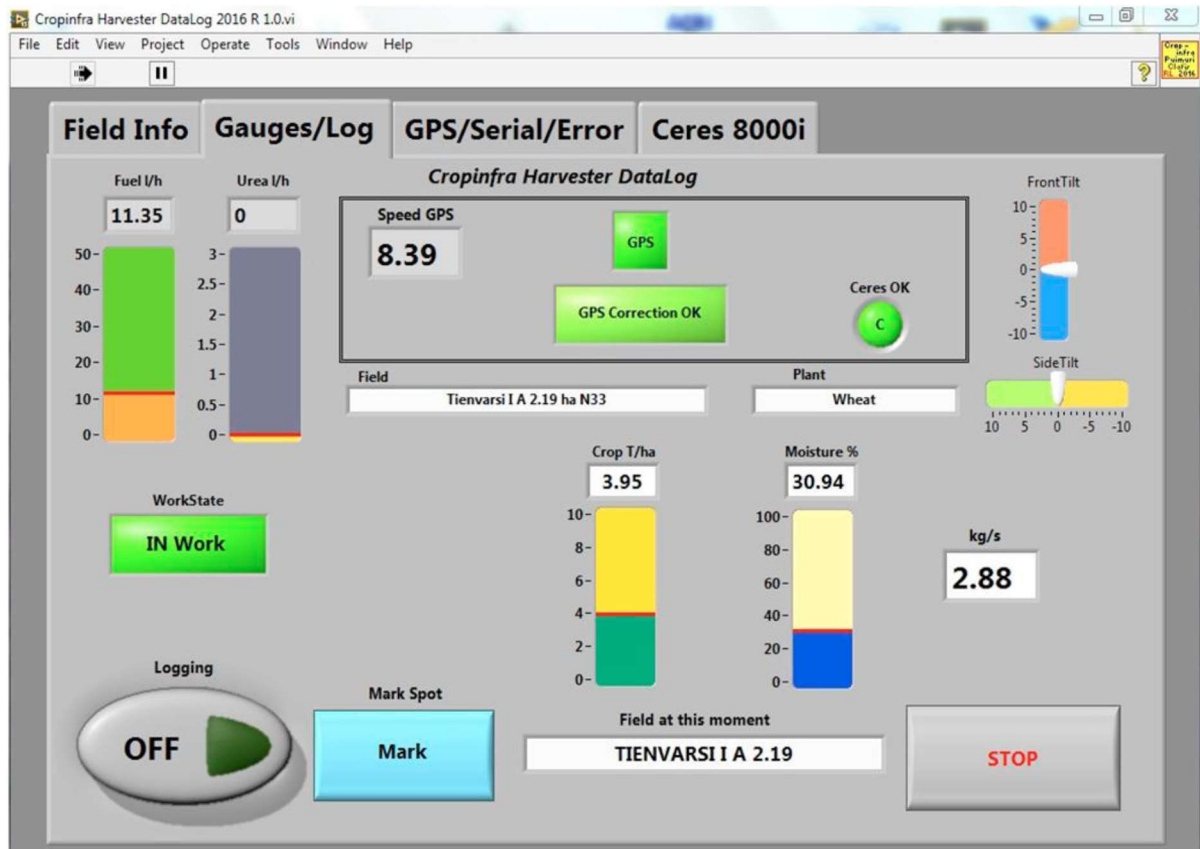
Para validar o estudo, a representação em 3D foi comparada com um caminho real de navegação, feita por um perito ao dirigir um trator durante a pulverização da vinha. O uso do algoritmo tem como objetivo de estudar a melhor forma de minimizar a função da distância média quadrática quando aplicada aos pontos esqueléticos. Seu uso com sensoriamento auxiliar, identificando o tipo de tarefa a ser realizada no vinhedo, juntamente com as curvas de esqueleto, é capaz de apresentar resultados seguros para realizar a navegação. Os resultados obtidos demonstraram que o aplicativo pode ser utilizado como ferramenta em um processo automático, já que os limites do esqueleto servem de pontos de referência para estabelecer critérios de tomada de decisão no planejamento de trajetória.

Dentre os trabalhos envolvendo supervisão de máquinas e robôs agrícolas, a busca por protocolos que possam ser seguidos no desenvolvimento de aplicações, motiva pesquisas que tendem a adequar sistemas já utilizados em outros setores como, por exemplo, na indústria, que

é abordado no trabalho de Oksanen (OKSANEN, LINKOLEHTO & SEILONEN, 2016). Neste trabalho, os autores propõem a adaptação de um protocolo usado em automação industrial para o monitoramento remoto de máquinas agrícolas, estabelecendo a conexão da máquina com o controle do processo de produção, utilizando a plataforma de comunicação aberta (OPC). Para desenvolver a aplicação foi empregada sua versão mais recente, a Arquitetura Unificada do OPC (OPC UA). O experimento utilizou uma colheitadeira com sistema de monitoramento de rendimento, na qual foi realizada a adequação dessa tecnologia para uma aplicação de telemetria de máquinas agrícolas, com o servidor sendo a colheitadeira e o cliente o monitoramento remoto. Na Figura 23 é mostrada a tela desenvolvida com o processo. Uma descrição dos equipamentos e métodos utilizados para a adaptação realizada por Oksanen (OKSANEN, LINKOLEHTO & SEILONEN, 2016, p.128-129) cita que.

O sistema de posicionamento baseia-se no receptor GPS marinho com Interface NMEA2000 (*Garmin GPS 19x*). Este receptor é compatível com o protocolo J1939. Para integrar os dados do barramento CAN e RS-232, um computador portátil robusto (*Panasonic Toughbook CF-19*) foi embarcado com um adaptador de barramento CAN (*NI USB-8473*). O software utilizado foi desenvolvido no *NI LabVIEW* e suas principais funções são: ler o barramento de dados CAN, ler dados RS-232, registrando e os armazenando e na sequência gravar os dados fundidos no barramento CAN. Além dessas funções, o sistema fornece uma interface para o usuário inserir dados e monitorar o status do sistema. O servidor para acesso de dados OPC UA, é outro software que comunica com o descrito usando o barramento CAN, conectado ao conector de barramento CAN padrão usado ISSO 11783-2 (2012) na cabine. Isso permite executar o software no mesmo computador ou em outro computador de bordo. Nos testes, um computador dedicado (*Intel NUC* com um adaptador de barramento CAN) foi usado para executar com modem de rede móvel 3G, sendo o mesmo desenvolvido usando linguagem C++ e um SDK (fornecido por *Unified Automation*). Os dados são recebidos do barramento CAN, no formato SAE J1939, o servidor internamente lida com mensagens CAN recebidas a uma taxa de amostragem de 10 ms. Dados do monitor relacionados ao rendimento foram encapsulados em CAN proprietário, enquanto os dados do motor e do GPS estão de acordo com as normas SAE J1939 e NMEA2000.

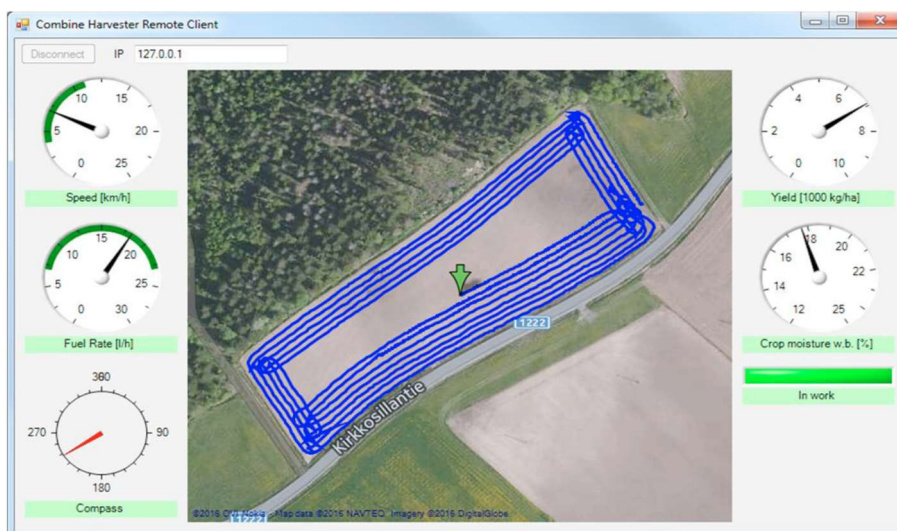
Figura 23 - Interface do usuário do software LabVIEW



Fonte: Oksanen, Linkolehto & Seilonen (2016)

Uma interface desenvolvida para monitorar remotamente a colheitadeira pode ser vista na Figura 24. Ela é considerada o cliente do processo, sendo utilizada para disponibilizar os dados da operação. Para tal, foi empregado um *desktop*, onde foi desenvolvido um *software* em linguagem C#. O link de dados foi implementado usando o SDK (fornecido pelo *Unified Automation*), tendo boa parte dos componentes que fazem parte da interface do usuário disponibilizados pela biblioteca do *NI Measurement Studio*. O mapa foi desenhado com auxílio do *GMap*. Tal processo possibilita a leitura do servidor móvel, por meio da Internet. Na Figura 24, é mostrada a tela do cliente remoto.

Figura 24 – Tela do cliente no Software OPC UA para colheitadeira



Fonte: Oksanen, Linkolehto & Seilonen (2016).

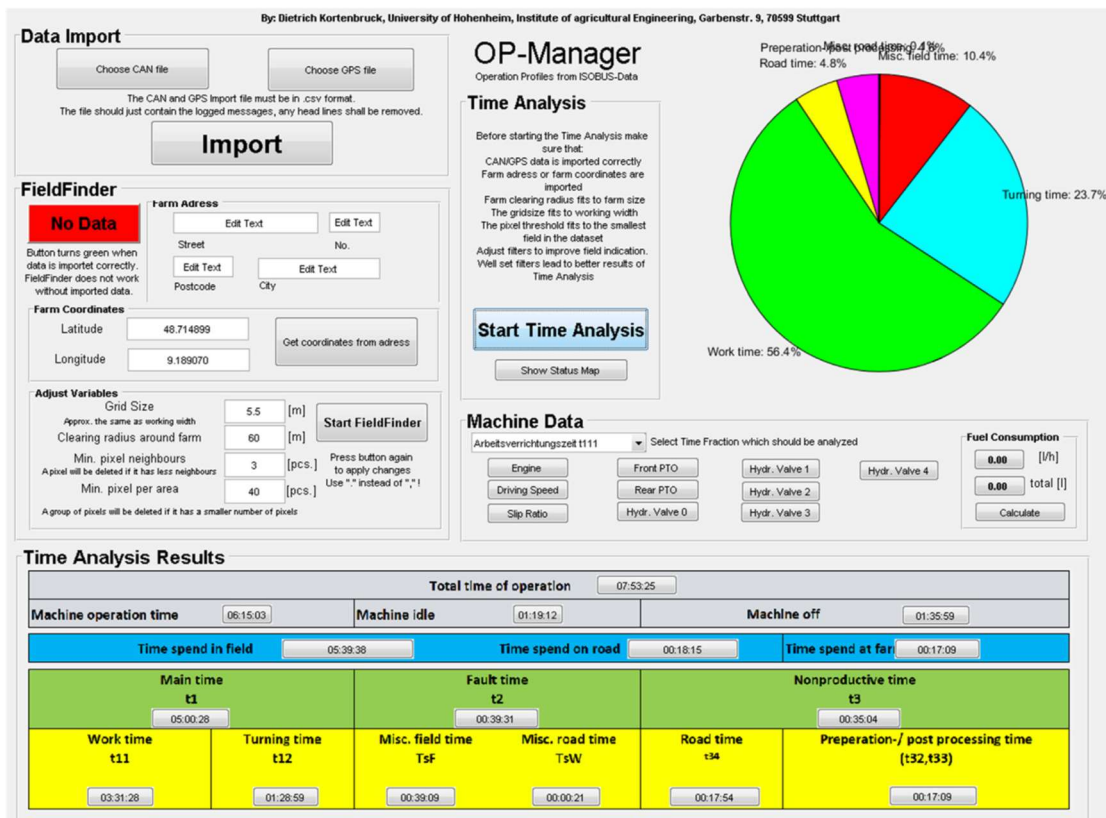
Com o experimento foram definidos os padrões para dispositivos de *Internet-of-Things*. Pode-se considerar OPC UA como uma tecnologia potencial que tem condições de atingir o objetivo proposto, uma vez que preenche os requisitos gerais de segurança e comunicação segura, já testadas e aprovadas na indústria. Também, obteve êxito no acesso remoto de parâmetros da colheitadeira, porém, a implementação do servidor requer um esforço maior devido à necessidade de criação de um modelo de transmissão da informação, o qual possibilite a combinação da colheitadeira com um sistema de monitoramento de rendimento e de posicionamento, multiplexando os dados em um único barramento CAN.

Com o intuito de padronizar as interfaces de comunicação utilizando o protocolo CAN, Kortenbruck (KORTENBRUCK, GRIEPENTROG & PARAFONOS, 2017) realizou um estudo sobre perfis de operação de máquinas, envolvendo informações sobre o processo e veículos automatizados e equipamentos agrícolas. Para tal, foi utilizada a interface de comunicação ISO 11783 (ISOBUS), a qual tem sua norma e requisitos descritos em Ronkainen (RONKAINEN, 2013), que é a base para realizar a aquisição de dados de forma confiável e abrangente. O experimento foi realizado utilizando um trator operando em uma área de cultivo, equipado com um registrador de dados CAN para mensagens relacionadas ao ISOBUS, além de um sistema de navegação por satélite GNSS para gerar os dados de posição. Também, foi utilizada uma interface gráfica que realiza a interação homem/máquina com o usuário, e tem como objetivo facilitar e simplificar a configuração e o uso do *software*. Dessa forma pôde-se

analisar, por meio de algoritmos, a comunicação da máquina em relação ao estado real, com base na sua posição, e o estado de trabalho, que pode ser visualizado na interface.

A interface gráfica do usuário (IGU) é responsável por decodificar e analisar as mensagens. Por meio dela consegue-se controlar todas as funcionalidades do sistema. Uma vez que os arquivos com os dados CAN e GNSS foram importados para o sistema, é possível realizar as configurações para detecção do posicionamento no campo. Os resultados obtidos são apresentados em um gráfico e em uma tabela na IGU, e segundo os autores, para verificar se a posição da máquina e a fração de tempo se correlacionam entre si, um mapa de status pode ser mostrado clicando no botão "Mostrar mapa de status". Este mapa permite uma avaliação visual simples do estado da máquina, dependendo da posição da máquina. A IGU pode ser vista na Figura 25.

Figura 25 - Interface gráfica do usuário do *software* desenvolvido



Fonte: Kortenbruck, Griepentrog & Parafonos, (2017)

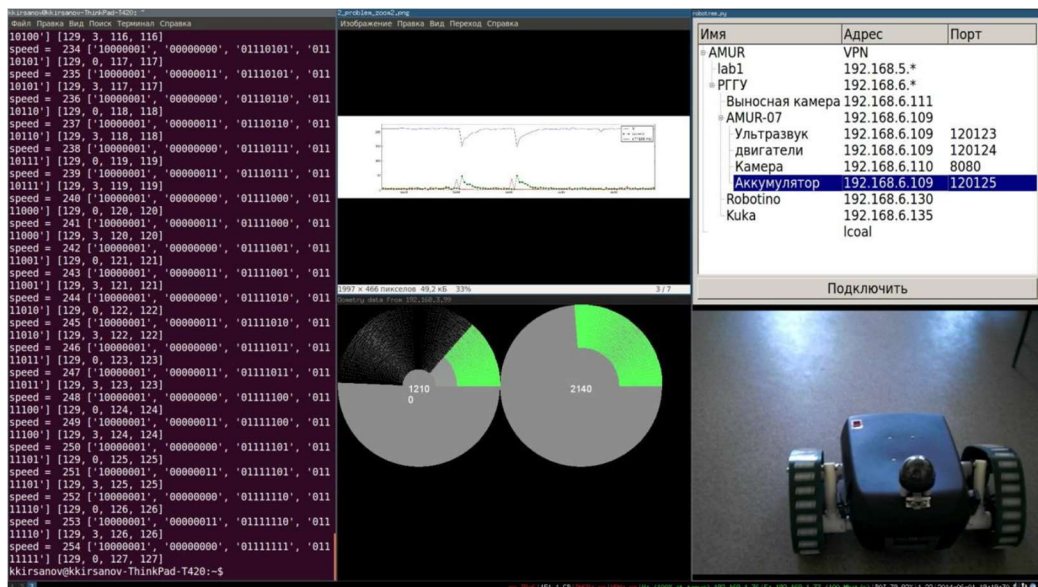
Para realizar uma boa análise de um sistema, é fundamental saber da tarefa que está sendo realizada todo o subprocesso que envolve a condição atual da máquina. Nesse contexto, se faz necessário uma classificação de tempo reconhecida, para dividir uma tarefa ou uma operação em frações significativas, o que permite comparar os resultados de compatibilidade

entre diferentes máquinas e fabricantes. Segundo os autores a classificação de tempo KTBL 2013 parece cumprir estas especificações.

Outra linha de desenvolvimento de interfaces que vem sendo desenvolvida é a utilizada em robôs agrícolas teleoperados. Em Andreev (ANDREEV, et al., 2015) os autores apresentaram resultados relacionados a pesquisas que tratam do desenvolvimento de um sistema supervisorio, através da internet, para dispositivos mecatrônicos, e propuseram uma ferramenta para realizar a gestão de um grupo de robôs, combinando as informações dos seus sistemas de medição e controle em uma rede local. O trabalho, teve como objetivo sanar dificuldades de transmissão de dados de um controle distribuído. Utilizando o conceito de *drivers* como um dos principais requisitos, foi projetada a arquitetura e definida a técnica para implementação do projeto piloto deste laboratório.

O acesso aos dispositivos mecatrônicos podem ser feito por meio de uma interface, a qual possibilita observar os robôs disponíveis, conectar-se a um deles para executar operações, e analisar os dados dos sensores disponíveis. Uma vez mapeada adequadamente, a rede hierárquica da estrutura na interface gráfica do usuário pode ser projetada utilizando um aplicativo com uma interface hierárquica de janelas, sendo cada área de uma janela usada por um componente do sistema para exibir dados. Na Figura 26, é mostrado um exemplo de um dos níveis dessa interface hierárquica de janelas.

Figura 26 - Visualização de um dos níveis da interface gráfica de usuário hierárquico de janelas da rede de laboratório da Internet



Fonte: Andreev, et al. (2015)

Outra pesquisa que segue a mesma linha pode ser encontrada na proposta do trabalho de Adamides (ADAMIDES, et al., 2017), onde os autores realizaram uma investigação referente a usabilidade de modos distintos de teleoperação de um sistema robótico agrícola, os quais requerem uma interação homem/máquina efetiva e eficiente. Utilizaram, no experimento, uma IHM, dois tipos de mecanismos de suporte à visão periférica (visão única, e múltiplas visualizações) e dois tipos de dispositivos de entrada de comandos (teclado de PC, e PS3), para uma plataforma robô pulverizador agrícola, o qual pode ser visto na Figura 27. Foram realizadas basicamente duas tarefas simultaneamente com o AgriRobot: orientação do caminho (navegação do robô) e detecção e pulverização dos alvos em condições de campo.

Figura 27 – Robô agrícola pulverizador



Fonte: Adamides, et al., (2017)

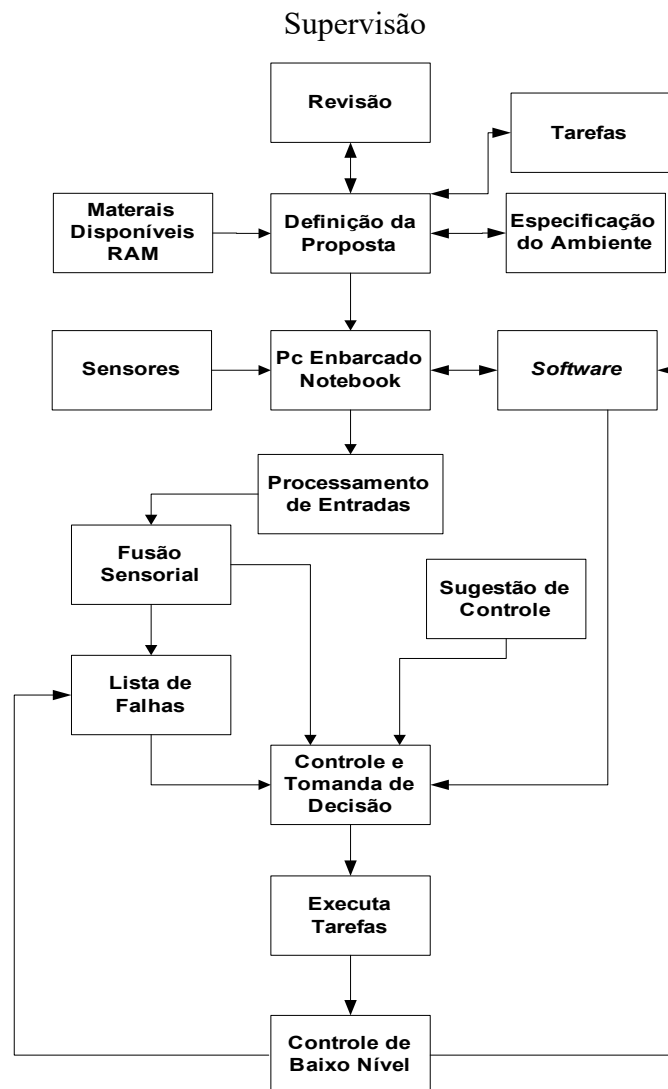
Baseado nos resultados obtidos, foi possível constatar que ao teleoperar um robô, os operadores confiam na imagem de vídeo para determinar a melhor maneira de navegar no ambiente, e que uma interface centrada em vídeo é mais eficaz na observação do ambiente e na conclusão das atividades, principalmente se a interface do usuário possuir múltiplas imagens, o que facilita identificar o obstáculo e os cachos de uva para pulverizar. Já para o envio de comandos, o teclado é significativamente superior ao *gamepad PS3*, em termos de tempo para completar a tarefa, e usabilidade.

Foi também observado que a interface com o usuário pode ser melhorada, apresentando informações do sonar, *feedback* em relação a carga das baterias, e do nível no tanque de pulverização.

3 Metodologia

A definição da proposta e a metodologia empregada no desenvolvimento do presente trabalho estão embasadas na revisão bibliográfica e entre outros fatores, como especificações ambientais onde serão conduzidos os experimentos, quais tarefas serão realizadas e o material disponível para ser utilizado como laboratório de desenvolvimento. Dessa forma foi possível elaborar um fluxograma compacto, o qual serve de referência estrutural para a concepção de um Sistema de Controle e Supervisão, que pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 - Fluxograma do processo de desenvolvimento do Sistema de Controle e



Fonte: Próprio autor

Analisando o fluxograma e o dividindo em duas partes, pode-se observar que a parte superior está relacionada ao desenvolvimento da proposta de um Sistema de Controle e Supervisão para uso na robótica agrícola móvel. Para tal, foi realizada uma revisão bibliográfica, onde pôde-se determinar as necessidades e as carências existentes neste tipo de aplicação, entre elas, vale destacar um sistema supervisorio modular que não seja específico de uma plataforma. Para tal, foram estudados os modelos estruturais de plataformas existentes, os sensores proprioceptivos e exteroceptivos utilizados por elas, os métodos e algoritmos empregados na fusão sensorial e no controle de trajetória, e os sistemas de controle e supervisão existentes neste seguimento da robótica móvel.

Com o embasamento teórico adquirido na revisão da literatura científica foi possível identificar a existência de inúmeras tarefas e aplicações envolvendo a robótica agrícola móvel e a automação de máquinas convencionais. Nesse sentido, constatou-se a importância de definir as tarefas e especificar o tipo de ambiente no qual será utilizada a plataforma. Dessa forma, foi estabelecido que a tarefa a ser executada no presente trabalho, é promover a interação homem/máquina e desenvolver um módulo de controle de condução para um robô utilizado em ambientes não estruturados como, por exemplo, ruas de acesso a plantações e linhas de plantio em pomares.

Uma vez definidas as tarefas e o tipo de ambiente onde serão executadas, foi realizado um levantamento do material disponível e se eles apresentavam condições ideais para o desenvolvimento do Sistema de Controle e Supervisão. Para tal foram considerados para definir a metodologia empregada, o sensoriamento independente de marcas e modelos, a junção de informações de fontes auxiliares, a portabilidade do sistema para outra aplicação, a segurança operacional e possuir uma IHM.

Na sequência, após a definição da proposta, o fluxograma traz a metodologia de trabalho utilizada, onde inicialmente é empregado um computador embarcado, o qual possui conexões com os sensores e o *software* utilizado para o desenvolvimento do Sistema de Controle e Supervisão. Esse conjunto é responsável pelo processamento das entradas sensoriais e das informações disponibilizadas pelo controle de baixo nível.

Os dados provenientes do processo passam por um método de filtragem modular, o qual realiza fusões pontuais entre informações sensoriais envolvendo sempre ao menos duas fontes diferentes, fornecendo um resultado mais confiável que pode ser utilizado diretamente por outro módulo ou como entrada em outra fusão. Para tal, foi estabelecido um método de filtragem sequencial empregando o EKF e o filtro complementar básico. Dessa forma, é possível obter

informações relacionadas ao deslocamento do robô independentemente da sua modelagem cinemática, além de realizar a substituição dos sensores de forma simples e eficiente sem grandes alterações no programa principal.

As informações utilizadas pelo módulo “lista de falhas” são as disponibilizadas pela fusão sensorial e pelo controle de baixo nível, as quais tem os valores comparados em blocos comparadores com valores de referência estabelecidos previamente, disponibilizando para o módulo controle e tomada de decisão, três possíveis condições referentes a cada variável comparada.

Além da entrada descrita, o módulo recebe mais duas, os dados fusão sensorial que contém informações relacionadas ao deslocamento angular do robô, distância percorrida, velocidade de deslocamento, posição georreferenciados, entre outras. Também utiliza as informações do módulo sugestão de controle, o qual utiliza sistemas de visão computacional, para gerar uma saída contendo informações sobre a existência de área navegável e a presença de possíveis obstáculos na trajetória do robô.

Os comandos enviados via *software* para o módulo de controle e tomada de decisão, juntamente com as três entradas de informações descritas, passam por um processo de ponderação. Dessa forma, é possível analisar o cenário em que o robô se encontra durante sua condução e ponderar a saída de uma instrução de comando. Para tal, foram estabelecidas quatro possíveis condições, sendo elas:

1. Normal – não existe nenhum risco operacional eminente e o comando enviado pelo sistema operacional pode ser executado;
2. Atenção – o comando enviado pode ser executado, porém exige um estado de atenção devido a fatores como, por exemplo, uma manobra, um obstáculo distante, a operação estão ocorrendo em terreno íngreme, entre outros;
3. Atenção com ação – nesse caso, foi identificado a existência de um obstáculo a frente e existe possibilidade de desvio. Para tal, se estiver no modo automático é chamada uma rotina contendo os comandos necessários para realizar a manobra. Caso esteja sendo operado manualmente, se não for realizada uma ação de desvio, o sistema para o robô;

4. Perigo – situação considerada insegura, ocorre quando existe algum risco operacional caso seja realizado o envio do comando para o controle de baixo nível.

Todos os comandos disponibilizados pelo módulo e descritos acima, são enviados para o módulo “executa tarefa”, o qual utiliza um algoritmo baseado na geometria de *Ackerman*, sendo o mesmo responsável por traduzir o comando enviado pelo sistema operacional em variáveis utilizadas pelo controle de baixo nível.

A metodologia utilizada no desenvolvimento do Sistema de Controle e Supervisão, tem como objetivo principal estabelecer diretrizes a serem seguidas para obter o melhor resultado possível na implementação do sistema proposto. O qual tem características inovadoras para o setor agrícola e oferece alternativas viáveis para solucionar a questão da portabilidade entre aplicações robóticas. O modelo que trabalha como um *middleware* entre aplicações de alto nível e o controle de baixo nível, possui características modulares e a junção de sistemas de visão computacional com dados obtidos com a fusão sensorial.

A seguir, são apresentados os componentes e os diferentes sistemas e subsistemas utilizados pelo robô agrícola móvel (RAM), destacando o sistema mecânico e sua estrutura tubular, sistema eletromecânico de tração e guiagem, sistema de controle de baixo nível com seus respectivos módulos de controle. Também é abordada toda parte de sensoriamento e sistemas de visão computacional, descrevendo dessa forma os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

3.1 Robô Agrícola Móvel (RAM)

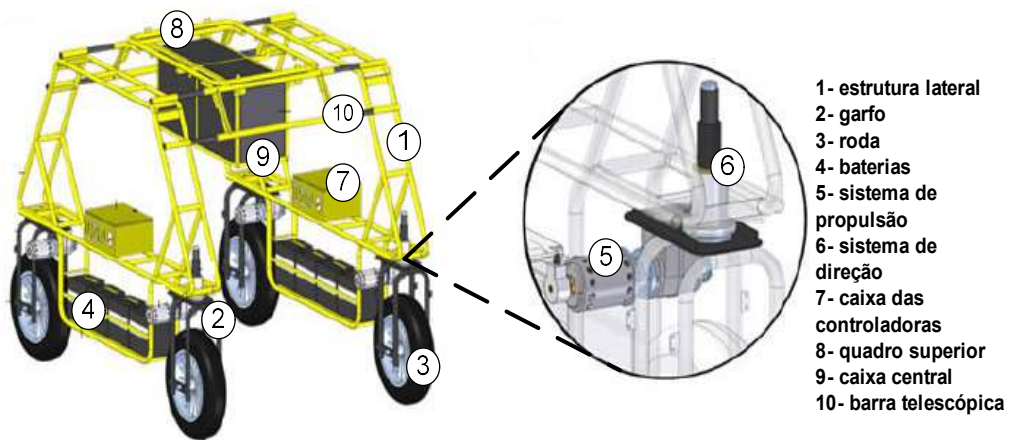
A plataforma utilizada como laboratório para realizar os experimentos e testes do Sistema de Controle e Supervisão é o RAM (robô agrícola móvel), desenvolvido no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Automação e Simulação (NEPAS), tendo seu uso diretamente relacionado a aplicações agrícolas. O RAM possui um sistema mecânico bastante simples, o qual é composto de uma estrutura tubular, montada sobre quatro conjuntos de garfos, também tubulares. Os garfos, além de sustentarem a estrutura do robô, são a base de fixação do conjunto motor-redutor responsáveis pela tração. Na Figura 29 é mostrado o RAM em sua versão atual e na Figura 30 seu modelo estrutural e a configuração dos motores de guiagem e propulsão.

Figura 29 - Robô Agrícola Móvel - RAM



Fonte: Próprio autor

Figura 30 - Robô Agrícola Móvel (RAM). Detalhe do módulo da roda dianteira e sistema de propulsão e guiagem



Fonte: Adaptado de Tabile et al., (2011).

O RAM possui tração nas quatro rodas e utiliza motores DC de 24V x 750W acoplados a um redutor com taxa de redução de 1:25. Tal conjunto está conectado a um sistema de transmissão com a roda, composto por coroa/corrente/pinhão, com taxa de redução de 1:3. Desta forma, a redução resultante do sistema de tração é de 1:75 em relação ao motor, garantindo um bom desempenho do RAM em variados terrenos e um controle de tração individual para cada roda. O sistema de guiagem também é individualizado, porém, só está presente nas duas rodas dianteiras e é composto por um motoredutor, com motor DC de 48V x

150W e, um redutor com taxa de redução de 1:230. A distribuição elétrica é realizada no painel traseiro, o qual possui fusíveis, chaves seletoras, botões e lâmpadas sinalizadoras, onde são realizadas as conexões necessárias para gerar a tensão dos motores de tração que operam com 12VCC e dos motores de guiagem, que operam com 24VCC. O fornecimento de energia para a alimentação dos motores e todo sistema embarcado é proveniente de um conjunto composto por baterias de 12V x 70Ah. Além do painel principal o robô possui mais dois painéis localizados um em cada lateral da sua estrutura, onde se encontram os módulos de controle dos motores de tração e guiagem, e os módulos de comunicação que utilizam o protocolo CAN.

3.1.1 Sistema Eletrônico e Módulos de Controle

O RAM se desloca utilizando a tração individual das rodas e executa as manobras realizando o esterçamento das rodas dianteiras. Todo o controle de baixo nível, o qual é responsável por manter o ângulo de esterçamento e a velocidade desejada, está baseado na utilização de módulos de controle (controladoras) e interface CAN/RS232.

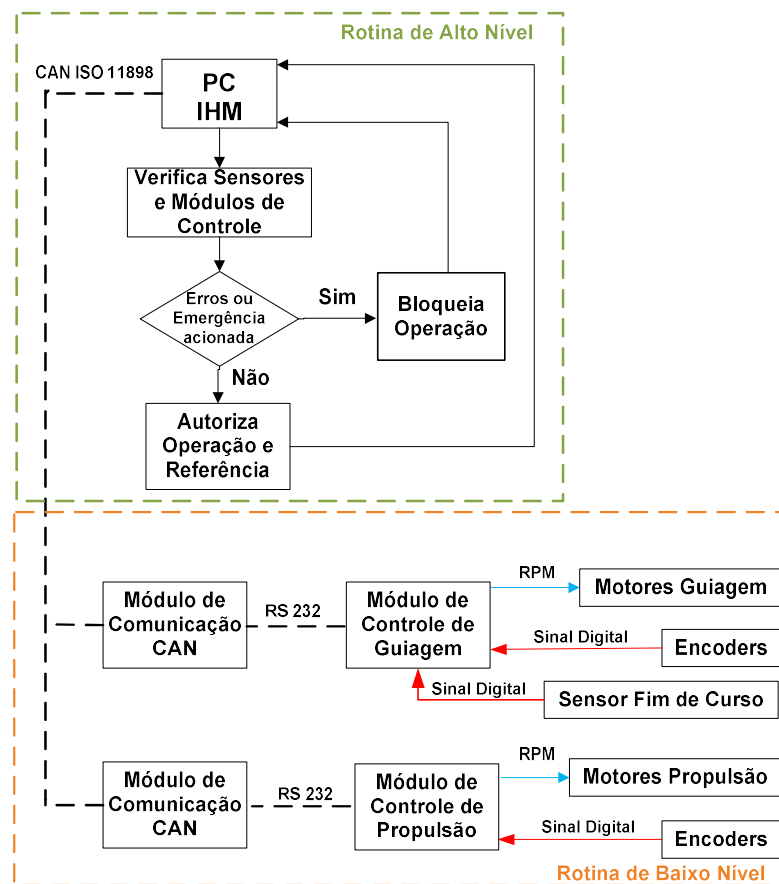
Existem dois painéis laterais na estrutura do RAM e cada um deles é responsável pelo controle dos motores de tração e de guiagem do seu respectivo lado. O painel é composto por duas placas de interface CAN, as quais realizam a comunicação entre o controle de baixo nível e o Sistema de Controle e Supervisão.

Cada um dos painéis de controle possui, além das placas de interface, duas controladoras, sendo uma de maior potência (modelo AX 2550), a qual é responsável pelo controle de velocidade e posicionamento dos motores de tração. A controladora também disponibiliza, para o Sistema de Controle e Supervisão, informações referentes à velocidade, consumo de energia, entre outros. A outra controladora (modelo SDC2150), possui características parecidas com a descrita anteriormente, porém tem menor potência e controla apenas um motor, o de guiagem.

Uma vez definido o *Hardware* e identificadas as variáveis disponibilizadas pelas controladoras dos motores, é possível gerar um diagrama simplificado do funcionamento da plataforma robótica RAM, no qual é demonstrada a interação entre as rotinas de alto e baixo nível, responsável pelo funcionamento de todo o sistema básico utilizado para locomoção e a realização de manobras. Do ponto de vista prático, pode-se considerar uma integração entre a camada de controle de baixo nível e o Sistema de Controle e Supervisão, sendo transmitidas informações da camada inferior para a superior, as quais são analisadas e retornadas em forma

de comando para executar a ação desejada. Após energizado, o robô só se torna funcional se não houver nenhum sinal de erro e o sistema de controle operacional estabelecer conexão com as controladoras em um tempo inferior a 20 segundos. Caso contrário, é gerado um sinal de erro e a operação não é autorizada. Para proporcionar um melhor entendimento, na Figura 31 é apresentado um diagrama simplificado das rotinas de alto e baixo nível do RAM.

Figura 31 - Diagrama simplificado de funcionamento do RAM



Fonte: Próprio autor

A rotina de inicialização verifica a existência ou não de falhas com base em informações enviadas do controle de baixo nível para um PC embarcado via barramento CAN. Na ocorrência de falhas, sejam elas provenientes do acionamento de botões de emergência ou indicadores de erro em qualquer um dos módulos de controle, procede-se o bloqueio do funcionamento do RAM. Caso contrário, o robô está liberado para executar tarefas.

Com relação a rotina de funcionamento, as linhas azuis correspondem aos sinais de controle, ou seja, aos comandos enviados do Sistema de Controle e Supervisão para os sistemas

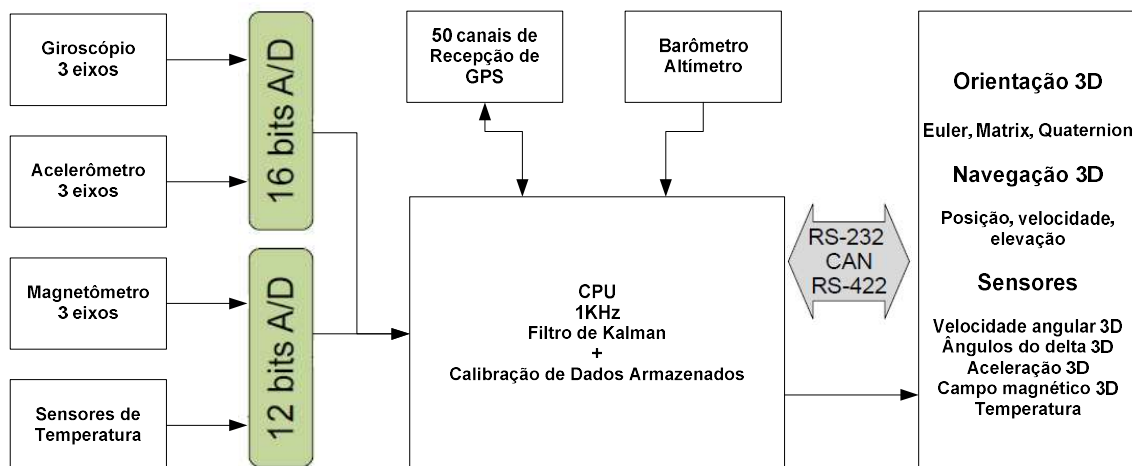
de esterçamento e o de propulsão. As linhas tracejadas correspondem à comunicação entre os módulos e o PC, e as linhas vermelhas representam os sinais de retorno dos sensores empregados para realizar os controles de tração e guiagem da plataforma robótica.

3.2 Sensores e Sistemas de Visão Computacional

Como observado no tópico anterior no diagrama de funcionamento do RAM, existem duas camadas distintas e o presente trabalho depende de um bom funcionamento da camada de baixo nível. Porém, utiliza a camada superior para desenvolver um Sistema de Controle e Supervisão para auxiliar na condução do RAM. Dessa forma, todos os sensores e as aplicações envolvendo câmeras estão diretamente relacionados com a camada superior.

A principal fonte utilizada para disponibilizar dados para o Sistema de Controle e Supervisão, o qual vai fornecer informações para realizar a condução, emitir alertas e até mesmo gerar algumas ações de controle relacionado a segurança da plataforma, é uma unidade de medida inercial (IMU), modelo IG-500N-G4a2P1-B, do fabricante SBG, a qual tem seu diagrama de funcionamento apresentado na Figura 32. Tal modelo possui giroscópio, acelerômetro e magnetômetro de três eixos, além de um GPS integrado, entre outros, e sua comunicação pode ser estabelecida via CAN, RS – 232 ou 422.

Figura 32 - Diagrama de bloco simplificado da IG-500N



Fonte: Adaptado de SBG (2018)

Os sensores utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, que são parte da IMU, são: um acelerômetro de 3 eixos, um giroscópio de 3 eixos, um magnetômetro de 3 eixos e um

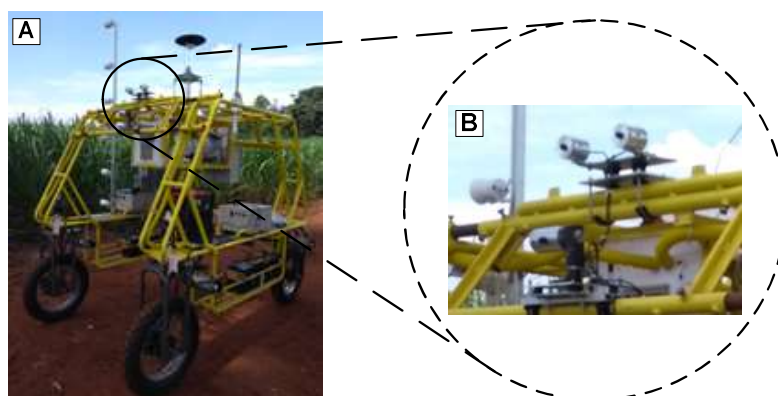
GPS. Mesmo existindo a possibilidade de utilizar os dados já retificados e até mesmo após realizar algum tipo de fusão pela IMU, foi feita a escolha da utilização dos dados disponibilizados diretamente dos sensores. Tal fator se deve à estratégia empregada no trabalho, que separa as fusões em módulos de processamentos individualizados, para se tornar independente de marca e modelo de sensor que está sendo empregado.

Dessa forma, tratada aqui como modular, é possível substituir sensores e aplicações que fornecem informações para o Sistema de Controle e Supervisão, sem a necessidade de realizar grandes mudanças no programa principal, fazendo apenas alguns ajustes.

3.2.1 Módulo de Visão Estéreo

O módulo de visão estéreo presente na plataforma RAM, atua gerando informações a respeito da possível presença ou não de objetos na região à frente do robô (área navegável), também informa a distância dos obstáculos, se estão próximos ou distantes da plataforma. O processo de aquisição das imagens se dá utilizando simultaneamente duas câmeras acopladas na parte frontal da Plataforma. As imagens capturadas pelas câmeras devem passar por uma série de processos até obter uma sequência de números binários como saída, a qual seja possível ser utilizada pelo Sistema de Controle e Supervisão embarcado no RAM. As câmeras utilizadas por este módulo, juntamente com sua base de fixação e a posição onde as mesmas estão acopladas na plataforma robótica, podem ser vistas na Figura 33.

Figura 33 - Configuração do veículo (A) e das câmeras utilizadas na captura de imagem (B)



Fonte: Próprio autor

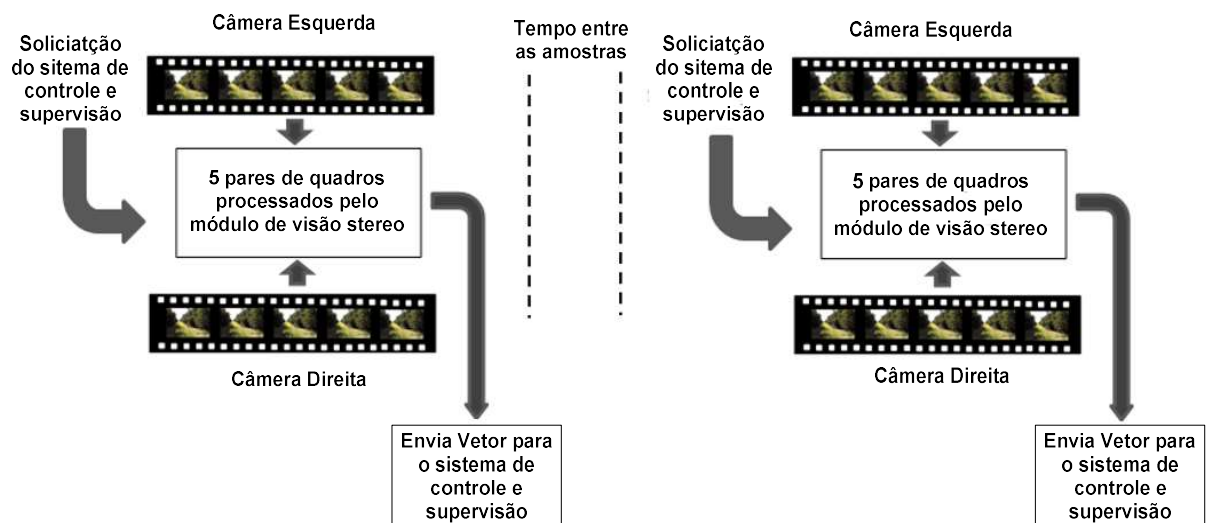
Neste procedimento, assim como no sensoriamento, os módulos fazem parte de um processo individualizado e independente. Portanto, a modelagem cinemática das coordenadas

do veículo e a das câmeras é ignorada, uma vez que a relação entre a captura de imagens com a correspondência geométrica é atribuída somente às características da resolução espacial e cromática das câmeras usadas.

Para realizar a aquisição das imagens, utiliza-se um par de câmeras USB, com taxa de aquisição de 30 quadros por segundo e com resolução de 640 x 480 pixels, compondo-se assim, ao mesmo tempo, um frame para cada câmera. Conforme o veículo se desloca pelo ambiente, são capturadas imagens da sua visão frontal, as quais são utilizadas para a construção da matriz de disparidade e para o cálculo da profundidade dos objetos observados na cena.

Desta forma, são processados sequencialmente 5 frames, os quais geram cinco conjuntos de características (largura do obstáculo, altura do obstáculo, volume do obstáculo, disparidade média e coordenadas espaciais do centroide do obstáculo). Com a média dos valores referentes a cada característica obtida, é atribuída uma posição correspondente no vetor de saída. O Sistema de Controle e Supervisão requisita tal valor, por meio da interface de comunicação, e cada requisição efetuada deve aguardar um período de tempo de aproximadamente 100ms para que seja efetuado o processamento das imagens e a transmissão do vetor. Na Figura 34, a seguir, é ilustrado tal procedimento.

Figura 34 – Processo de transmissão do vetor para o Sistema de Controle e Supervisão



Fonte: Próprio autor

Com base nos vetores recebidos, o Sistema de Controle e Supervisão deverá calcular, por meio de fusão com os demais subsistemas que compõem o módulo de controle e tomada de

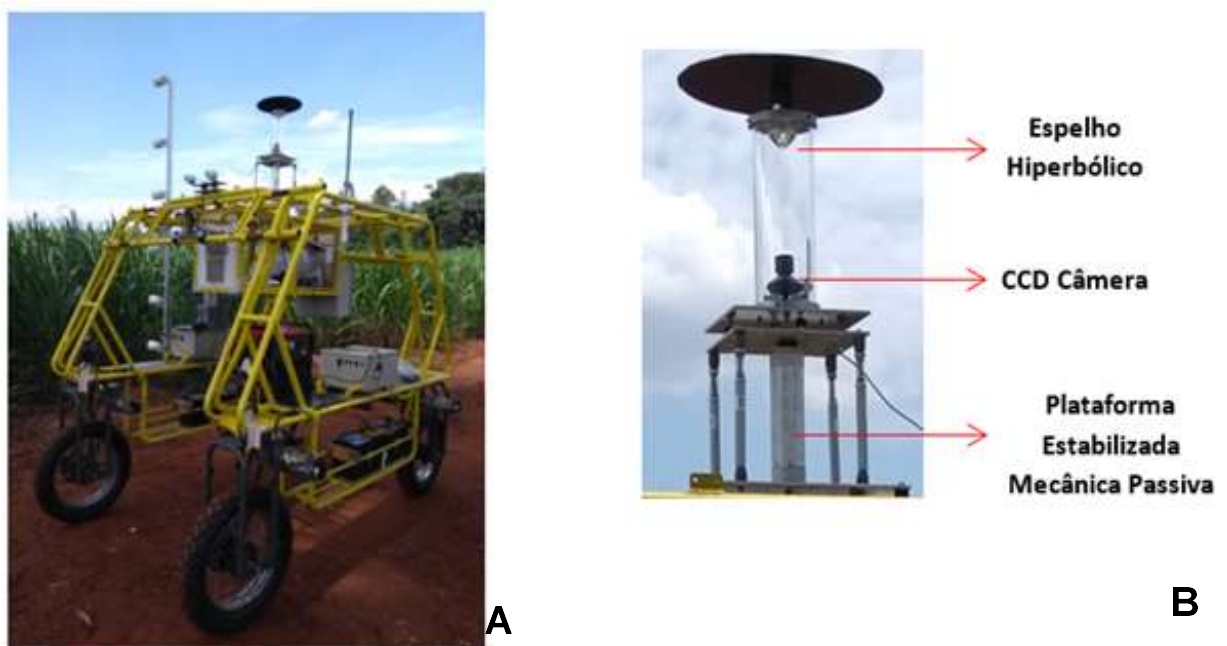
decisão, qual a melhor ação a ser adotada para tratar a situação reportada pelo Sistema de Visão Estéreo (presença ou ausência de obstáculos).

3.2.2 Módulo de Visão Omnidirecional

O Módulo de Visão Omnidirecional presente na plataforma RAM é responsável por gerar informações sobre a existência ou não de áreas navegáveis nas quatro possíveis direções a serem seguidas pelo robô agrícola: frente, traseira, à esquerda e à direita.

Para tal, utiliza um sistema catadióptrico, baseado em espelho hiperbólico, que fornece informações do entorno do robô. Tal sistema, composto por um espelho hiperbólico e câmera de ccd, pode ser visto na Figura 35, a seguir.

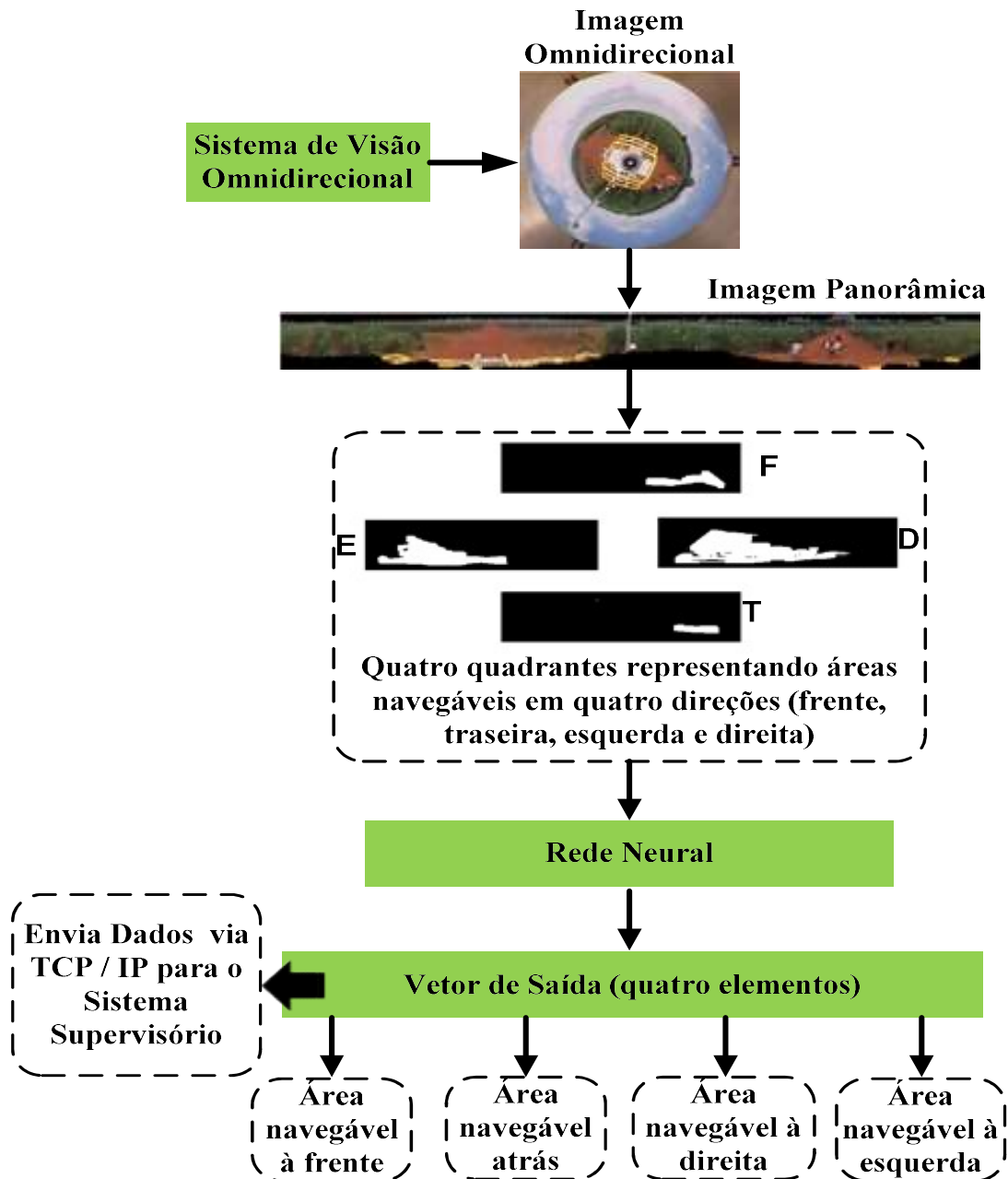
Figura 35 - Sistema de Visão Omnidirecional sobre a Plataforma RAM (A) e detalhe do conjunto catadióptrico (B)



Fonte: Próprio autor

O sistema de processamento das imagens omnidirecionais gera quatro saídas, as quais indicam a presença de área navegável na frente, esquerda, direita ou atrás. O diagrama de blocos que representa o funcionamento do sistema pode ser visto na Figura 36.

Figura 36 – Esquema contendo todo processo do módulo omnidirecional



Fonte: Próprio autor

As informações, contidas no vetor de saída referente a existência ou não de caminho, são enviadas ao Sistema de Controle e Supervisão do RAM, via TCP/IP.

O Sistema de Controle e Supervisão do RAM tem por objetivo realizar a fusão de informações disponibilizadas por todos os sensores e sistemas de câmeras, de forma modular e com processamento individualizado, dividindo o sistema em módulos, cada um com sua

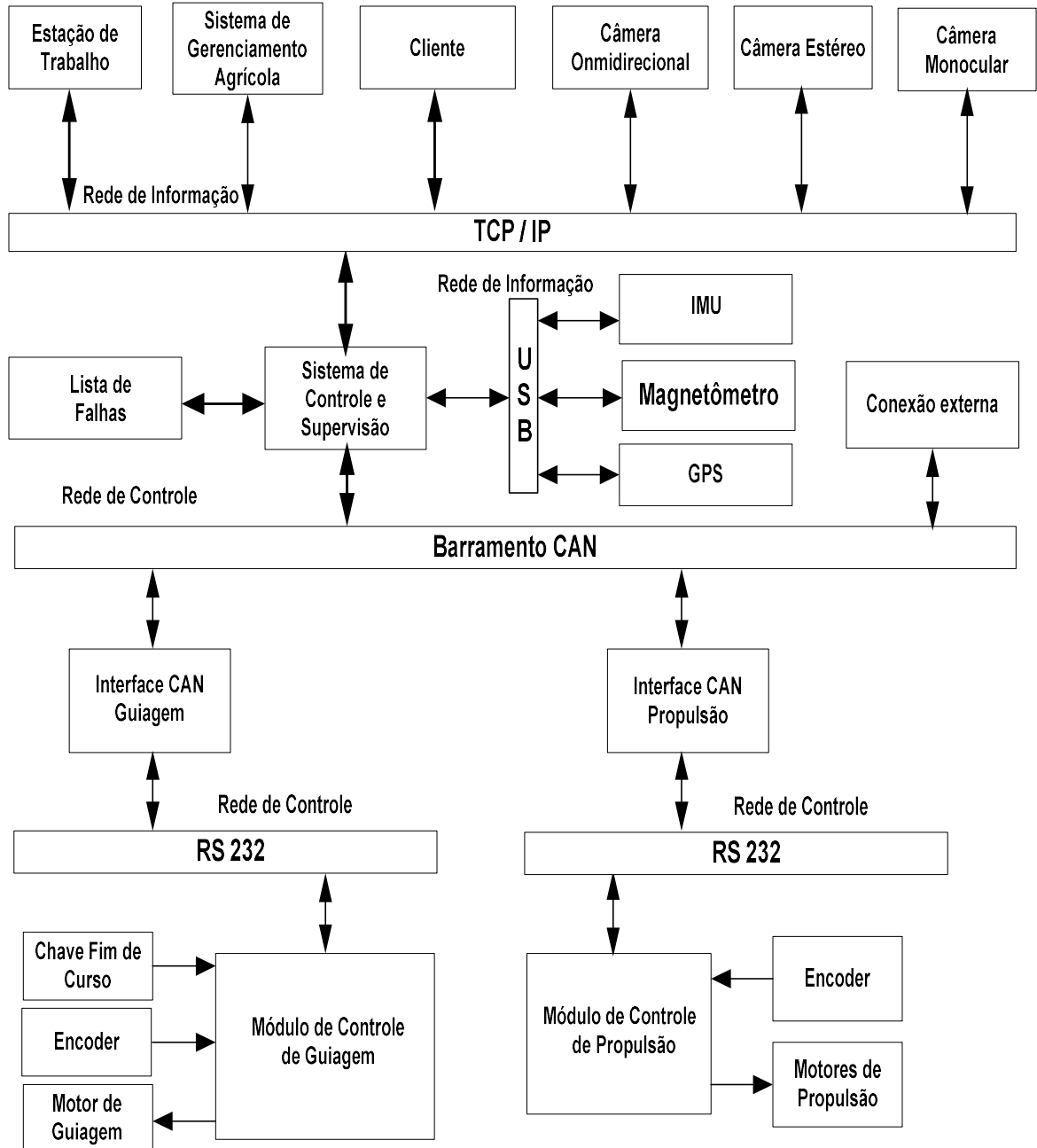
especificidade. Dessa forma, o custo computacional é reduzido, além de proporcionar a possibilidade da substituição dos sensores sem realizar alterações significativas no programa principal. Também possibilita a combinação dos resultados obtidos pelos módulos de sensoriamento com os módulos auxiliares, realizando a junção com os sistemas de Visão Estéreo e Omnidirecional, para auxiliar na condução da plataforma robótica, disponibilizando sugestões que geram ações de controle durante o deslocamento do RAM.

3.3 Arquitetura do Sistema de Controle e Supervisão

Nesse tópico é abordado o modelo estrutural da arquitetura empregada no desenvolvimento do Sistema de Controle e Supervisão, o qual tem a função de interagir com o controle de baixo nível, enviando comandos e recebendo informações como, por exemplo, posicionamento das rodas, velocidade de locomoção. Além disso, o sistema recebe os dados sobre o funcionamento das controladoras e informações básicas, como nível de carga das baterias, sobrecarga de componentes, entre outras. Outra forma de interação ocorre com aplicações de alto nível, por meio do emprego de uma interface homem máquina (IHM) com acesso remoto, para possibilitar maior integração entre o operador e o robô, permitindo o envio de comandos, a definição dos módulos de controle operacional e disponibilizando informações sobre o funcionamento do robô para o usuário, através de instrumentos virtuais. Também ocorre uma interação do Sistema de Controle e Supervisão com sistemas de visão computacional, os quais são utilizados para auxiliar na condução da plataforma robótica em ambientes não estruturados.

Os detalhes relativos à fusão sensorial e o uso dos módulos auxiliares são mostrados e explicitados, usando como base a estrutura de interligação dos subsistemas presentes no RAM. Esta estrutura leva em conta os subsistemas embarcados ou não como, por exemplo, controladoras de baixo nível, computadores, estações de trabalho, sensores e módulos de visão computacional, que são interligados por meio de barramentos, como mostrado na Figura 37, onde é possível ter uma visão geral dos barramentos responsáveis pela comunicação entre os módulos e os equipamentos utilizados no presente trabalho.

Figura 37 - Diagrama de conexão entre os subsistemas do RAM



Fonte: Próprio autor

No diagrama, as redes de comunicação foram divididas em dois grupos com funções distintas: rede de controle e rede de informação. A rede de controle é responsável pela troca de informações e dados entre o Sistema de Controle e Supervisão e toda parte de controle de baixo nível embarcada no RAM, sendo composta por dois barramentos. O protocolo de comunicação CAN ISO 11898 é responsável por realizar a interconexão entre o Sistema de Controle e Supervisão e os módulos de interface CAN. Por sua vez, o protocolo de comunicação da rede

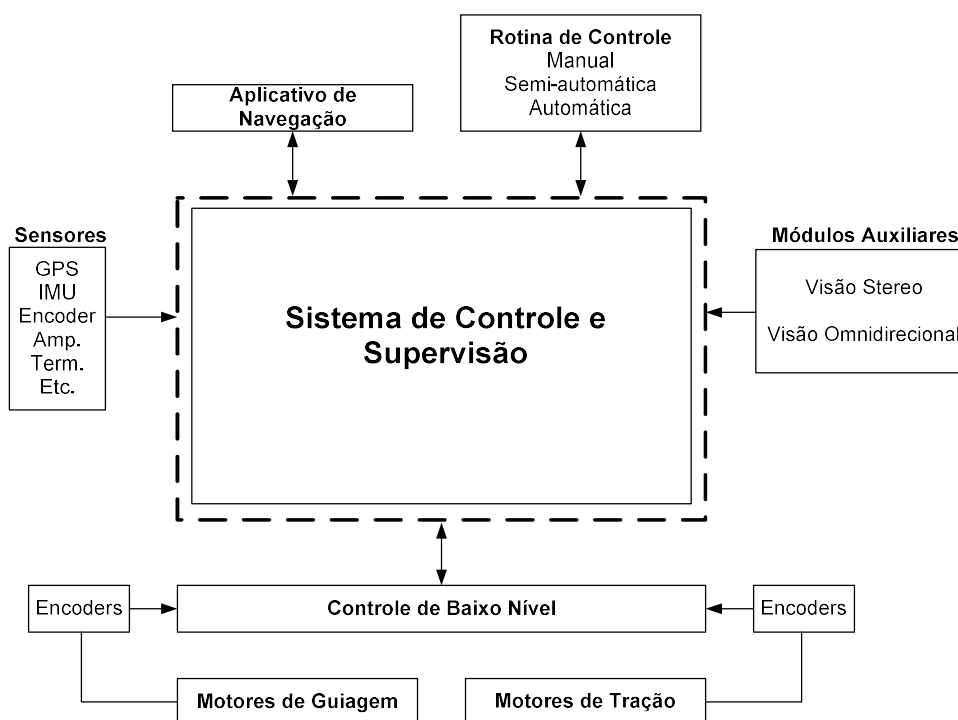
de controle utiliza o protocolo de comunicação RS-232, o qual realiza a interação entre as controladoras de baixo nível e os módulos de interface CAN.

A rede de informação por sua vez, está destinada a estabelecer uma conexão de alto nível entre o Sistema de Controle e Supervisão e os demais aplicativos, subsistemas de visão computacional e sensores como, por exemplo, GPS e IMU. Tal rede utiliza basicamente conexões via USB para os sensores, além de estabelecer comunicação via TCP/IP para aplicativos externos, como, por exemplo, módulos de visão de máquina.

O bloco no diagrama denominado Sistema de Controle e Supervisão, é o foco principal do presente trabalho, cuja aplicação está relacionada diretamente à condução de uma plataforma robótica agrícola móvel de grande porte. Dentre as suas características inovadoras, destaca-se o fato do sistema ser modular, aceitar a integração de diferentes sensores e sistemas auxiliares, ser portátil e independente do controle de baixo nível, além de proporcionar uma interface amigável com o usuário, a qual disponibiliza alertas e promove ações voltadas à segurança durante a condução do robô. Também é possível gerar um banco de dados e estabelecer a comunicação do RAM com os sistemas gerenciais, facilitando sua operação e permitindo respostas rápidas frente às mudanças das variáveis, espaços temporais e econômicas, com que a agricultura tem que lidar constantemente.

Basicamente, foi realizado o desenvolvimento de uma camada de *software (Middleware)* que proporciona uma interface amigável com o operador e realiza determinadas ações de controle de condução automaticamente, as quais são baseadas em informações disponibilizadas pela fusão de dados sensoriais e sistemas auxiliares. O Sistema de Controle e Supervisão tem o objetivo de promover a interação entre os subsistemas embarcados e utilizar as informações recebidas de sensores e de módulos auxiliares presentes na plataforma robótica. Dessa forma, quando recebidas as informações passam por um processo de tratamento e são utilizadas como sugestões de controle. Na Figura 38, pode ser visto um diagrama de blocos contendo as entradas e as possíveis interações referentes ao Sistema de Controle e Supervisão.

Figura 38 - Diagrama com as entradas e as interações do Sistema de Controle e Supervisão



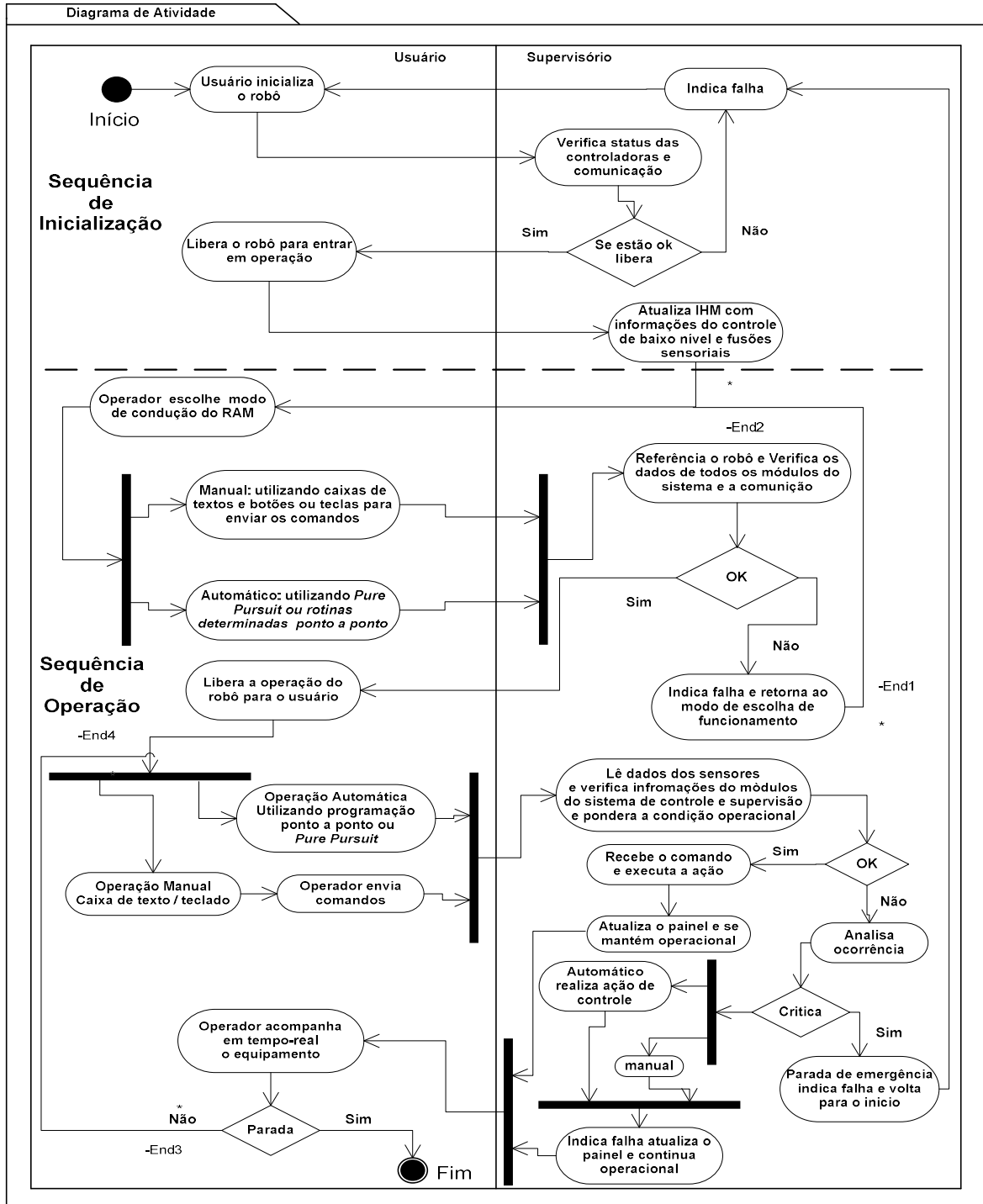
Fonte: Próprio autor

Para atender aos objetivos propostos e implementar um Sistema de Controle e Supervisão (*middleware*), foram desenvolvidos módulos independentes para realizar a fusão sensorial. Pela definição de tais módulos, aliado ao fato de que todos devem fornecer apenas dados brutos para serem trabalhados internamente pelo Sistema de Controle e Supervisão, estabeleceu-se assim a independência do tipo e marca de equipamento ou sensor que está disponibilizando as informações. Outro fator relevante em relação ao Sistema de Controle e Supervisão, é que baseado na pesquisa realizada e nos moldes propostos, ele pode ser considerado inovador devido ao fato que cada módulo tem uma função única dentro do sistema, realizando o processamento de dados específicos, e disponibilizando as suas informações de forma independente, reduzindo assim o custo computacional, aspecto bastante vantajoso para sistemas embarcados.

Nesse contexto, o Sistema de Controle e Supervisão aplicado à robótica agrícola móvel, além de ser uma abordagem com grande potencial de desenvolvimento de novas técnicas, também possibilita dividir o sistema de controle em duas camadas distintas: Sistema de Controle e Supervisão, o qual passa a atuar como uma camada intermediária um (*middleware*) e o sistema de controle de baixo nível. Esse modelo possibilita que o Sistema de Controle e

Supervisão seja utilizado em qualquer robô, independente do modelo e sistema de controle de baixo nível empregado, realizando apenas alguns ajustes de parâmetros. Um diagrama contendo a interação entre o sistema e o operador pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 - Diagrama interação Sistema de Controle e Supervisão e operador



Fonte: Próprio autor

Por meio do diagrama de interação é possível observar que existe uma divisão entre usuário e o Sistema de Controle e Supervisão. Desta forma, é mais fácil observar a interação existente e como cada parte se comporta, sendo possível descrever uma ação executada pelo supervisor, após receber um comando do operador. Nota-se também, que os comandos são sequenciais, portanto, só é permitido ao usuário passar de um estágio para outro se as condições estabelecidas pelo sistema forem satisfeitas.

Por exemplo, o RAM só entra em operação depois de passar por um procedimento de inicialização e de verificação pelo Sistema de Controle e Supervisão, onde é identificado se foi ou não estabelecida a comunicação entre os módulos, informações sobre os status das controladoras e os dados sensoriais. Uma vez concluída essa etapa, utiliza-se as informações disponibilizadas para atualizar a interface, e é executado o procedimento para referenciar o sistema de guiagem. Só após serem concluídos os passos descritos, e estando de acordo com o padrão estabelecido o robô é liberado para entrar em operação. Caso contrário, sinaliza falha e aguarda uma ação corretiva.

Dessa forma, com o RAM operacional, pode-se estabelecer a forma de conduzi-lo executando uma rotina predefinida como, por exemplo, definindo pontos de referência para utilizar o algoritmo *Pure Pursuit*, estabelecendo uma lista de ações no modo ponto a ponto, ou ainda, utilizando os botões virtuais da IHM ou teclado para conduzir o robô manualmente. As formas de condução previstas para o RAM, são descritas detalhadamente a seguir.

Modo de Condução Manual

Inserindo valores diretamente na IHM ou por meio de teclas, é possível realizar manobras e realizar o deslocamento do robô, procedimento que pode ser realizado com um computador externo conectado ao veículo ou por acesso remoto. Mesmo utilizando essa forma de condução, o Sistema de Controle e Supervisão limita algumas ações, enviando alertas de atenção e até mesmo realizando paradas emergenciais do robô, caso ocorra alguma situação de risco para a plataforma ou essa possa vir a causar algum dano externo.

O comando inicial é realizado por meio de botões acionados manualmente, e os comandos mais específicos escritos em caixas de texto e enviados diretamente para controle de baixo nível. Nesse processo, quando acionado o botão *enviar*, em uma segunda caixa de texto são disponibilizadas as informações de retorno do comando que foi enviado, desta forma, realizando o deslocamento linear da plataforma.

Para realizar manobras um valor numérico referente ao ângulo de esterçamento das rodas é preestabelecido em uma caixa de texto, e por meio de botões podem ser somados ou subtraídos do valor atual. Também existe um botão utilizado para o alinhamento das rodas, e o acionamento dos botões pode ser feito de forma manual ou utilizando as teclas f10, f11 e f12.

Modo de Condução Ponto a Ponto

Essa técnica de programação é bastante utilizada na robótica no segmento industrial, e consiste basicamente na definição de uma série de pontos e na velocidade de deslocamento desejada para uma determinada trajetória. Dessa forma é possível deslocar o robô de um ponto ao outro e repetir esse processo até completar todo o trajeto desejado. Para o caso do RAM, existe a possibilidade de realizar sua locomoção usando a técnica ponto a ponto para condução, e adicionalmente, inserir uma rotina predefinida para realizar desvio de obstáculos quando houver necessidade. Os comandos são enviados diretamente ao controle de baixo nível e são programados em C++, e os pontos podem ser definidos utilizando a distância percorrida, o ângulo de guinada e o tempo. O pseudocódigo do algoritmo ponto a ponto implementado pode ser visto a seguir.

Procedimento deslocamento ponto a ponto

Variáveis

Inteiro: valor; distância estimada

Flutuante: Distancia; distância recebida

Início

Leia (dist) distância total percorrida e filtrada

Faça

Distancia ← dist(:,1);

Se (Distancia > valor && Distancia < valor + 0.3) **Então**

Escreva serial_puts(comm_id, "speed 0.3;turn -5\n");

Senão

Escreva serial_puts(comm_id, "s\n");

Fim-Se

Fim

A desvantagem do método é o fato de não possibilitar alterações durante sua execução e não realizar correções em caso de desvio de rota. Contudo, apesar de não ser recomendado seu uso para navegação, o mesmo tem boa aplicabilidade para realizar pequenos desvios de obstáculos durante a condução do robô.

Modo de Condução *Pure Pursuit*

É um método utilizado para determinar geometricamente a curvatura que irá conduzir o veículo para um ponto do caminho escolhido, denominado ponto de meta (COULTER, 1992). O algoritmo trabalha de forma análoga à condução humana de um veículo, baseado na percepção de um ponto a uma certa distância à frente do veículo, e o conduz realizando correções antecipadas para chegar corretamente a esse ponto (WANG, HSU & WU, 2017). O algoritmo tem como característica uma implementação simples, e um resultado satisfatório em relação a seu desempenho na condução de um veículo, que trabalha em baixas velocidades. O pseudocódigo da implementação deste algoritmo no Sistema de Controle e Supervisão do RAM é mostrado abaixo.

Procedimento Pure pursuit

Variáveis

Flutuante: σ , x_{rob} , y_{rob} , y_r , x_r , $x_{ref}[100]$, $y_{ref}[100]$;

Flutuante: L , R_p , R_r , x_p , y_p , δ , σ_f , d ;

Inteira: $l = 2000$; distância entre eixos do RAM

Início

Leia (Pos , p_{geoX} , p_{geoY}) posição do robô e geográfica em (x , y)

$\sigma \leftarrow Pos(:,1)$;

$dx_r \leftarrow pos_{geo}(:,1)$;

$dy_r \leftarrow pos_{geo}(:,2)$;

faça

$\sigma \leftarrow \text{round}(\sigma)$; arredonda para o inteiro mais próximo

$x_{rob} \leftarrow x_r + (dx_r * -1)$; atualiza a posição x do robô

$x_r \leftarrow x_{rob}$; guarda valor para próxima atualização de x

$y_{rob} \leftarrow y_r + (dy_r * -1)$; atualiza a posição y do robô

$y_r \leftarrow y_{rob}$; guarda valor para próxima atualização de y

```
xref[100] ← { -0.00, -0.12, -0.23, -0.34, -0.58, -1.76,
-3.61, -5.53, -7.80, -10.87, -12.93 }; pontos de referência em x
```

```
yref[100] ← { 0.01, 2.80, 5.41, 8.00, 10.82, 12.96, 14.76,
16.48, 18.44, 17.38, 17.25 }; pontos de referência em y
```

```
Enquanto (int i = 0; i < 11; i++) Faça
```

```
    xp ← (xref[i] - xr);
    yp ← (yref[i] - yr);
    d ← (yp*yp) + (xp*xp);
    L ← sqrt(d);
```

```
    se (sigma == 0) então
```

```
        Rr ← 0;
```

```
    senão
```

```
        Rr ← 1 / tan(sigma);
        Rp ← L*L / 2 * xp;
        sigmaf ← atan((1 * 2 * xp) / L*L);
        delta ← abs(sigmaf) - abs(sigma);
```

```
        SE (L<0.3) então
```

```
            Parar;
```

```
        Fim-Se
```

```
    Fim-Se
```

```
    Fim-enquanto
```

```
Fim
```

A utilização desse método para realizar a condução automática do robô agrícola móvel RAM, por meio do Sistema de Controle e Supervisão, atende às condições básicas iniciais para o desenvolvimento de técnicas mais precisas de navegação, proporcionando uma estrutura confiável para a continuidade de pesquisas científicas relacionadas à robótica agrícola móvel.

Em todas as formas de condução, o Sistema de Controle e Supervisão realiza o monitoramento através de dados sensoriais, troca informações com os módulos de controle e atualiza as informações na IHM. Por sua vez, quando existir falhas ou condições de risco

operacional, é realizada uma análise pelo Sistema de Controle e Supervisão e a condição ou falha é separada segundo o grau de prioridade predefinido no sistema.

Quando a falha for considerada crítica e apresenta algum tipo de risco operacional para o robô, este para imediatamente, independentemente do modo de operação em que se encontra, sinaliza a falha e retorna ao início. Além dessa condição, devido ao uso do módulo de sugestão de controle juntamente com o sensoriamento pelo Sistema de Controle e Supervisão, existem ainda mais duas possíveis condições disponibilizadas pelo sistema: a primeira é um aviso, um sinal de alerta de que o robô está entrando em alguma situação de risco operacional. A outra condição se dá exclusivamente em relação a obstáculos. No caso da existência de algum que seja transponível pelo robô, é sinalizado um alerta de atenção e exigido uma ação de controle, manual ou automática, para realizar o desvio. A exemplo da falha crítica, as ações descritas se aplicam a todos os modos de condução do RAM, sendo que o robô continuará em operação, retornando informações do processo em tempo real para o usuário através de um painel principal (IHM).

A seguir, são descritos todos os módulos que compõem o Sistema de Controle e Supervisão, desenvolvido no presente trabalho.

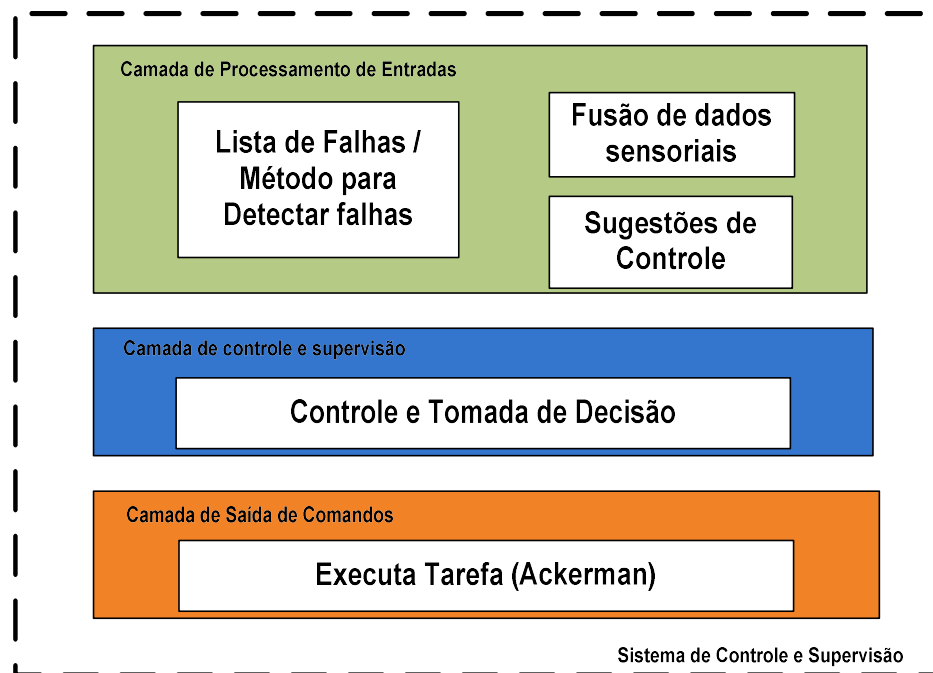
3.4 Sistema de Controle e Supervisão

Com base na revisão da literatura, foi possível analisar os métodos utilizados na navegação e condução de plataformas robóticas agrícolas, métodos de fusão de dados sensoriais, sistemas de navegação e supervisão existentes. Dessa forma, foi possível estabelecer os requisitos estruturais para desenvolver um Sistema de Controle e Supervisão aplicável à robótica agrícola móvel, e definir sua arquitetura estabelecendo quais os blocos necessários para cada uma de suas camadas internas. Uma vez definida a arquitetura, a qual deve operar ponderando as saídas de comando enviadas para o sistema de controle de baixo nível, baseando-se nas informações recebidas, conforme o cenário atual em que o robô se encontra, pode-se determinar quais variáveis de entrada tem maior peso para definir a ação que deve ser executada pelo robô.

O modelo do sistema de controle supervisão a ser implementado possui como característica, o fato de ser modular e independente de um controle de baixo nível, realizar a fusão de dados separadamente empregando mais de um tipo de algoritmo, combinar

informações de dois sistemas de visão para auxiliar nas tomadas de decisão em relação à condução do robô e possuir uma IHM. Na figura 40, a seguir, é mostrado o diagrama de blocos do sistema proposto.

Figura 40 - Camadas com os blocos do Sistema de Controle e Supervisão



Fonte: Próprio autor

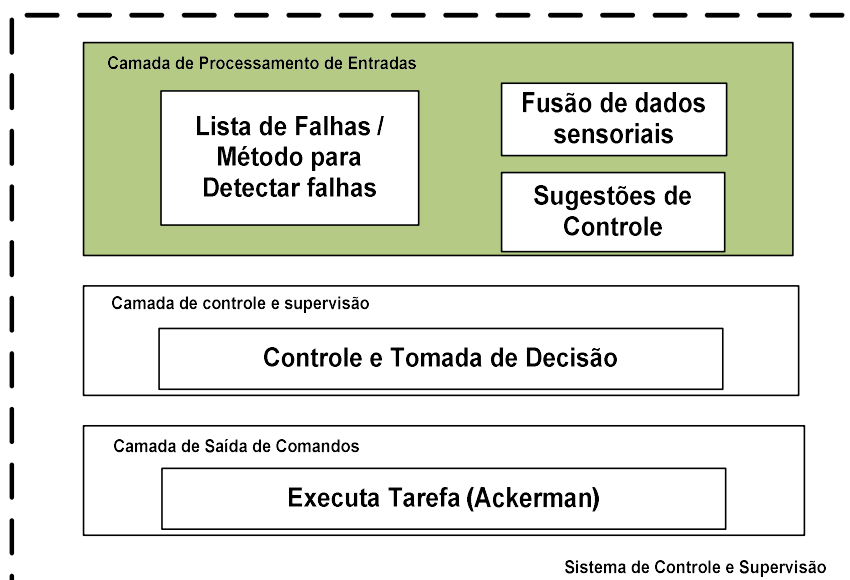
O conjunto de entradas de dados do Sistema de Controle e Supervisão é composto basicamente por três conjuntos: os sensores, os módulos auxiliares e o controle de baixo nível. O sensoriamento é utilizado para auxiliar o processo de condução e determinar os ângulos de Euler, inclinação, rolagem e guinada do robô. Para obtê-los, é realizada a fusão de dados sensoriais de uma unidade inercial de medida (IMU), utilizando o algoritmo filtro de Kalman estendido (EFK), em cascata com o algoritmo de um filtro complementar básico, além de informações de coordenadas geográficas disponibilizadas por um GPS. O controle de baixo nível disponibiliza os dados fornecidos pelas controladoras, os quais contêm informações referentes a temperatura dos motores, carga das baterias, status dos módulos de controle de baixo nível, velocidade e sentido de deslocamento, e distância total percorrida. Essas informações são utilizadas pelo Sistema de Controle e Supervisão para gerar alarmes e informar a condição operacional do robô para o usuário.

Os módulos Auxiliares são basicamente compostos por duas aplicações, que envolvem sistemas de visão computacional, e são montados sobre uma base fixada na estrutura do robô, tendo como objetivo fornecer ao Sistema de Controle e Supervisão sugestões de controle para auxiliar na condução e aprimorar o nível de segurança operacional do robô. Todas as camadas que compõem o Sistema de Controle e Supervisão e que se utilizam do conjunto de entrada de informações, são descritas as seguir.

3.5 Camada de Processamento e Entradas

A camada de processamento de entradas possui três blocos, os quais são responsáveis pelo recebimento e tratamento dos dados dos sensores e dos módulos auxiliares, além de disponibilizar as informações referentes ao *status* do robô. Ela é a primeira camada e na Figura 41 está destacada das demais.

Figura 41 - Camada de processamento de entradas em destaque



Fonte: Próprio autor

A camada possui três blocos com funções distintas, os quais serão descritos de forma detalhada no decorrer desse tópico. A princípio, é feita a descrição do bloco relacionado com a fusão de dados sensoriais e em seguida do bloco contendo os módulos auxiliares. O tópico se encerra com a descrição do bloco lista de falhas.

3.5.1 Fusão de Dados Sensoriais

O modelo desenvolvido no presente trabalho para realizar a fusão sensorial utiliza basicamente dois tipos de filtros. Em um primeiro momento, para determinar os ângulos de Euler é realizada a fusão de dados do acelerômetro com o giroscópio, usando o Filtro de *Kalman* Estendido (EKF), por obter uma melhor resposta quando comparado aos dados experimentais obtidos com o filtro KF. Outra fonte de informações vem da fusão envolvendo os ângulos de Euler fornecidos pelo EKF com os obtidos através da utilização de um aplicativo *Android* em um *Smartphone*. Neste caso, a fusão é realizada utilizando um filtro complementar, disponibilizando um valor de saída com redundância de informação, uma vez que os dados são disponibilizados por diferentes sensores.

Os valores dos ângulos de Euler obtidos com a fusão servem como parâmetros de referência para determinar a inclinação da plataforma de forma direta, seja ela lateral (*Roll*) ou vertical (*Pitch*), e são utilizados pelo módulo lista de falhas do Sistema de Controle e Supervisão. Por sua vez, o ângulo (*Yaw*), passa por uma segunda fusão com os dados de um magnetômetro, sendo aplicado um filtro complementar, e os valores obtidos, são usados para determinar o deslocamento angular da plataforma robótica durante sua condução.

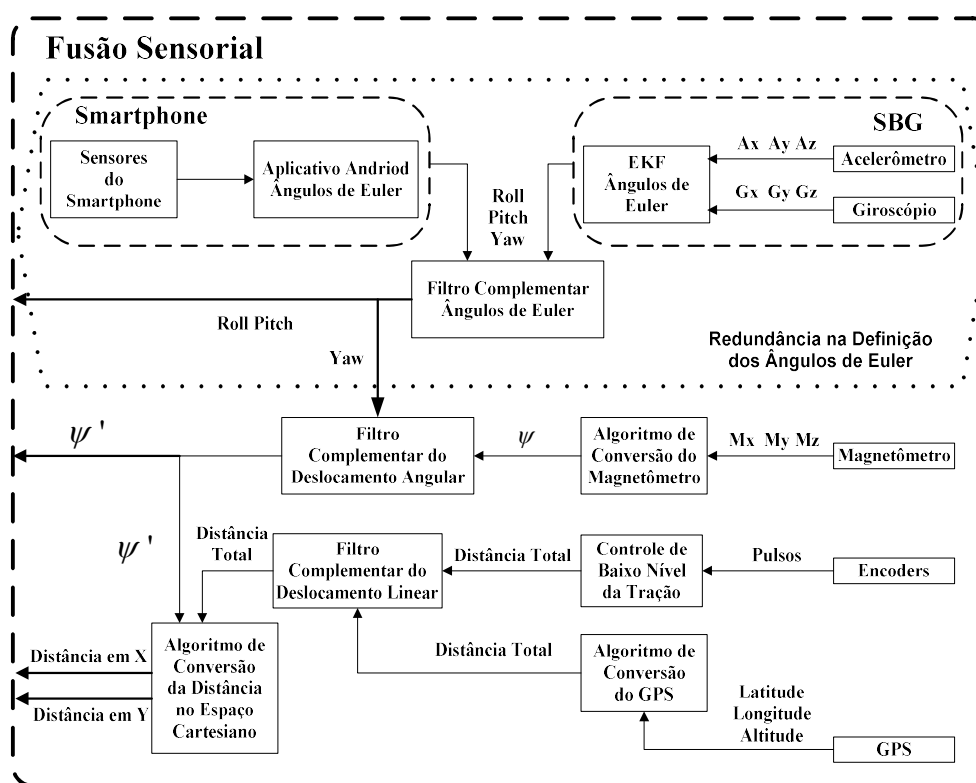
Para mensurar o deslocamento linear são utilizados sensores de referência (*encoders*), instalados nos motores de tração, e os dados disponibilizados por eles são processados nas controladoras do RAM, que reportam para o Sistema de Controle e Supervisão o valor referente à distância total percorrida e a velocidade de deslocamento de robô. O valor relativo à distância, que é fornecido, em metros, pelo controle de baixo nível, é utilizado em conjunto com as informações de um GPS, realizando uma fusão empregando um filtro complementar.

O módulo de fusão sensorial do Sistema de Controle e Supervisão, correlaciona os dados obtidos pelos sensores, realizando as adequações necessárias para aplicações que envolvem a condução da plataforma RAM. Para tal, são realizadas as fusões com os dados brutos dos sensores, utilizando EKF, e na sequência, com informações já trabalhadas se utiliza o filtro complementar. Ambas as fusões e correlações existentes entre elas fornecem basicamente quatro saídas, cuja função está diretamente relacionada à condução do veículo, fornecendo os dados necessários para serem empregadas durante a operação, na segurança e nas informações disponibilizadas para o operador via IHM.

Desta forma, o módulo de fusão sensorial exerce uma importante função dentro do Sistema de Controle e Supervisão e seu bom funcionamento é fundamental para seu funcionamento.

Um diagrama que possibilita uma visão geral do módulo de fusão sensorial utilizado pelo Sistema de Controle e Supervisão do RAM, contendo suas interações e os blocos referentes às fusões realizadas é mostrado na Figura 42. A seguir são abordadas de forma detalhada e individualmente todas as interações existentes entre os sensores e as correlações empregadas pelo módulo de fusão sensorial.

Figura 42 - Módulo de Fusão Sensorial



Fonte: Próprio autor

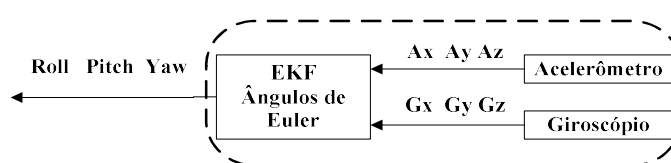
Sistema de Referência de Atitude

Nesse tópico são abordados os modelos utilizados para gerar o sistema de referência de atitude do RAM. Para tal, foram implementados dois algoritmos de fusão sensorial em três experimentos realizados em um ambiente agrícola, a partir da obtenção dos dados reais dos sensores inerciais, acelerômetro e giroscópio, os quais foram submetidos a métodos de fusão

sensorial para estimar a orientação do robô. Para a definição dos ângulos de *Euler*, foi empregado o Filtro de *Kalman* Estendido (EKF), e os valores referentes aos ângulos resultantes das fusões com os filtros são empregados basicamente de duas formas: diretamente utilizados pelo sistema supervisor no módulo lista de falhas ou combinados com os dados de outros sensores, realizando uma segunda fusão.

A princípio, o módulo de fusão sensorial determina a atitude utilizando basicamente dois tipos de sensores: o giroscópio e o acelerômetro. O acelerômetro tem como característica de medida a soma da gravidade com a aceleração do movimento da plataforma, o que o torna um sensor sensível à aceleração da gravidade e ao movimento, tendo sua precisão, como estimador de atitude, afetada em determinadas condições. Por sua vez, o giroscópio é sensível à mudança de atitude, porém tende a acumular erros no resultado da integração ao longo do tempo, divergindo os dados em relação à verdadeira atitude. Dessa forma, pode-se considerar que ambos os sensores, quando utilizados individualmente, apresentam alguma deficiência, porém, são complementares entre si, o que é essencial para realizar a fusão sensorial e aprimorar o desempenho a partir da combinação de suas características, obtendo assim, uma leitura mais confiável de atitude. Um esquemático com a fusão realizada para obtenção dos ângulos de Euler pode ser visto na Figura 43, sendo que as equações empregadas estão baseadas em diversos trabalhos relatados na literatura da área (KIM, 2011; SANTANA, 2011; PATRÃO, 2015; BROWN & HWANG, 2012; ZAREI & RAMEZANI, 2017).

Figura 43 - Ângulos de Euler



Fonte: Próprio autor

Para a fusão dos dados sensoriais com o algoritmo do EKF, são empregados os dados referentes às acelerações disponibilizadas pelo acelerômetro, representadas por A_x , A_y e A_z , com as acelerações angulares fornecidas pelo giroscópio, representadas por G_x , G_y e G_z . Contudo, para estimar a orientação de um corpo rígido no espaço tridimensional é preciso definir dois sistemas de coordenadas, e suas transformações devem ser utilizadas na conversão de um sistema de coordenadas para outro que seja conveniente. Por exemplo, devido às características dos sensores empregados para aquisição de dados na plataforma robótica RAM,

o qual tem o eixo x apontando para norte, o y para leste e o z para baixo, adota-se por convenção o sistema de navegação local *North East Down* (NED). Uma representação vetorial das acelerações referente a esse sistema pode ser caracterizada da seguinte maneira:

$$A^N = [A_n \quad A_e \quad A_d]^T \quad (5.1)$$

O sistema de navegação local NED, representado por: A^N , é composto pelas acelerações relativas a *North*(A_n), *East*(A_e) e *Down*(A_d) e por sua vez, o sistema de condução da plataforma RAM, é composto pelo sistema conhecido como RPY (*Roll, Pitch, Yaw*). A conversão de um sistema de navegação para outro, no caso, do local NED para o utilizado pelo robô RPY, requer a utilização de uma matriz de transformação de coordenadas. Neste caso, o vetor resultante da aceleração, descrito por A^R referente ao RAM é dado pela multiplicação do vetor que contém as acelerações NED representado por A^N , e a matriz de transformação de coordenadas resultante da conversão pode ser descrita por R_L^R . Assim tem-se:

$$A^R = R_L^R * A^N \quad (5.2)$$

Existem algumas formas distintas para se obter a matriz de transformação de coordenadas, sendo que sua aplicação depende exclusivamente do objetivo do projeto onde ela será utilizada. Devido a tal fator e pelas características da aplicação da matriz de transformação no presente trabalho, serão empregados dois métodos: os *Ângulos de Euler* e os Quaternions de Orientação. Para tal, foram utilizados como base os trabalhos de Santana e Patrão (SANTANA, 2011; PATRÃO, 2015).

Ângulos de Euler

O emprego das matrizes de rotação, denominadas ângulos de Euler, para representar a orientação relativa entre dois referenciais distintos é comumente utilizado em aplicações robóticas, sendo representadas pelas letras Gregas (ϕ, θ, ψ), as quais estão diretamente relacionadas com as rotações em torno dos eixos do sistema de coordenadas da plataforma, respectivamente seguindo a sequência x, y, z .

A aplicação dos ângulos de *Euler* se dá por meio de uma sequência de rotações envolvendo dois sistemas de coordenadas independentes, porém, as multiplicações entre as matrizes não são comutativas. Obrigatoriamente deve-se manter a mesma sequência de rotação que foi definida inicialmente, e os ângulos obtidos por um conjunto de três rotações, serão

utilizados na sequência da fusão sensorial como variáveis de estado, as quais, por convenção do presente trabalho, foram definidas baseadas na configuração da plataforma robótica RAM em relação a seu sistema de navegação inercial.

O modelo do sistema que será utilizado para a fusão sensorial possui as seguintes variáveis de estado (x): Roll (ϕ), Pitch(θ) e Yaw(ψ).

$$x = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

A velocidade angular disponibilizada pelo giroscópio, que tem as componentes referentes a cada um dos eixos representadas por, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$, e os ângulos de *Euler*, podem ser relacionados da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Dessa forma, é possível definir as velocidades angulares utilizando os ângulos de Euler, sendo eles representados pelas suas próprias derivadas $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$. Rearranjando a expressão acima, se obtém as seguintes equações:

$$\dot{\phi} = (\omega_y \sin\phi + \omega_z \cos\phi) \tan\theta + \omega_x \quad (5.5)$$

$$\dot{\theta} = \omega_y \cos\phi - \omega_z \sin\phi \quad (5.6)$$

$$\dot{\psi} = (\omega_y \sin\phi + \omega_z \cos\phi) \sec\theta \quad (5.7)$$

Na representação matricial das equações, pode-se observar uma matriz de rotação com os ângulos de Euler, que multiplicando um vetor de velocidades angulares resulta em um vetor de velocidades angulares, representado pelas derivadas dos ângulos de Euler, como mostrado na equação 5.8, a seguir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Função do filtro

A aplicação do filtro de Kalman é definida pela equação (5.9) e mostrada a seguir. Nela, x_{k+1} representa o vetor de velocidades angulares, e a matriz de rotação contendo os ângulos de Euler é representada pela letra A . x_k é o vetor das acelerações do giroscópio e w representa o ruído do processo.

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [\cdot] \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + w \quad (5.9)$$

Porém, segundo Kim (KIM, 2011), existe um inconveniente nesta expressão quando usada como modelo de um sistema. Ele se dá devido a sua forma, a qual impede a extração dos ângulos de Euler da matriz, fator que impossibilita o uso do filtro de Kalman com a equação nesse formato. A alternativa para esse caso é alterar a sua forma para que possa ser empregada no filtro de Kalman, e entre vários métodos que podem ser usados, se destaca a troca do conjunto de variável de estado, usando Quaternions no lugar dos ângulos de Euler.

O estudo relacionado ao desenvolvimento do quaternion será omitido no presente trabalho, mas o mesmo pode ser encontrado de forma detalhada na literatura da área (CARDEIRA, 2009; SANTANA, 2011; PATRÃO, 2015). Nessa aplicação, ela será considerada apenas como uma forma diferente de expressar atitude e pode ser definida pela equação 5.8, onde (x) continua representando a variável de estado, porém, o vetor das variáveis antes representadas pelos ângulos de Euler agora é substituído por um vetor de quaternions.

$$x = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

A relação entre a conversão da velocidade angular, representada por (ω) , em quaternions tem a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

O próximo passo é alterar apenas a variável de estado para que a equação seja capaz de satisfazer ao requisito para ser utilizada como o modelo de um sistema pelo filtro de Kalman. Vale ressaltar que, independentemente da variável de estado ser Euler ou Quaternions, as características da atitude resultantes da aplicação do filtro são as mesmas, e o que determina sua utilização é unicamente se ela possui ou não características que atendam aos requisitos do filtro de Kalman. Dando sequência no equacionamento do filtro, pode-se obter o seguinte modelo do sistema com a forma discreta da equação (5.9).

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}_{k+1} = \left(I + \Delta t * \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}_k \quad (5.12)$$

Nesta equação, o vetor de quaternions k+1 representa as variáveis de estado atualizadas, o vetor de quaternions k representa as variáveis do estado anteriores e a equação que está entre parênteses representa a matriz A do sistema. Baseando-se nesta expressão a matriz pode ser definida como segue.

$$A = I + \Delta t * \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Nessa forma os elementos da matriz A deixam de ser constantes e passam a alternar seus valores em relação às velocidades angulares. Assim, sabendo que os ângulos de Euler são calculados a partir da aceleração, deve-se realizar as medições e derivar a expressão. Porém, como nesse caso a variável de estado do modelo do sistema foi definida na forma de Quaternions, a medida obrigatoriamente deve ser alterada para essa forma. Para tal, existem uma série de doze possíveis sequências que utilizam os ângulos de Euler e podem representar uma rotação no espaço tridimensional. Uma vez definidas duas bases ortogonais, se torna possível obter os ângulos de Euler e os converter para quaternions. Para tal utiliza-se a seguinte equação abaixo:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \operatorname{sen} \frac{\phi}{2} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{\psi}{2} \\ \operatorname{sen} \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \operatorname{sen} \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{\psi}{2} - \operatorname{sen} \frac{\phi}{2} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

A medida obtida na forma de Quaternions se dá a partir da determinação da atitude por um acelerômetro utilizando a expressão acima, cuja representação para o filtro de Kalman é dada por (z_k) . Assim, toda a variável de estado é medida, e nesse caso, a matriz H do filtro torna-se uma matriz identidade 4x4, como segue.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Após a definição do modelo do sistema, sua implementação utiliza as equações já bem conhecidas do modelo do algoritmo do filtro de Kalman, o qual recebe como argumento de entrada a matriz “A” do sistema e disponibiliza como saída os ângulos de Euler. Esse processo é descrito a seguir no decorrer do capítulo.

Fusão sensorial com Filtro de Kalman e Filtro de Kalman Estendido

O algoritmo do filtro de Kalman utilizado é o que foi abordado na revisão bibliográfica, e tem como principal modificação a transformação do Quaternion em ângulos de Euler, para melhor visualização dos resultados. Anteriormente já ficaram definidas as matrizes “A” e “H”, além da expressão z_k . A seguir, são definidos os valores iniciais para a matriz de covariância do erro P_0^- e para a variável de estado \hat{x}_0^- . Por convenção, consideram-se todos os ângulos de Euler iguais a 0. Assim os valores iniciais (\hat{x}_0^-, P_0^-) utilizados na inicialização do filtro de Kalman, seguem a seguinte forma:

$$\hat{x}_0^- = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad P_0^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

A matriz de covariância “Q” do ruído de erro do sensor, e a da medição ou processo “R”, podem ser atualizadas a cada revolução do filtro de Kalman ou serem constantes, fator que não interfere diretamente no resultado. Ambas as matrizes estão relacionadas às características de sinal do sistema, sendo que a matriz Q pode ser obtida através da folha de dados do sensor, multiplicando o valor do erro de escorregamento pela taxa de amostragem. Já a matriz R, tem seu valor definido por meio da análise dos dados reais do sistema. Geralmente essas matrizes são relevantes no que diz respeito ao projeto do filtro, tendo seus valores definidos pelo método de tentativa e erro, aplicado no desempenho da variância. No presente trabalho, as matrizes de covariância do ruído Q e R, são definidas com base nos dados reais que são utilizados pelo filtro de Kalman, e possuem a seguinte forma:

$$Q = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$R = \begin{bmatrix} 5.245 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5.245 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.245 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.245 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Inicialmente, para a construção da matriz A do sistema toma-se a medida da velocidade angular a partir dos dados do giroscópio, e só então os ângulos de Euler são calculados a partir dos dados do acelerômetro. Outro fator relevante é que o ângulo de guinada (*Yaw*) na função tem valor definido igual a 0.

Para definir qual modelo de filtro será implementado no Sistema de Controle e Supervisão do RAM, do presente trabalho, são utilizados dados reais obtidos em ambiente agrícola, os quais são a base para realizar a fusão sensorial comparando o desempenho de dois algoritmos, o KF e a versão não linear do filtro de Kalman, (*Extended Kalman Filter - EKF*).

O filtro de Kalman estendido exerce o mesmo papel que o abordado anteriormente, porém, utiliza como variável de estado do modelo os ângulos de Euler e não mais os Quaternions como foi usado no filtro de Kalman. A representação da variável de estado é a mesma do modelo descrito anteriormente e pode ser vista a seguir.

$$x = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Para determinar o valor de um ângulo de inclinação de um plano horizontal, são utilizados apenas os ângulos de Euler *Roll* e *Pitch*, porém o *Yaw* também faz parte da variável de estado. O modelo do sistema para gerar a função do EKF é similar ao do FK e pode ser visto a seguir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + w \quad (5.20)$$

$$= \begin{bmatrix} \omega_x + \omega_y \sin\phi \tan\theta & + & \omega_z \cos\phi \tan\theta \\ \omega_y \cos\phi & - & \omega_z \sin\phi \\ \omega_y \sin\phi \sec\theta & + & \omega_z \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} + w \quad (5.21)$$

$$\equiv f(x) + w \quad (5.22)$$

A função $f(x)$, também inclui as velocidades angulares (ω_x , ω_y , ω_z), mas elas não foram indicadas apenas para a conveniência da descrição. A expressão não linear da equação 5.21, já possui funções trigonométricas, além de serem multiplicadas entre si. Nessas condições se torna inviável a aplicação de um filtro de Kalman linear a esse modelo de sistema que possui características não lineares.

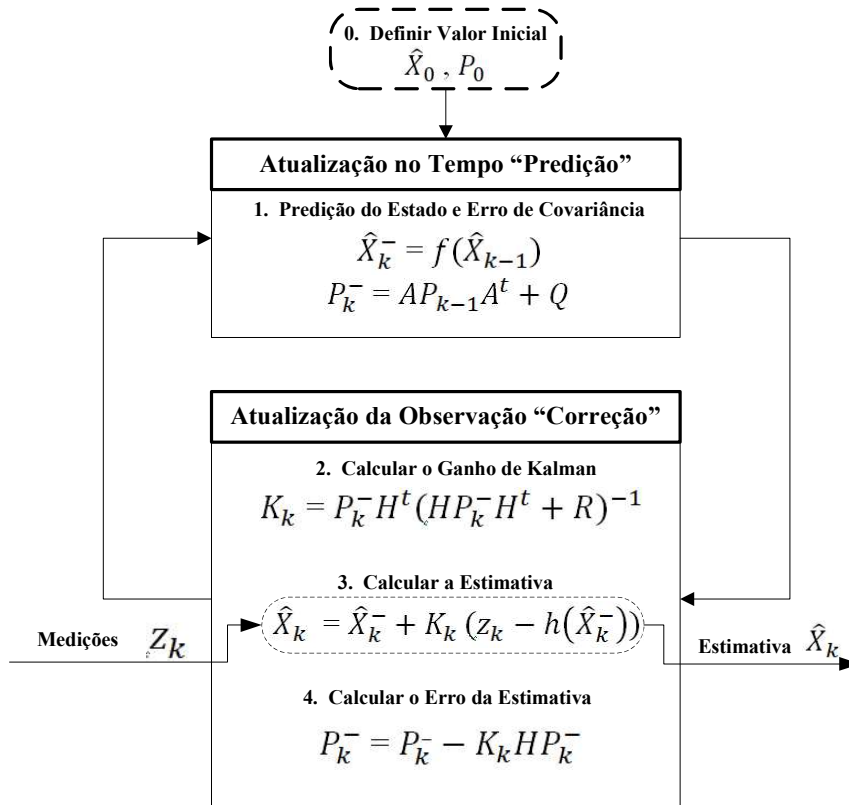
Neste caso, não é possível calcular o ângulo de guinada a partir do acelerômetro. No entanto, seus dados podem ser utilizados para calibrar o sistema, sendo que o modelo de medição para realizar a calibração é representado pela seguinte equação:

$$z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} + v \quad (5.23)$$

$$= Hx + v \quad (5.24)$$

As equações 5.20 a 5.22 estabelecem o modelo do sistema, o qual será implementado, e posteriormente utilizado para contrastar com os resultados obtidos com o filtro de Kalman apresentado anteriormente. O algoritmo do EKF pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 - Algoritmo do Filtro de Kalman Estendido



Fonte: Adaptado de Kim, (2011)

O filtro de Kalman estendido sofre basicamente duas alterações em relação ao modelo do filtro de Kalman. A predição do estado nesse caso passa ser realizada através de uma função, cujo equacionamento é dado pelas equações 5.20, 5.21 e 5.22. Também, para que seja viável implementá-lo em um sistema, é necessário que se conheça o jacobiano do modelo de tal sistema. Assim, o jacobiano correspondente pode ser obtido utilizando a seguinte expressão.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \phi} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta} & \frac{\partial f_1}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \phi} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta} & \frac{\partial f_2}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \phi} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta} & \frac{\partial f_3}{\partial \psi} \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

São realizadas as derivadas parciais da função f do filtro em relação aos ângulos de Euler. Além da definição dos ângulos de Euler por meio da utilização do EKF, existe ainda a

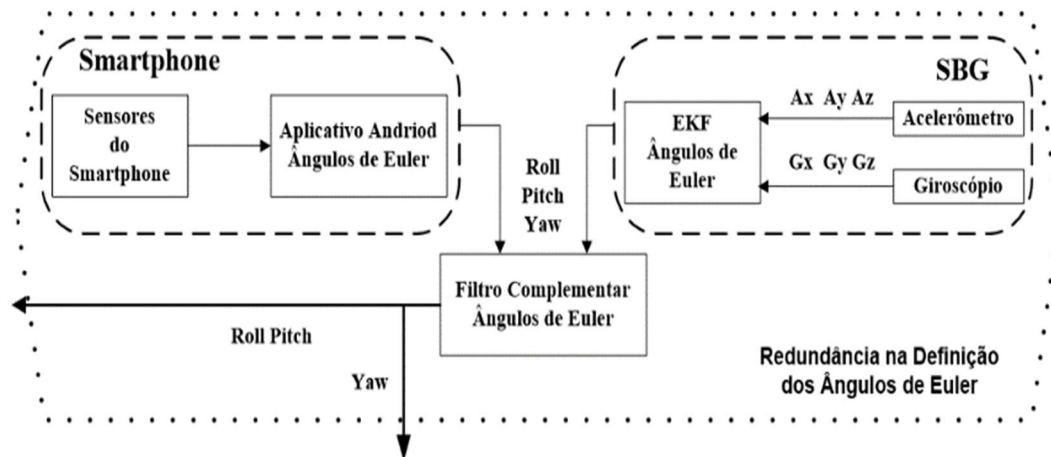
possibilidade de trabalhar com mais uma fonte de informações estabelecendo uma redundância, que é exemplificada no próximo tópico.

Redundância na Definição do Ângulos de Euler

A segunda fonte de informação em relação aos ângulos Euler, a qual pode ser utilizada como redundância de dados, é um de um aplicativo desenvolvido por Silva (SILVA, 2018), para o sistema operacional *Android*, que tem a capacidade de extrair informações do ambiente para auxiliar na condução de uma plataforma robótica móvel. Porém, para a aplicação desenvolvida no Sistema de Controle e Supervisão do RAM, o aplicativo é utilizado somente como um módulo de dados auxiliar na definição dos ângulos de Euler, uma vez, que o mesmo possui sensores e processamento de dados de uma fonte independente da plataforma, não consumindo recurso computacional e energia das baterias do robô, ou seja, o aplicativo opera em uma placa própria, com sistema operacional *Android*. Outro fator característico do aplicativo é o fato de ser um dispositivo portátil que possui boa resolução, além de uma gama variada de protocolos de comunicação com outros equipamentos.

O principal objetivo da junção de duas fontes de dados pelo Sistema de Controle e Supervisão, a princípio, é obter um valor mais confiável com menos interferência de ruídos para ser utilizado como entrada no bloco do filtro complementar de deslocamento angular, assim como na lista de falhas. Em um segundo momento, o aplicativo pode ser usado na segurança operacional da plataforma como um sistema de redundância de dados em relação à obtenção dos ângulos de Euler, caso venha ocorrer falha no sensor principal. Para melhor entendimento, o esquemático contendo apenas a parte responsável para gerar os ângulos de Euler é destacada da configuração do bloco “Fusão Sensorial” do Sistema de Controle e Supervisão e pode ser visto na Figura 45.

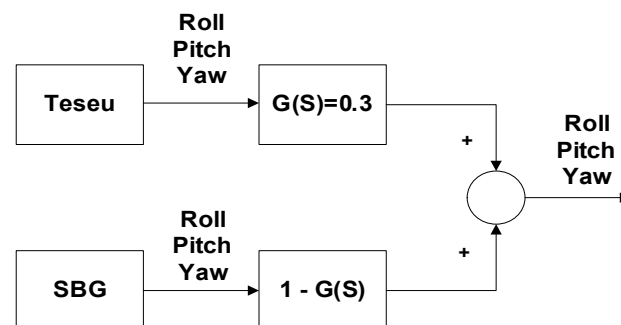
Figura 45 -Redundância na definição dos ângulos de Euler



Fonte: Próprio autor

Uma segunda vantagem em se empregar duas fontes de dados sensoriais, está relacionada com uma melhora significativa no sinal de saída, que pode ser utilizado diretamente pelo Sistema de Controle e Supervisão, no modulo de falhas ou como uma das entradas do filtro complementar de deslocamento angular. Uma abordagem a respeito do filtro complementar foi apresentada no capítulo de revisão e algumas implementações são realizadas no decorrer do trabalho. A princípio o filtro utilizado na fusão dos ângulos de Euler segue o esquema que pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 - Filtro complementar ângulos de Euler



Fonte: Próprio autor

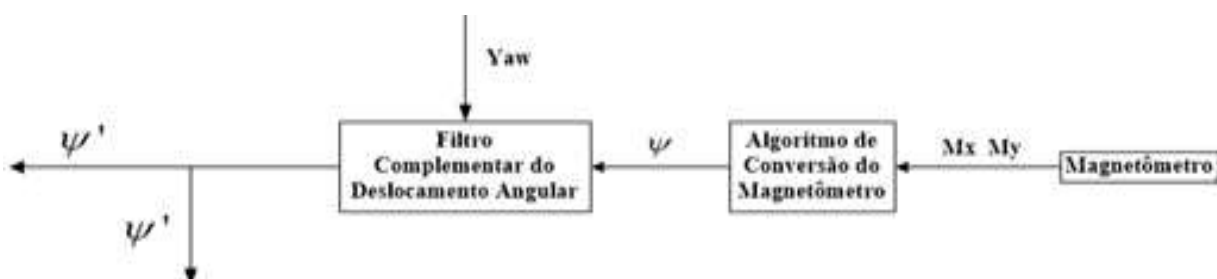
Filtro Complementar do Deslocamento Angular

O deslocamento angular utilizado na condução da plataforma RAM é o resultado da fusão entre o valor do ângulo *yaw*, disponibilizado pela aplicação apresentada no tópico anterior, onde foram definidos os ângulos de Euler, e o valor do deslocamento angular do RAM

em relação ao referencial magnético da terra, o qual é representado pela letra Grega Ψ e obtido através de um magnetômetro.

Com o intuito de obter dados mais confiáveis em relação ao valor do ângulo de guinada da plataforma RAM, realiza-se uma fusão de dados empregando um filtro complementar, o qual gera como resultado um ângulo de guinada, representado por Ψ' . Os valores resultantes referentes ao deslocamento angular do RAM, são utilizados pelo Sistema de Controle e Supervisão no processo de condução da plataforma, na interface com o usuário e no algoritmo de conversão da distância no espaço cartesiano. Sua representação em forma de diagrama do modelo utilizado, apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Diagrama do Filtro Complementar do Deslocamento Angular



Fonte: Próprio autor

O filtro complementar adotado para realizar a fusão é denominado Filtro Complementar do Deslocamento Angular (FDCA). Nesta configuração, uma das entradas utilizadas é referente aos ângulos de Euler, ou seja, os dados do ângulo *Yaw*, e a segunda entrada do filtro, que está representada por Ψ' , é referente à estimativa do ângulo de guinada do robô, obtida por meio da leitura de um magnetômetro em um referencial auxiliar.

Os referenciais, tanto da terra quanto da plataforma, apenas se diferem em relação à rotação em torno do eixo z. Desta forma, para se obter a componente horizontal através da leitura do magnetômetro, pode-se projetar um campo magnético, seguindo as indicações dos ângulos *Roll* e *Pitch*, já definidos, gerando um vetor com as leituras, que pode ser representado por $[m_x, m_y, m_z]'$ e ajustado o mesmo com o referencial da terra considerando a declinação magnética local - dec, (CARDEIRA, 2009).

Segundo Reis (REIS, et al., 2014), para obter o ângulo de guinada (Ψ) por meio de um magnetômetro, sensor que funciona como uma bússola e tem seus dados gerados através de medições do campo magnético, o mesmo deve estar fixado em uma superfície plana. Dessa forma, é possível medir o ângulo de guinada da plataforma pelo arco tangente da relação entre

os dois eixos horizontais. Contudo, quando isso não ocorre na aplicação, é necessário compensar a inclinação do sensor, por meio dos ângulos de inclinação, obtidos por sensores auxiliares como, por exemplo, acelerômetros.

As equações para realizar a compensação da inclinação da plataforma RAM, estão baseadas no trabalho de Reis (REIS, et al., 2014), e são descritas no decorrer do capítulo. Para definição do ângulo empregado no cálculo referente à direção do robô, são utilizados os componentes magnéticos da estrutura do seu corpo (m_x, m_y, m_z), os quais são o resultado da junção realizada entre os ângulos magnéticos e os ângulos de inclinação lateral e frontal ($Roll(\phi)$ e $Pitch(\theta)$). M_x e M_y são definidos como os componentes horizontais do campo magnético e podem ser obtidos por meio das seguintes relações:

$$M_y = m_y \cos(\theta) - m_z \sin(\theta) \quad (5.24)$$

$$M_x = m_x \cos(\phi) + m_y \sin(\phi) * \sin(\theta) + m_z \sin(\phi) * \cos(\theta) \quad (5.25)$$

As relações acima definem as componentes horizontais do campo magnético M_x e M_y , as quais posteriormente são utilizadas para definir o ângulo de guinada, baseado nas informações geradas com os dados fornecidos pelo magnetômetro. Basicamente equações descritas acima utilizam os valores de: ($\sin(\phi)$ e $\cos(\theta)$), dos ângulos de Euler, gerados a partir da fusão com o filtro de Kalman estendido e dos dados brutos fornecidos pelo magnetômetro, representados por (m_x, m_y, m_z). Com o resultado é possível definir o ângulo de guinada ψ (Ψ) com a seguinte expressão:

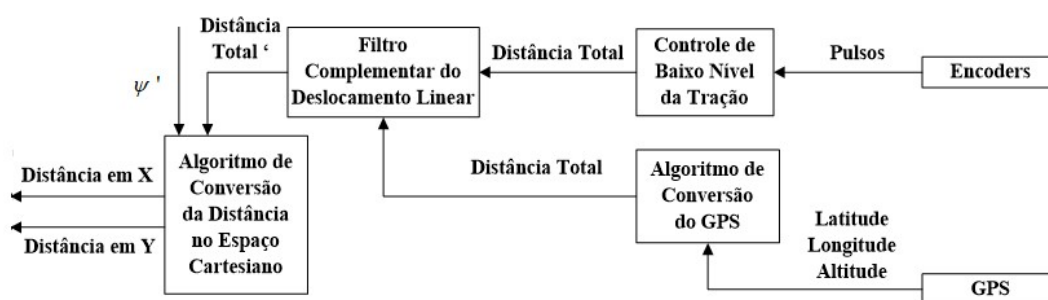
$$\psi = \text{atan2}(M_y, M_x) \quad (5.26)$$

Porém, para que esse tipo de equacionamento possa ser utilizado, é necessário obter os dados do acelerômetro e do magnetômetro, de acordo com o sistema de coordenadas específico para o robô, e os sensores devem estar devidamente alinhados (SAEALAL, et al., 2017).

Filtro Complementar do Deslocamento Linear e Conversão da Distância no Espaço Cartesiano

Nesse tópico, em um primeiro momento, é abordada a fusão sensorial, que tem como resultado o valor referente à distância total percorrida pela plataforma RAM, independente se seu deslocamento for em linha reta ou realizando manobras e curvas. Baseado no valor da distância total, a qual é disponibilizada após a fusão dos dados do controle de baixo nível em conjunto com o GPS, por um filtro complementar, sendo que, a mesma tem seu valor de saída associado ao ângulo de guinada do robô, definindo-se os valores referentes ao deslocamento em X e Y no espaço cartesiano. O diagrama de blocos que representa a descrição de todo o processo citado pode ser visto na Figura 48.

Figura 48 - Diagrama de blocos da definição da distância percorrida



Fonte: Próprio autor

Como mostrado na figura anterior, o filtro complementar do deslocamento linear recebe informações de duas fontes: do controle de baixo nível e do GPS. O controle de baixo nível foi projetado com a função de controlar a velocidade de tração, e sua modelagem é detalhada juntamente com o modelo do esterçamento do RAM, no trabalho de Sammarco (SAMMARCO, et al., 2018). Neste trabalho os autores utilizaram uma função denominada *Tracao2*, a qual relaciona a tensão aplicada ao motor com a velocidade da roda no movimento de tração, encontrando os valores de referência para o controlador.

O modelo de controle de baixo nível implementado para o sistema de tração do RAM faz parte da primeira camada de *software*, a qual é responsável por manter a velocidade das rodas do robô. Tal camada fornece informações que são utilizadas pelo Sistema de Controle e Supervisão para a condução do RAM, e a interação entre as camadas se dá através de comunicação via USB. O controle de baixo nível fornece dados sobre a distância total percorrida, velocidade da plataforma, entre outras. Em contrapartida, o Sistema de Controle e Supervisão

envia os comandos relacionados com a condução do robô: sentido de deslocamento, velocidade e tempo para chegar a velocidade estabelecida, e parar ou iniciar o deslocamento.

Dessa forma, uma das entradas do filtro complementar do deslocamento linear é estabelecida. A outra entrada recebe informações baseadas na leitura do GPS, o qual fornece latitude, longitude e altitude. Contudo, a fusão realizada depende somente do deslocamento em duas dimensões, e dessa forma, são utilizados apenas os dados referentes à latitude e à longitude obtidos durante o trajeto. Porém, para que os dados possam ser utilizados na fusão, é necessário converter as coordenadas disponibilizadas para o mesmo formato fornecido pelo controle de baixo nível, medida em metros. Com o intuito de adequar as informações do GPS para possibilitar a fusão dos dados, foi realizada uma conversão seguindo o modelo matemático descrito abaixo, sendo que o mesmo é utilizado como base para o algoritmo de conversão dos valores da latitude e da longitude para metros, o qual segue os seguintes passos e tem seu pseudocódigo apresentado na sequência:

Primeiro Passo – conversão, da informação referente à coordenada geográfica recebida, para graus, minutos e segundos;

Segundo Passo - determinar a distância percorrida a cada leitura e convertê-la para metros. Para tal, se utiliza um fator de conversão igual a 1852, que permite transformar o valor encontrado de milhas náuticas (NM) para metros (m), definindo assim os valores referentes ao deslocamento de “x” e “y” em metros.

Após encontrar o deslocamento pontual, tomando como referência os dados do GPS, em relação a “x” e “y”, representados por (Longx e Laty) na equação 5.31, para encontrar a distância total percorrida pelo robô, deve-se encontrar a distância pontual (*dist*), utilizando a equação abaixo, e somar todos os valores encontrados durante o trajeto.

$$dist = \sqrt{(Longx(n))^2 + (Laty(n))^2} \quad (5.31)$$

Pseudocódigo conversão de dados do GPS

Procedimento conversão de dados do GPS (Laty(n), Longx(n))

Variáveis

Flutuante: Lat, Graus, Minutos, Segundos, Laty;

Flutuante: Long, graus, minutos, segundos, Longx;

Início

Leia (Gpsla, Gpslo); valores da latitude e da longitude do GPS

```

Latitude ← Gpsla;
Longitude ← Gpslo;

Para n=1 até máximo valor de n Faça

    Lat ← Latitude/107;
    Graus ← Lat;
    Minutos ← (Lat - Graus)*60;
    Segundos ← (Lat+(Graus + Minutos/60)*3600);
    Long ← Longitude/107;
    graus ← Long;
    minutos ← (Long - graus)*60;
    segundos ← (Long + (graus + minutos/60)*3600);
    Segundo(n) ← Segundo(n+1) - Segundo(n);
    Laty(n) ← (Segundo(n)/60)*1852;
    Segundo(n) ← segundo(n+1) - segundo(n);
    Longx(n) ← (segundo(n)/60)*1852;

Fim-Para
Retorna (Laty(n), Longx(n));
Fim

```

Uma vez definidas as duas entradas do filtro complementar, realiza-se a fusão das distâncias, gerando como saída a distância total, a qual contém informações sobre deslocamento total do RAM.

Com a descrição de como foram geradas as saídas e as fusões sensoriais utilizadas pelo Sistema de Controle e Supervisão do RAM, conclui-se o módulo denominado fusão sensorial. Dando sequência ao trabalho, o próximo tópico aborda o bloco sugestão de controle, o qual está diretamente relacionado com a questão da segurança operacional da plataforma.

3.5.2 Sugestões de Controle

Esse bloco trabalha exclusivamente com os dados dos módulos auxiliares, basicamente compostos pelos sistemas de Visão Estéreo e Visão Omnidirecional, os quais após terem as imagens coletadas, pós-processadas, utilizam os resultados das aplicações convertendo os dados para um formato binário pré-definido. Esse bloco pode ser considerado o mais importante

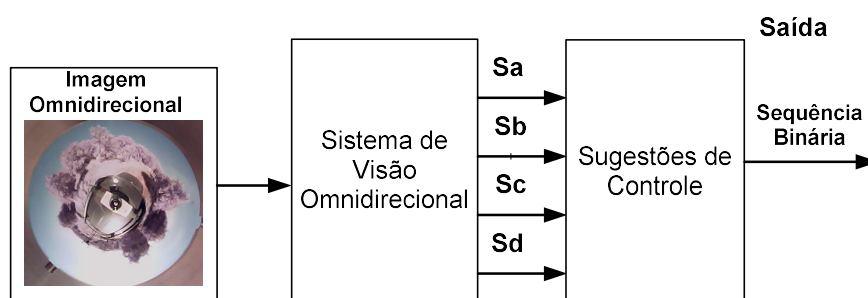
para o funcionamento do Sistema de Controle e Supervisão em relação à identificação de obstáculos e à definição de áreas navegáveis, devido às características das aplicações que ele contém. As duas aplicações principais desse bloco, envolvendo visão computacional e as saídas geradas por elas serão descritas a seguir:

Sistema de Visão Omnidirecional – obtém seus dados a partir de uma imagem omnidirecional capturada por uma câmera. Esta imagem omnidirecional é retificada e separada em quadrantes. Cada quadrante gera um dado binário, totalizando desta forma quatro saídas de dados. Cada saída indica a presença ou não de área navegável em uma região, tendo como referencial o centro geométrico do robô.

A sequência binária gerada é utilizada como entrada de informações consideradas como sugestão de controle, e posteriormente auxilia o Sistema de Controle e Supervisão na definição das ações a serem tomadas. O sistema Omnidirecional está relacionado com a análise de caminho, fornecendo informações que auxiliam na condução da plataforma RAM (RODRIGUES, 2014). Com a aplicação de um algoritmo que realiza a segmentação da imagem em regiões heterogêneas, é possível identificar os caminhos na parte central da linha de navegação. No caso específico do presente trabalho, que tem o foco dessa aplicação voltado para identificação de caminho durante a navegação do robô, é preciso verificar as etapas de pós-processamento e se as áreas resultantes comportam as dimensões do robô, no caso o RAM.

O sistema de visão omnidirecional, após realizar o processamento de uma imagem, retificando-a, e dividindo-a em quadrantes, disponibiliza quatro saídas contendo um bit cada. No Sistema de Controle e Supervisão, as informações são comparadas com uma tabela predefinida, a qual indica se há ou não a existência de área navegável em uma região de interesse para o robô. O diagrama do sistema pode ser visto na Figura 49.

Figura 49 - Sistema de visão omnidirecional



Fonte: Próprio autor

Cada uma das saídas representa um lado do robô: Sa (frente), Sb (lateral direita), Sc (traseira) e Sd (lateral esquerda). Todas as saídas são binárias (0 ou 1), representando a presença ou ausência de áreas navegáveis nas quatro direções. Esse tipo de aplicação é utilizado para auxiliar o Sistema de Controle e Supervisão na definição de caminho durante a condução da plataforma. Para que seja viável sua utilização, o bloco de sugestões de controle gera uma tabela com uma sequência binária a partir das entradas e a disponibiliza para camada de controle e supervisão. A sequência de combinações referentes ao sistema e a descrição referente a cada combinação são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Sequência de combinações de saídas do sistema de visão omnidirecional

Sa	Sb	Sc	Sd	Possíveis Áreas Navegáveis em Relação ao Robô
0	0	0	0	Não Existe Área Navegável
0	0	0	1	Lateral Esquerda
0	0	1	0	Traseira
0	0	1	1	Lateral Esquerda e Traseira
0	1	0	0	Lateral Direita
0	1	0	1	Lateral Direita e Lateral Esquerda
0	1	1	0	Lateral Direita e Traseira
0	1	1	1	Lateral Direita, Traseira e Lateral Esquerda
1	0	0	0	Frontal
1	0	0	1	Frontal e Lateral Esquerda
1	0	1	0	Frontal e Traseira
1	0	1	1	Frontal, Traseira e Lateral Esquerda
1	1	0	0	Frontal e Lateral Direita
1	1	0	1	Frontal, Lateral Direita e Lateral Esquerda
1	1	1	0	Frontal, Lateral Direita e Traseira
1	1	1	1	Todas as Áreas em Condição de Navegação

Fonte: Próprio autor

Sistema de Visão Estéreo - possui duas câmeras alinhadas e a partir das imagens obtidas por ambas, provê informações referentes à presença ou não de obstáculos na trajetória do robô. O Sistema de Controle e Supervisão utiliza as informações fornecidas por esse sistema de forma similar à da aplicação que utiliza a visão omnidirecional, mantendo o formato seguindo uma sequência de números binários, os quais representam possíveis situações envolvendo a

existência de obstáculos. O algoritmo utilizado nesse sistema fornece as seguintes informações para o Sistema de Controle e Supervisão:

- Presença ou não de objetos;
- Distância do obstáculo (próximo ou distante do robô);
- Posição do obstáculo em relação ao centro do robô.

O sistema de Visão Estéreo, baseado no trabalho de Trentini (TRENTINI, 2014) fornece, como saída, a posição do obstáculo e a distância relativa em relação ao robô. Estes dados são fornecidos ao Sistema de Controle e Supervisão na forma de um vetor, com quatro elementos (bits), tendo a seguinte forma de representação:

Pole (obstáculo na lateral esquerda);

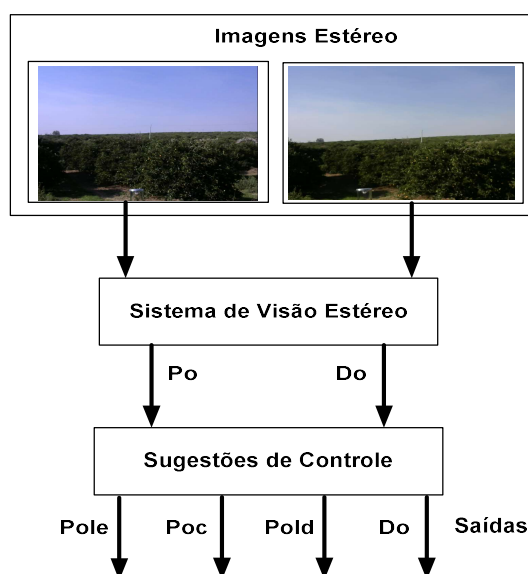
Poc (obstáculo no centro);

Pold (obstáculo na lateral direita);

Do (distância relativa: longe ou perto).

Um diagrama contendo o sistema de visão estéreo pode ser visto na Figura 50.

Figura 50 - Sistema de visão estéreo



Fonte: Próprio autor

A partir das imagens o sistema fornece duas saídas, que são respectivamente Po (posição do obstáculo) e Do (distância do obstáculo). Essa aplicação é empregada na identificação da presença ou não de obstáculos na trajetória do robô, e também fornece informações sobre o obstáculo, tais como sua posição e sua distância em relação ao robô. Para que seja viável sua

utilização, o bloco sugestões de controle divide a entrada "Po" em três novas saídas, as quais indicam a posição do obstáculo em relação ao centro do robô. As saídas são: Pole (obstáculo na lateral esquerda), Poc (obstáculo no centro) e Pold (obstáculo na lateral direita). Assim como no exemplo anterior, utiliza-se as saídas para gerar uma tabela de sequência binária e a disponibiliza para a camada de controle e supervisão. A sequência de combinações e a descrição relativa a cada combinação, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Sequência de combinações de saídas do sistema de Visão Estéreo

Pole	Poc	Pold	Do	Existência e Posição de Obstáculos
0	0	0	0	Não Existe Objeto
0	0	1	0	Objeto Distante e a Direita do robô
0	1	0	0	Objeto Distante e no Centro do robô
0	1	1	0	Objeto Distante no Centro e a Direita do robô
1	0	0	0	Objeto Distante e a Esquerda do robô
1	0	1	0	Objeto Distante a Esquerda e Direita do robô
1	1	0	0	Objeto Distante no Centro e a Esquerda do robô
1	1	1	0	Objeto Distante no Centro, a Esquerda e a Direita do robô
0	0	1	1	Objeto Próximo e a Direita do robô
0	1	0	1	Objeto Próximo e no Centro do robô
0	1	1	1	Objeto Próximo no Centro e a Direita do robô
1	0	0	1	Objeto Próximo e a Esquerda do robô
1	0	1	1	Objeto Próximo a Esquerda e Direita do robô
1	1	0	1	Objeto Próximo no Centro e a Esquerda do robô
1	1	1	1	Objeto Próximo no Centro, a Esquerda e Direita do robô

Fonte: Próprio autor

As duas tabelas contendo as possíveis combinações geradas a partir dos sistemas de Visão Estéreo e Omnidirecional, posteriormente serão agrupadas, dando origem a uma nova tabela na camada de tomada de decisão, ponderando as ações que serão tomadas juntamente com as informações disponibilizadas pelos demais módulos. Dessa forma, conclui-se o bloco denominado sugestões de controle, e na sequência do trabalho, é abordado o bloco lista de falhas, o qual está diretamente relacionado com a operação da plataforma durante a sua condução.

3.5.3 Lista de Falhas e Método para Detectar Falhas

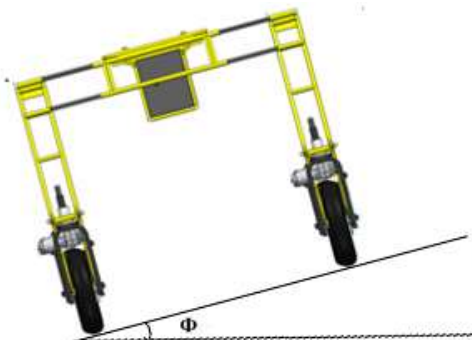
Esse bloco tem como finalidade gerar uma lista contendo todas as possíveis falhas que foram previamente definidas e classificá-las pelo grau de dano que elas possam gerar ao equipamento. As falhas podem ser referentes ao equipamento ou operacionais. Para definição do tipo de falha que está ocorrendo é utilizado um algoritmo comparador, o qual utiliza como referência uma lista de possíveis ocorrências consideradas falhas, baseada nos dados sensoriais e informações do controle de baixo nível. Uma vez identificada, a falha é ponderada e classificada de acordo com o tipo e, então, o resultado é replicado para a camada de controle e supervisão.

Um exemplo que ilustra a função desse bloco é a utilização dos dados dos sensores da IMU, usando como referencial o valor de ângulo máximo de inclinação lateral pré-estabelecido no bloco comparador. O algoritmo realiza, a cada intervalo de tempo de 2,5 ms, uma comparação entre o valor informado pelo sensor e o estabelecido como limite. Se o valor da leitura for superior ao estabelecido, gera-se um aviso de falha e o transmite para a camada de controle, a qual determina a ação a ser tomada perante aquele cenário.

O módulo do Sistema de Controle e Supervisão do RAM denominado lista de falhas é responsável dentro da arquitetura do sistema, por realizar a verificação e inicializar o programa, estabelecer a comunicação com o controle de baixo nível, verificando as conexões, o *status* dos controladores e sensores. Para verificar as informações em relação ao funcionamento do RAM e enviar comandos, utiliza-se uma interface homem máquina (IHM), desenvolvida em C++. O modelo da lista de falhas presente na IHM tem, entre outras funções, o monitoramento e a tomada de decisão em relação ao nível de inclinação a qual o RAM é submetido durante o processo de condução.

A seguir, na Figura 51, é mostrado um exemplo de inclinação sofrida pelo RAM, e na sequência, na Figura 52, é apresentado um diagrama de blocos, o qual é empregado para representar a função comparadora, que determina como reagir frente ao valor do ângulo em que a plataforma se encontra, enviando um comando para parar o processo ou simplesmente um alerta que existe o perigo de tombamento do RAM.

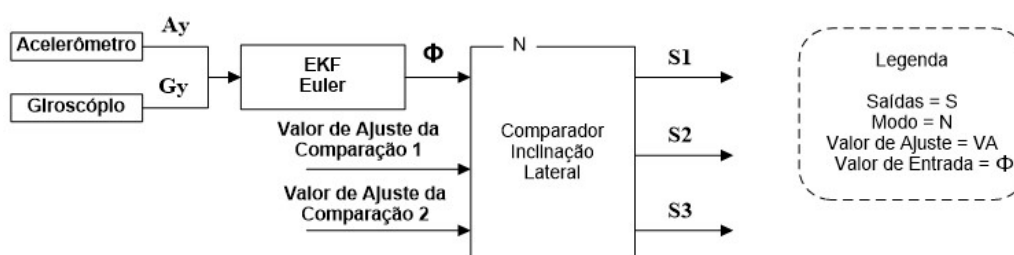
Figura 51 - Inclinação lateral do RAM



Fonte: Adaptado de Tabile (2011)

Basicamente, o bloco exerce a função de comparador em relação à inclinação do RAM e utiliza como referência o ângulo *Roll* (Φ), obtido a partir da fusão sensorial que define os ângulos de Euler. Dessa forma, é possível estabelecer um valor máximo permitido para a inclinação lateral, e a cada ciclo do programa, realizar uma comparação entre os valores de referência e o atual.

Figura 52 - Diagrama do bloco comparador para inclinação lateral do RAM



Fonte: Próprio autor

O bloco principal é o comparador, o qual possui três entradas e três saídas. A entrada referente ao ângulo é variável e as outras duas, denominadas valor de ajuste da comparação, possuem valores fixos predeterminados de acordo com as características da plataforma robótica a ser utilizada. No caso do RAM, para realizar os experimentos foram determinados dois valores aleatórios: VA1 é igual a 25 graus e VA2 igual a 30 graus. Tais valores possibilitando gerar três condições distintas pela função do comparador, que realiza a comparação entre os valores dos ângulos e disponibiliza as seguintes saídas:

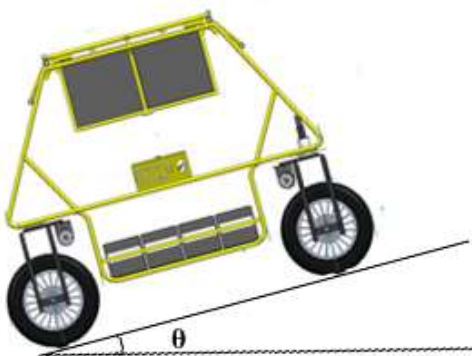
- Se o valor comparado for inferior a VA1, aciona a saída S1;
- Se o valor comparado estiver entre VA1 e VA2, aciona a saída S2;
- Se o valor comparado for superior a VA2, aciona a saída S3.

Todas as saídas possuem um indicador colorido e escrito na lista de falhas, elas estão dispostas da seguinte maneira:

- ✓ S1 – aviso em verde e indicação escrita, indicando que a inclinação está dentro do padrão normal;
- ✓ S2 – aviso em amarelo e indicação escrita, indicando que a inclinação está dentro do padrão considerado perigoso e exige cuidado na operação;
- ✓ S3 – aviso em vermelho e indicação escrita, indicando que a inclinação está fora do padrão normal e colocando o robô em perigo para continuar a operação. Nesse caso, o Sistema de Controle e Supervisão atua parando imediatamente o robô.

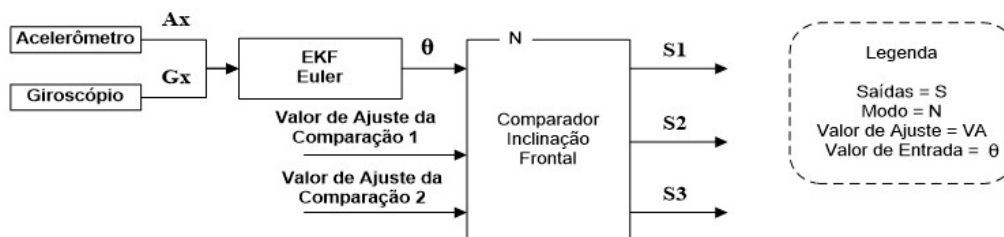
Seguindo a mesma lógica, o procedimento aplicado para a inclinação frontal do RAM é o mesmo descrito acima, porém, o ângulo utilizado como entrada no comparador passa a ser o *Pitch* (θ), também obtido a partir da fusão sensorial que define os ângulos de Euler. A seguir na Figura 53, pode ser vista uma ilustração do tipo de inclinação frontal controlado pela lista de falhas e, na Figura 54, o diagrama referente ao bloco comparador.

Figura 53 - Inclinação frontal do RAM



Fonte: Adaptado de Tabile (2011)

Figura 54 - Diagrama do bloco comparador para inclinação frontal do RAM



Fonte: Próprio autor

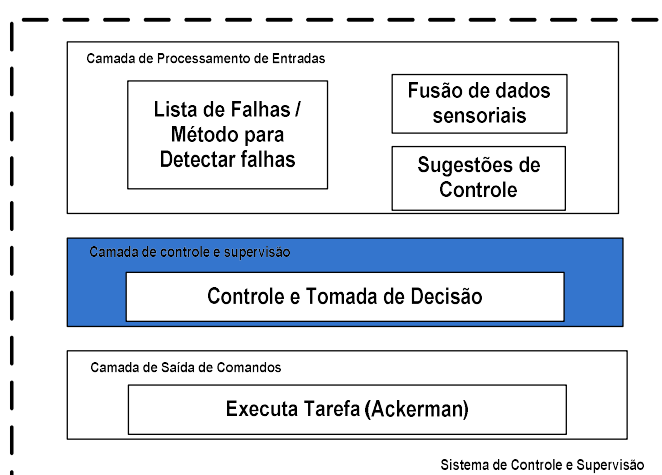
O conceito desse módulo, denominado, lista de falhas do Sistema de Controle e Supervisão, tem a característica de ser modular e expansivo de acordo com as necessidades impostas pela plataforma onde ele for implementado. Fator bastante relevante para o presente trabalho, uma vez que com alguns ajustes no programa consegue-se expandir a lista de falhas, possibilitando, dessa forma, a independência do sistema em relação a uma plataforma robótica específica, como ocorre na grande maioria das aplicações nesse segmento.

3.6 Camada de Controle e Supervisão

A camada de controle e supervisão recebe as informações da primeira camada e as emprega na atualização da interface com o usuário, no controle de trajetória e na tomada de decisão, levando em consideração o risco de tombamento e a existência ou não de obstáculos durante a trajetória da plataforma robótica. Também, envia o comando com a ação que deve ser tomada para a próxima camada. Na Figura 55, pode ser vista a camada em destaque.

A camada em destaque possui apenas um bloco, porém pode ser considerada a parte inteligente do Sistema de Controle e Supervisão, tendo a função de receber os dados fornecidos pela camada de processamento de entradas, e utilizar tais informações para desenvolver uma ação de controle operacional para a condução do robô como, por exemplo, correção no desvio de trajetória, sentido de locomoção, velocidade, quanto deve esterçar em uma curva, entre outras.

Figura 55 - Camada de controle e supervisão em destaque

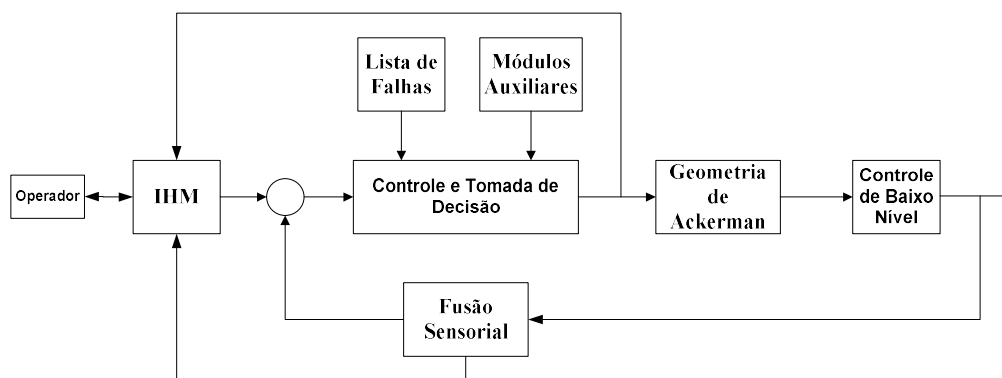


Fonte: Próprio autor

3.6.1 Controle e Tomada de Decisão

O algoritmo utilizado pelo bloco tem a função de realizar uma avaliação baseada nos dados recebidos dos três blocos da primeira camada e decidir se o comando enviado pelo usuário, que pode ser enviado através da IHM ou algum aplicativo de navegação, pode ou não ser executado pelo robô sem que isso venha a causar algum dano ao equipamento ou coloque em risco a integridade do operador. Um diagrama de blocos simplificado que representa o funcionamento descrito no Sistema de Controle e Supervisão, pode ser visto na Figura 56.

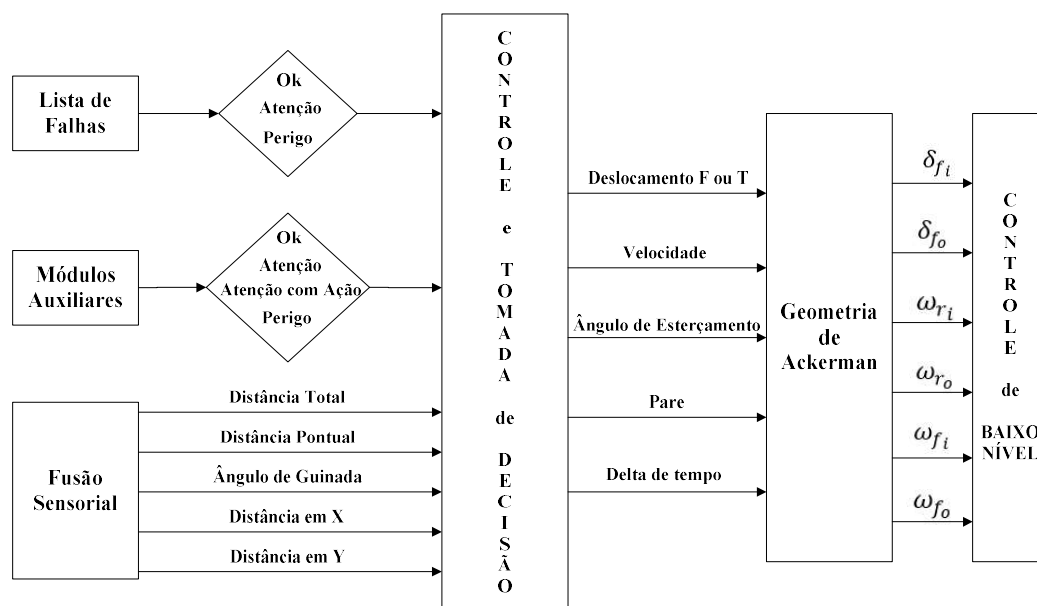
Figura 56 – Diagrama de blocos simplificado referente ao funcionamento bloco controle e tomada de decisão no Sistema de Controle e Supervisão do RAM



Fonte: Próprio autor

O módulo denominado de controle e tomada de decisão tem, como função primordial, controlar a condução e tomar algumas ações relacionadas à segurança operacional. Para tal, utiliza como entrada as informações fornecidas pelos módulos auxiliares e lista de falhas, em conjunto com os dados obtidos pela fusão sensorial, e disponibiliza as informações de comando para a última camada do sistema de controle supervisão, na qual está implementada a geometria de Ackerman. Essa, por sua vez, define e envia os valores referentes aos ângulos de esterçamento das rodas dianteiras, representados por δ_{fi} e δ_{fo} , e também as informações das velocidades angulares e sentido de giro para cada uma das rodas do RAM, aqui representados por ω_{ri} , ω_{ro} , ω_{fi} e ω_{fo} . Na Figura 57, pode ser observado um diagrama de blocos que descreve como é realizada a troca de informações, e a interação existente entre as camadas e seus respectivos blocos, os quais compõem o Sistema de Controle e Supervisão do RAM.

Figura 57 – Diagrama de blocos da interação do Sistema de Controle e Supervisão



Fonte: Próprio autor

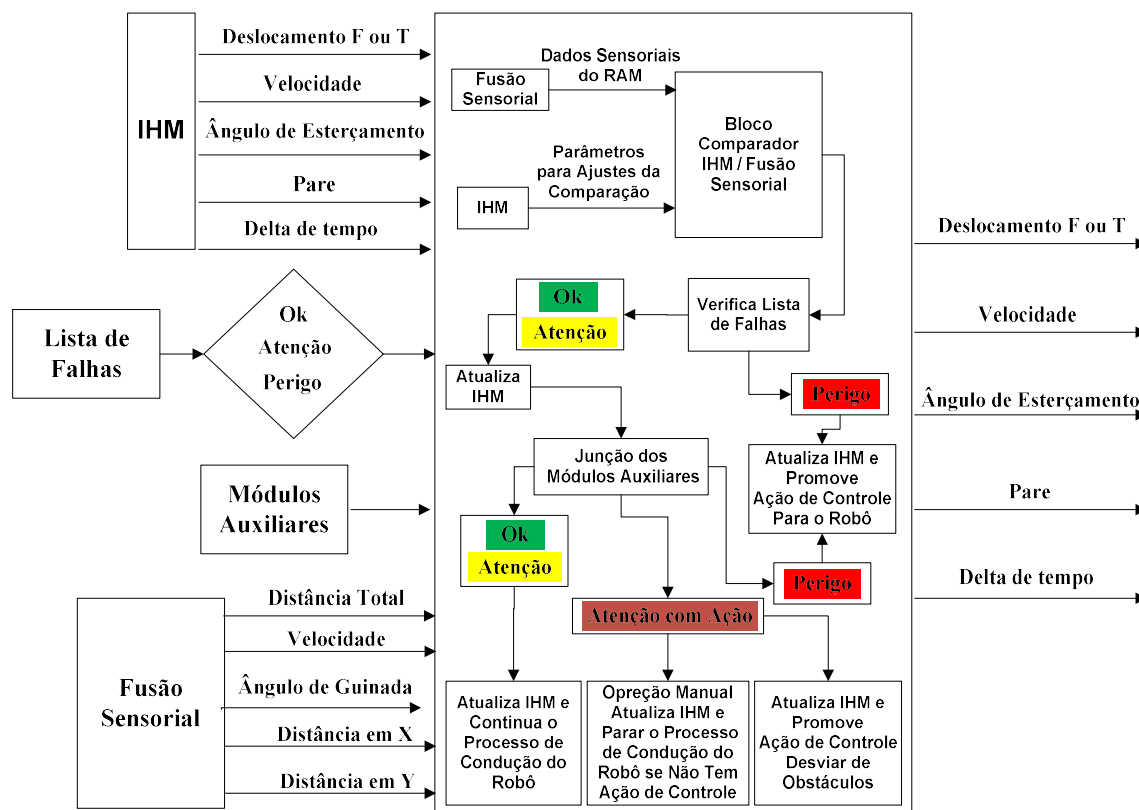
O módulo de controle e tomada de decisão, assim como o Sistema de Controle e Supervisão, utiliza o termo “controle” no sentido de controle de condução do robô, tendo um caráter operacional e não fazendo referência aos sistemas de controle clássicos. Esse módulo tem a função de enviar os comandos para as camadas inferiores e tomar decisões baseadas nas informações de outros módulos, realizando dessa forma um controle operacional.

Observando a Figura 57, é possível notar que o módulo lista de falhas fornece três opções de saída para cada situação que está sendo analisada por ele. Dentre elas, apenas uma pode ser enviada para o módulo de controle e tomada de decisão utilizar na condução do RAM. O módulo auxiliar tem um comportamento similar, porém possui quatro opções para uma saída, e a definição de qual saída será utilizada depende diretamente da relação estabelecida entre os dados fornecidos pelas câmeras. O módulo de controle e tomada de decisão possui basicamente cinco saídas, que são enviadas para o cálculo da geometria de Ackerman:

- Valor para o ângulo de esterçamento das rodas;
- Velocidade de deslocamento da plataforma;
- Sentido de deslocamento;
- Valor do *delta* de tempo para atingir a velocidade desejada;
- Parada, seja ela emergencial ou operacional.

Um diagrama contendo o esquema de funcionamento interno do módulo de controle e tomada de decisão é mostrado na Figura 58.

Figura 58 - Esquema de funcionamento do bloco de controle e tomada de decisão



Fonte: Próprio autor

Analisando o diagrama do funcionamento interno do bloco, é possível observar que ele realiza, a cada ciclo do programa, uma comparação entre os dados sensoriais e as informações disponibilizadas na IHM. Após realizar esse processo, verifica a existência ou não de falhas: se existir falha crítica é tomada uma ação de controle, parando a plataforma e sinalizando perigo na IHM. Caso contrário, atualiza a interface e verifica se o procedimento de condução do robô que está sendo realizado é viável, ponderando as possíveis condições adversas encontradas no seu ambiente de trabalho, utilizando as informações fornecidas pela junção dos módulos auxiliares de visão computacional. Dessa forma podem ser disponibilizados pela camada basicamente três condições:

- Funcionamento normal - atualizando a IHM e dando continuidade na execução da tarefa;

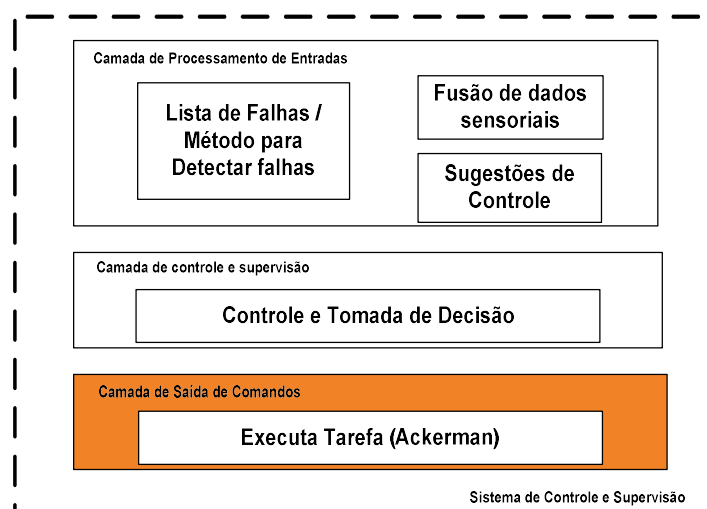
- Alerta com ação – atualizando a IHM, e nesse caso existe a presença de um obstáculo, que exige uma ação de controle que pode ser executada pelo operador ou de forma autônoma, utilizando uma rotina preestabelecida para realizar o desvio;
- Perigo – atualiza a IHM e, independentemente do modo operacional que o robô se encontra, emite um sinal de alerta e para o robô imediatamente.

Após o processo descrito, todos os comandos destinados para realizar a condução da plataforma são disponibilizados para a camada subsequente, a qual, nesse caso, utiliza o algoritmo conhecido como geometria de Ackerman para determinar as ações com os valores pontuais que serão disponibilizados na forma de comando para o sistema de controle de baixo nível executar.

3.7 Camada de Saída de Comandos

A etapa de saída de comandos recebe os dados da camada superior e, utilizando um algoritmo baseado na geometria de Ackerman, define os valores relativos ao esterçamento das rodas (em graus), a velocidade de locomoção em RPM, o sentido de deslocamento do robô, e os envia para o controle de baixo nível executar o comando. Na figura 59, pode ser vista a camada em destaque.

Figura 59 - Camada de saída de comandos em destaque



Fonte: Próprio autor

A camada, a exemplo da anterior, possui apenas um bloco denominado executa tarefa, o qual é responsável por interpretar o comando enviado por meio da geometria de Ackerman e

disponibiliza os valores referentes a cada ação que deve ser tomada pelo sistema de controle de baixo nível.

3.7.1 Executa Tarefa

O bloco da camada de saída tem a função de executar o comando da camada superior e transmitir os dados necessários para as controladoras responsáveis pelo controle de baixo nível. Os comandos transmitidos podem ser simples como, por exemplo, velocidade e sentido de deslocamento da plataforma ou comandos mais elaborados. Um exemplo de comando elaborado ocorre na execução de manobras e em curvas durante a navegação. Nesse caso, a camada de saída recebe um valor "R" referente ao raio da curva que é processado por um algoritmo baseado na geometria de Ackerman, cuja saída fornece as velocidades individuais das rodas em RPM e o valor em graus para o esterçamento de cada uma das rodas dianteiras do robô. Outro fator relevante que deve ser observado, é que, o objetivo do trabalho não está diretamente relacionado ao desenvolvimento da estrutura mecânica do robô, nem ao controle de baixo nível. Dessa forma, as equações do modelo cinemático, não consideram variáveis relacionadas a fatores como os atritos de escorregamento e de rolamento.

As equações da geometria de Ackerman podem ser vistas de forma detalhada em Torres (TORRES et al., 2012). Tais equações, nas simulações realizadas, apresentaram um resultado adequado para ser utilizado pelo sistema de condução do RAM, tornando-as uma solução interessante para um sistema embarcado. O modelo de Ackerman e as equações utilizadas pelo presente trabalho podem ser encontradas no Anexo 1.

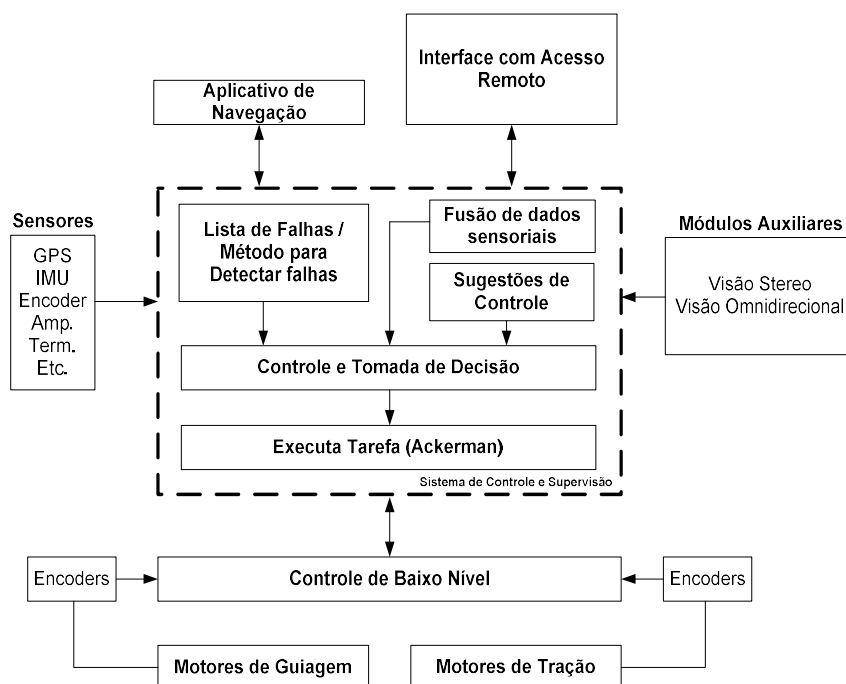
Uma vez definida a cinemática do RAM, com base nas simulações do modelo matemático, estabeleceu-se quais variáveis o Sistema de Controle e Supervisão transmitirá ao controle de baixo nível. A princípio foram estabelecidas as seguintes variáveis para serem aplicadas nos sistemas de guiagem e tração:

- Guiagem - Velocidade de esterçamento das rodas (em m/s), posição (em graus) e o sentido de giro das rodas (horário / anti-horário);
- Tração - Velocidade de deslocamento individualizado para cada uma das rodas (em m/s) e tempo de acionamento (em ms), o qual vai determinar o quanto o robô deve se deslocar, tendo como base de referência o último ponto informado.

Além da definição das saídas para o controle de baixo nível, o Sistema de Controle e Supervisão descrito depende também da definição de entradas dos dados sensoriais e da forma como eles são trabalhados para gerar dados confiáveis, os quais indicam o posicionamento angular das rodas, velocidade de deslocamento, distância percorrida e sentido de trajetória.

Com base na metodologia apresentada nesse capítulo, foi apresentada uma proposta inovadora no sentido de gerar uma camada intermediária (*Middleware*). Tal camada possui um nível de automação, pois toma decisões baseadas em informações fornecidas por blocos que executam tarefas com processamentos individualizados, os quais tem suas saídas agrupadas para gerar soluções em conjunto para Sistema de Controle e Supervisão, permitindo, deste modo, a locomoção do robô em um ambiente agrícola não estruturado. O capítulo é finalizado apresentado um diagrama completo contendo os blocos e suas interações, que pode ser visto na Figura 61, proporcionando uma visão geral do Sistema de Controle e Supervisão e suas respectivas ligações.

Figura 60 - Diagrama do Sistema de Controle e Supervisão do RAM



Fonte: Próprio autor

O Sistema de Controle e Supervisão para robótica agrícola móvel baseado em fusão de dados sensoriais, desenvolvido e implementado no presente trabalho, tem como diferencial, o fato de ser um trabalho de engenharia aplicada, que consiste em um modelo de arquitetura que

utiliza como referência uma série de tabelas e as emprega de forma ponderada de acordo com o cenário atual do robô, e suas ações são executadas baseadas nas informações consideradas mais importantes ou de maior peso para a situação em questão. Dessa forma, o sistema se torna mais efetivo e dinâmico, priorizando os dados ou as aplicações que forem mais relevantes para cada uma das missões que façam uso do robô.

4 Resultados Experimentais

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos com a implementação e simulação de todos os módulos presentes no Sistema de Controle e Supervisão, os quais foram descritos no decorrer dos capítulos anteriores. Os resultados fazem parte do conjunto de soluções denominado Sistema de Controle e Supervisão, os quais contemplam o desenvolvimento de uma camada supervisória independente e modular, os quais são expostos a seguir de forma individualizada.

4.1 Fusão Sensorial

Com o objetivo de melhorar os resultados das aplicações sensoriais disponibilizadas para o controle de condução do RAM, foram implementadas as transformações necessárias, conforme descritas no capítulo anterior, as quais possibilitaram a aplicação das equações de filtros em um sistema. Para definir qual aplicação apresenta o melhor desempenho, para o experimento, utilizou-se a fusão sensorial com o Filtro de Kalman e com o Filtro de Kalman Estendido, e comparou-se os resultados de ambos na definição dos ângulos de Euler.

Para realizar o experimento, foram empregados os dados referentes às acelerações (disponibilizados pelo acelerômetro) e às velocidades angulares (disponibilizados pelo giroscópio), e os resultados obtidos com a fusão de dados correspondem às estimativas dos ângulos de Euler, ou seja, *Roll*, *Pitch* e *Yaw*. Ambos os filtros apresentam resultados similares, porém, no presente trabalho utilizou-se a versão do Filtro de Kalman Estendido. Tal escolha se deve ao fato de que na utilização do Filtro de Kalman se faz necessário a transformação da variável de estado em *quaternions*, alterando assim, o modelo do sistema para uma forma linear. No entanto, para a maioria dos casos não é trivial transformar um modelo de sistema em uma forma linear, e nesse contexto, o filtro Kalman estendido (EKF) leva vantagem devido ao seu bom funcionamento em uma boa parcela dos sistemas não-lineares. Não se pode descartar, no entanto, que mesmo com sua utilização ainda exista a possibilidade de o filtro divergir. Entretanto, a sua utilização é viável e apresenta resultados com desempenho aceitável na maior parte das aplicações.

As relações gerais existentes entre os algoritmos são bem próximas, havendo apenas pequenas alterações no método computacional. Por exemplo, o modelo linear utilizado no filtro de Kalman (KF) é substituído por um modelo não linear no Filtro de Kalman Estendido (EKF), e seu jacobiano substitui as matrizes A e H do sistema, sendo que o jacobiano é calculado a partir da estimativa anterior. Seu principal diferencial é sua aplicação em um sistema não linear, mantendo as características de implementação baseada no algoritmo do filtro de Kalman.

Implementação e comparação dos filtros em uma aplicação real

Tendo como objetivo o desenvolvimento de um Sistema de Controle e Supervisão aplicável na robótica agrícola móvel, baseado em fusão de dados sensoriais, foram realizados experimentos em uma fazenda de cana de açúcar no município de Santa Eudóxia-SP, com o uso de sensores e câmeras acopladas à plataforma robótica agrícola RAM, possibilitando, assim, a coleta de imagens e o sensoriamento do movimento exercido pelo robô durante um trajeto percorrido. A seguir, são apresentados os experimentos realizados, os quais foram divididos em três cenários e tem seus dados utilizados para definição dos ângulos de Euler, além de ser a base das simulações realizadas para validar a parte teórica do Sistema de Controle e Supervisão aplicado ao robô.

Basicamente foram realizados três experimentos de locomoção do RAM em uma estrada entre áreas de plantação de cana de açúcar.

Primeiro experimento:


Foi realizado um percurso em linha reta. Uma foto do local e alguns dados do controle de baixo nível (velocidade de deslocamento, distância percorrida a partir do ponto inicial, ângulo de rotação do robô utilizado no algoritmo da geometria de Ackerman e número da amostra que foram coletadas) podem ser vistos na Tabela 7. Tais informações são posteriormente apresentadas na forma gráfica, juntamente com os resultados obtidos pelas fusões sensoriais dos dados do giroscópio com o acelerômetro, na Figura 61. Por definição, no presente trabalho emprega-se sempre a leitura do dado inicial, do dado final e três dados intermediários, em todas as tabelas que estão relacionadas ao experimento.

Na Figura 61, também é possível analisar graficamente os resultados obtidos pela fusão sensorial, na qual foram aplicados dois algoritmos distintos: o filtro de Kalman (KF) e o filtro

de Kalman estendido (EKF), ambos tendo como referência os dados reais obtidos pelos sensores, cuja leitura foi realizada usando o programa do Sistema de Controle e Supervisão implementado em linguagem de programação C++. Posteriormente, para realizar a simulação utilizou-se o *software MatLab*, o qual gera os resultados e os apresenta graficamente plotando-os de forma comparativa, e tendo como saída resultante os ângulos de Euler (*Roll*, *Pitch* e *Yaw*).

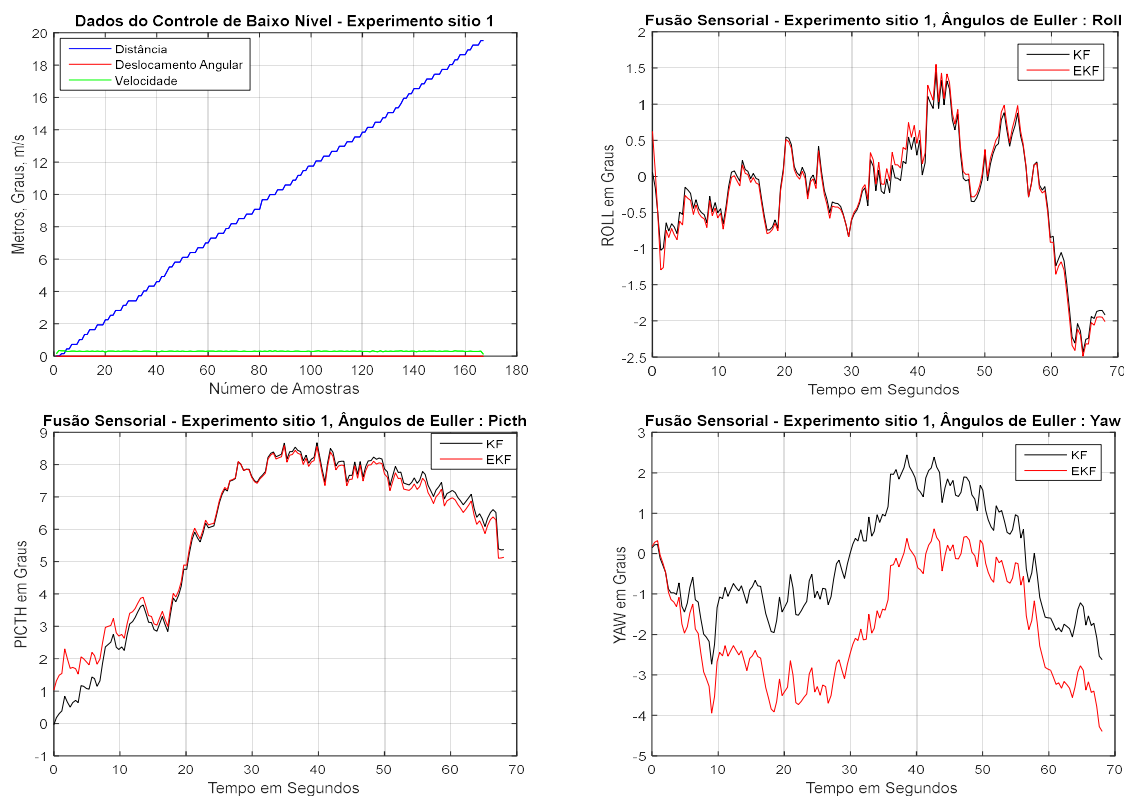
O primeiro trajeto realizado com o robô teve como principal função analisar seu comportamento quando exposto a uma trajetória linear em um ambiente não estruturado. Nesse sentido, os testes apresentaram resultados satisfatórios, considerando as folgas mecânicas existentes na estrutura do RAM e o desnível existente na estrada rural. Analisando a Figura 61 é possível observar que a plataforma se manteve estável com uma velocidade praticamente constante e não foi necessário realizar nenhuma correção em um trajeto linear de aproximadamente 20 metros, com mínima variação angular na guinada (*Yaw*).

Tabela 7 - Dados experimento sítio1

	Velocidade m/s	Distância m	Ackerman Graus°	Número da Amostra
	0.15	0.00	0.00	1
0.27	4.61	0.00	41	
0.29	9.68	0.00	83	
0.32	14.15	0.00	124	
0.11	19.52	0.00	167	

Fonte: Próprio autor

Figura 61 - Dados controle de baixo nível e ângulos de Euler do experimento sítio 1




Fonte: Próprio autor

Outra característica importante que pode ser observada na Figura 61 é o resultado apresentado na fusão sensorial utilizando ambos os filtros, têm comportamentos semelhantes e apresentam bons resultados para os ângulos *Roll* e *Pitch*. Porém, para o ângulo *Yaw* o filtro de Kalman acaba divergindo, característica que se torna mais aparente quando existem mudanças de direção durante o trajeto. Tal condição é apresentada a seguir.

Segundo Experimento:

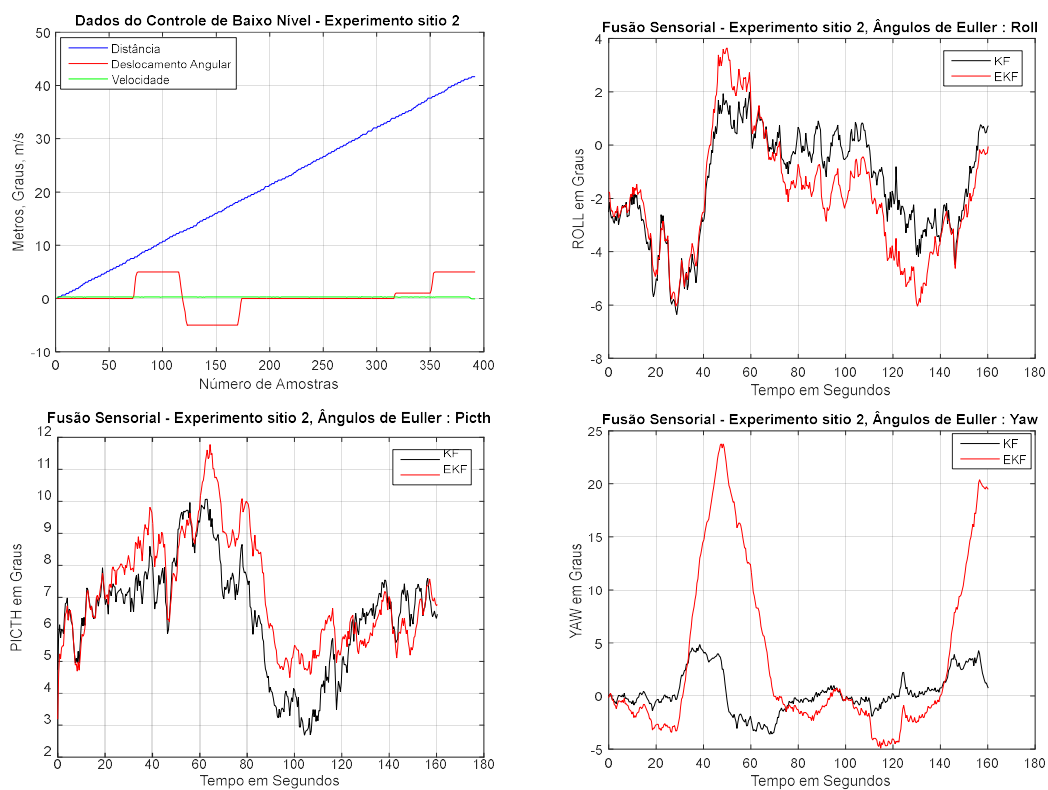
O segundo teste realizado analisa o comportamento do RAM quando o mesmo executa uma manobra de desvio, seguindo o mesmo modelo do primeiro teste, seguindo uma trajetória em linha reta, porém realizando manobras de desvio de obstáculos. Nesse experimento o deslocamento do RAM foi de 41.65 metros, e as informações referentes a este experimento podem ser vistas na Tabela 8 e na Figura 62.

Tabela 8 - Dados experimento sítio2

	Velocidade	Distância m	Ackerman	Número da
	m/s		Graus°	Amostra
	0.15	0.00	0.00	1
	0.30	10.73	5.00	100
	0.30	18.04	-5.00	170
	0.27	37.92	3.17	352
	0.05	41.65	4.99	392

Fonte: Próprio autor

Figura 62 - Dados controle de baixo nível e ângulos de Euler do experimento sítio2



Fonte: Próprio autor


Na análise gráfica é possível notar que o Filtro de Kalman Estendido tem um comportamento menos ruidoso em relação ao Filtro de Kalman, e, quando aplicado na guinada, responde de forma mais satisfatória, que acaba divergindo menos. Tal fator, se torna mais

aparente quando se realiza uma curva completa de 90 graus, situação mostrada no terceiro experimento, a seguir

Terceiro Experimento:

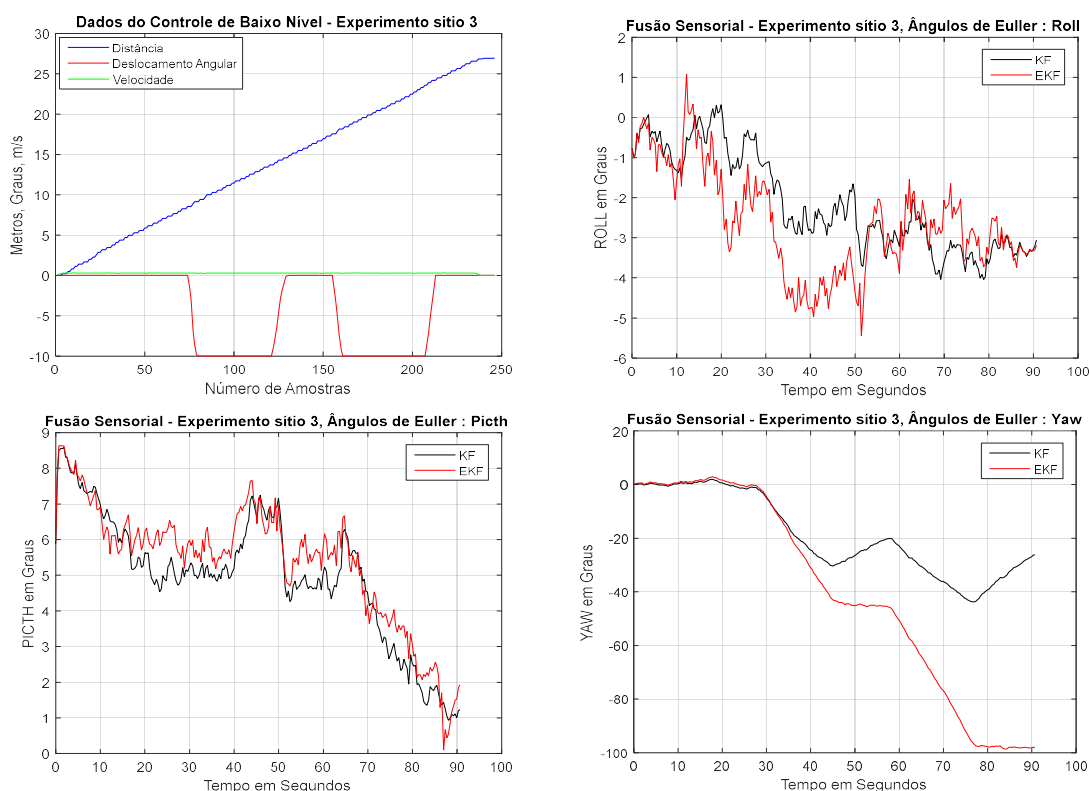
A exemplo dos anteriores, a Tabela 9 contém os dados e foto do terceiro experimento realizado, onde o robô realiza uma manobra de mudança de direção, realizando uma curva de aproximadamente 90 graus para entrar em um caminho perpendicular ao que vinha sendo seguido. Nesse procedimento fica aparente a divergência do valor referente ao ângulo de guinada (*YAW*), é possível observar que o Filtro de Kalman começa a divergir a partir de 20 graus e se perde totalmente, na comparação entre os dois modelos de algoritmos utilizados, para esse experimento só o Filtro de Kalman Estendido apresentou um resultado satisfatório indicando o esterçamento do robô corretamente. Tal relação comparativa pode ser vista na Figura 63.

Tabela 9 - Dados experimento sítio3

	Velocidade	Distância m	Ackerman	Número da
	m/s		Graus°	Amostra
	0.15	0.00	0.00	1
	0.30	11.45	-10.00	100
	0.30	16.98	0.00	150
	0.30	22.48	-10.00	200
	0.27	26.58	0.00	236

Fonte: Próprio autor

Figura 63 - Dados controle de baixo nível e ângulos de Euler do experimento sítio3



Fonte: Próprio autor

Com base na análise dos resultados obtidos nas simulações utilizando dados reais de um ambiente agrícola não estruturado, definiu-se que o Filtro de Kalman Estendido é o método para a ser empregado na fusão de dados sensoriais do Sistema de Controle e Supervisão implementado, já que o EKF foi o que apresentou melhor resultado nos testes, atendendo às exigências impostas ao sistema, principalmente em relação à definição do ângulo de guinada (*Yaw*).

Experimento de um sistema de redundância para determinação dos ângulos de Euler

A redundância em automação de processos e equipamentos que oferecem algum risco não é um tema novo, porém a sua aplicação na robótica móvel agrícola, onde se emprega como segunda fonte de dados um *Smartphone*. Para definir a viabilidade de tal aplicação, foi realizado um teste comparativo entre os valores dos ângulos de Euler obtidos através do uso dos sensores embarcados no RAM, por meio da fusão sensorial utilizando o EKF, e os dados oriundos do aplicativo *Android*. Tais informações são referentes a uma aplicação real de deslocamento da

plataforma robótica RAM em um ambiente não estruturado, sendo que, o experimento para coleta de dados foi realizado em uma área externa ao laboratório NEPAS, dentro das dependências da EESC-USP. Na Figura 64 é mostrada a plataforma na área de teste.

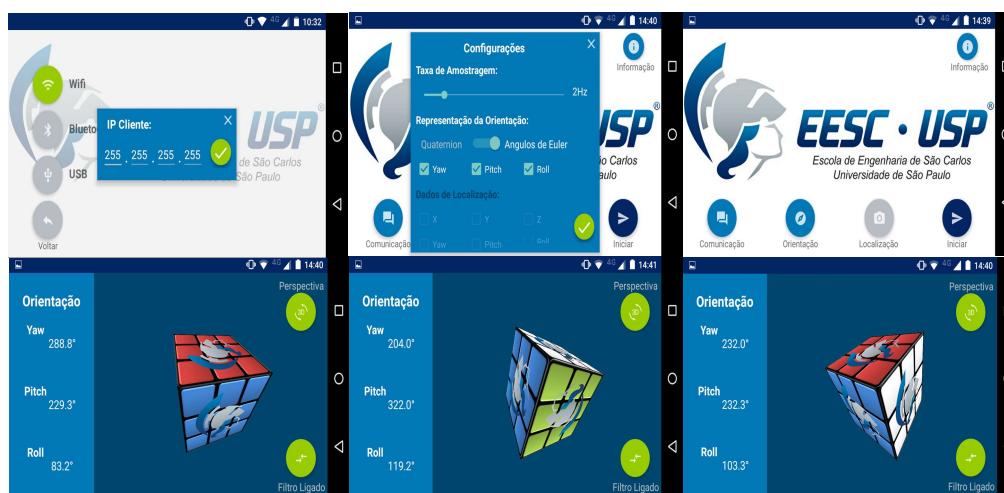
Figura 64 - RAM experimento no campo da EESC-USP



Fonte: Próprio autor

As informações referentes ao experimento foram obtidas da seguinte forma: foi realizado um percurso com a plataforma operada remotamente, partindo de um ponto inicial e em um primeiro momento adotando uma trajetória em linha reta, seguido de uma curva de aproximadamente 90 graus, e voltando a estabilizar e seguir um trajeto reto e perpendicular ao inicial. O aplicativo *Android Teseu*, desenvolvido por Silva (SILVA, 2018) faz parte do trabalho desenvolvido no laboratório NEPAS e foi instalado em um dispositivo com suporte para *Android*, o qual foi fixado na plataforma próximo aos sensores já embarcados, utilizando os parâmetros de configuração mostrados na Figura 65.

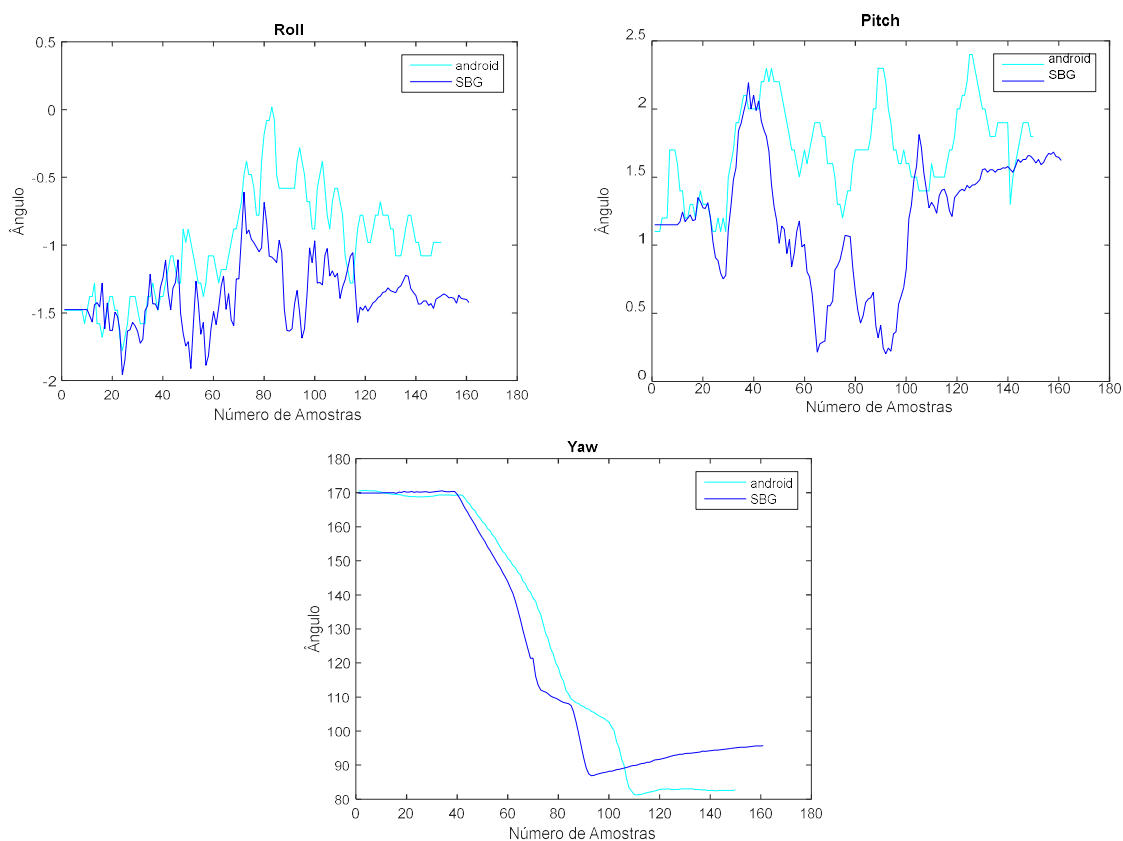
Figura 65 - Aplicativo Teseu



Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Na parte inferior da Figura 65 são mostradas as telas da interface do aplicativo em execução, enquanto na parte superior é possível ver a interface principal, além do tipo de comunicação estabelecida com o PC embarcado, no caso, *Wifi*, a uma taxa de amostragem de 2Hz. Os dados obtidos foram salvos em arquivos e processados *off-line* através da ferramenta matemática, *MatLab*. Os resultados obtidos com o experimento, comparando ambas as medições realizadas pelos sensores e convertidas para ângulos de Euler, são apresentadas na Figura 66.

Figura 66 - Comparativo dos ângulos de Euler.



Fonte: Próprio autor

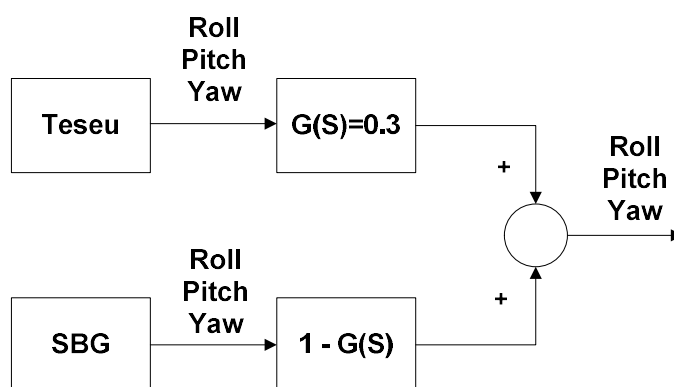
Analisando os gráficos é possível notar que ambos os métodos possuem comportamento similar e uma pequena variação nos valores medidos, ou seja, ocorre um atraso, o qual é acumulativo. Dessa forma, em caso de falha de curta duração no sensor principal, a utilização do aplicativo *Android* (Teseu) atende de forma satisfatória às necessidades das aplicações onde

são empregados os dados referentes aos ângulos de Euler pelo Sistema de Controle e Supervisão do RAM.

O uso do aplicativo *Teseu* oferece a possibilidade de embarcar na plataforma robótica uma segunda fonte de dados sensoriais totalmente independente, o que representa um grande avanço no quesito relacionado à segurança operacional de robôs agrícolas móveis. Tal fator permite que exista redundância em toda informação relacionada ao deslocamento angular existente na plataforma, o mesmo ocorre devido a aplicação do filtro complementar que trabalha com a média ponderada da leitura dos dados, e no caso de uma ocorrência de falha do sensor principal o sistema se mantém em funcionamento, proporcionando assim, maior confiança durante a execução de uma tarefa autônoma de condução pelo robô.

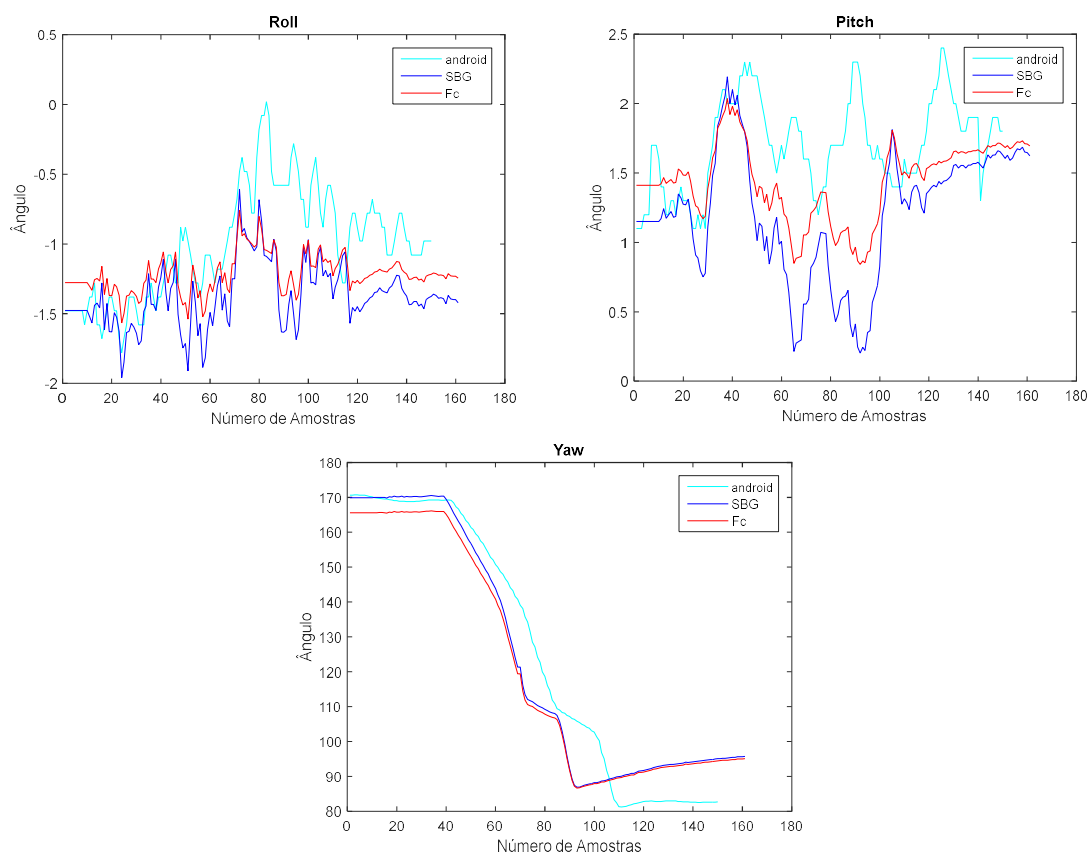
Uma segunda vantagem em se empregar duas fontes de dados sensoriais, se dá, na realização da fusão dos mesmos, melhorando significativamente o sinal de saída utilizado diretamente pelo Sistema de Controle e Supervisão, no módulo de falhas, e também como uma das entradas do filtro complementar de deslocamento angular o qual, a princípio é utilizado na fusão dos ângulos de Euler, e segue o esquema que pode ser visto na Figura 67, tendo seus respectivos resultados apresentados na Figura 68.

Figura 67 - Filtro complementar ângulos de Euler



Fonte: Próprio autor

Figura 68 - Resultado da aplicação do filtro complementar



Fonte: Próprio autor

Realizando uma análise no gráfico da Figura 68, pode-se observar que depois da aplicação do filtro complementar nos ângulos *Roll* e *Pitch* o sinal foi suavizado, diminuindo a intensidade de alguns picos, melhorando relativamente os dados e respeitando a proporcionalidade de confiança dada a cada um dos sensores. Também foi possível melhorar o sinal referente ao ângulo *Yaw*, que posteriormente será utilizado na fusão com o magnetômetro para gerar uma saída para o sistema de controle de condução do RAM.

Filtro Complementar do Deslocamento Angular

Os experimentos que possibilitaram coletar e ajustar os dados obtidos na leitura do magnetômetro, foram realizados da seguinte forma: inicialmente, foi feita a leitura e o armazenamento dos dados utilizando um programa (codificado na linguagem Visual C++), e na sequência nos dados foram aplicadas as equações descritas anteriormente para definir o ângulo de guinada representado por ψ (Ψ). A ferramenta matemática *MatLab*, empregada no

processo de definição do ângulo é também responsável por gerar os resultados de forma gráfica, o que facilita a sua compreensão. Para tal, usou-se os dados que foram obtidos durante os experimentos realizados no campo, descritos no início desse capítulo, e os resultados podem ser vistos na Figura 69, onde na legenda $M_x = M_g$ em x e $M_y = M_g$ em y , e um pseudocódigo do algoritmo utilizado pode ser visto a seguir.

Procedimento ângulo de guinada do magnetômetro (Psi_M)

Variáveis

Flutuante: M_x, M_y ; dados das componentes do campo magnético

Flutuante: Psi_M; ângulo de guinada

Inteiro: Dec \leftarrow -20.58; declinação magnética

Início

 Leia (M_x, M_y)

Faça

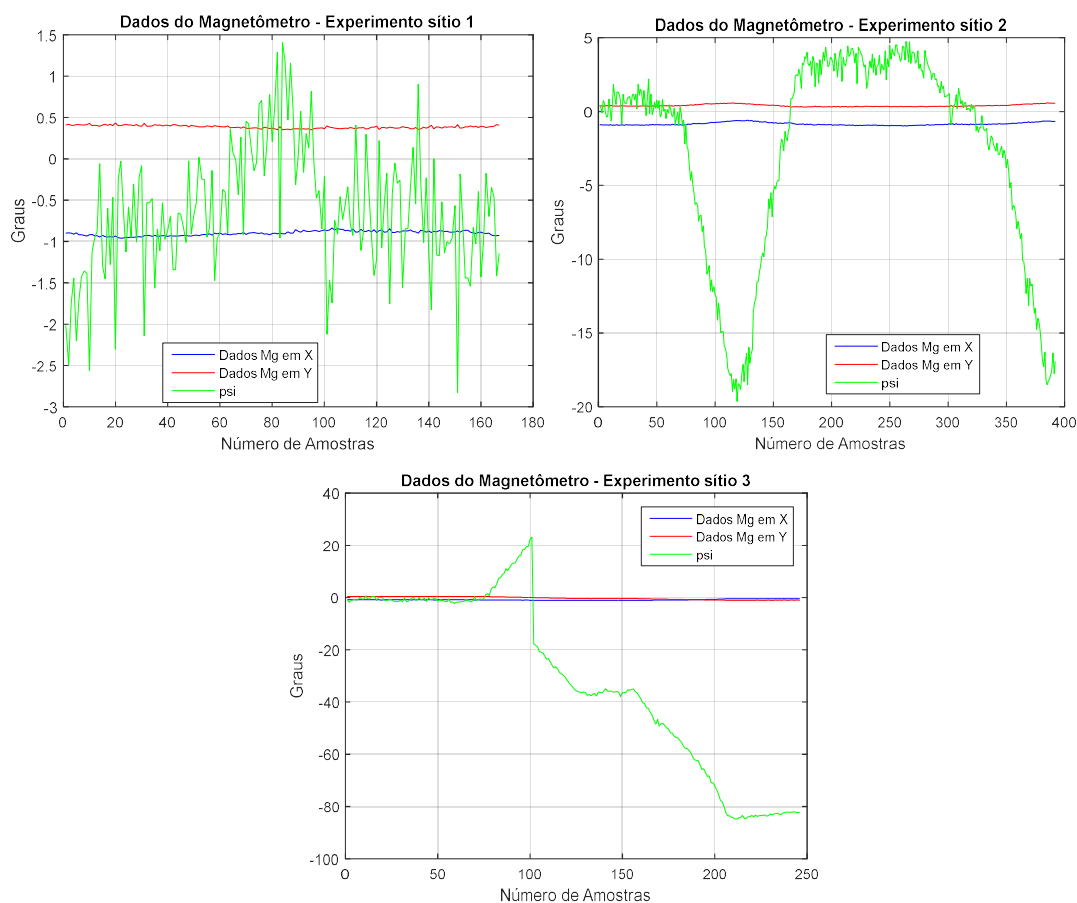
 Psi_M \leftarrow arco-tangente2 (M_y, M_x);

 Psi_M \leftarrow valor absoluto((Psi_M*(180/pi)) - Dec_Magnetica);

Retorna Psi_M;

Fim

Figura 69 - Dados do magnetômetro referentes aos três experimentos



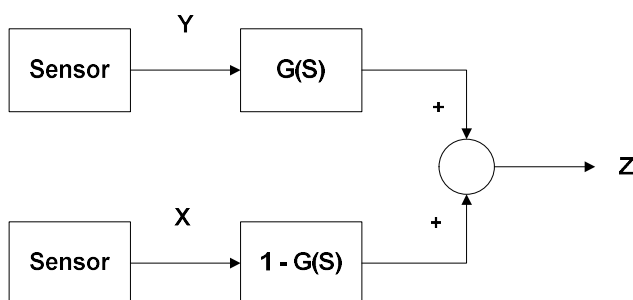
Fonte: Próprio autor

Para fins de definição do modelo do filtro complementar a ser empregado, o presente trabalho se baseia na literatura científica apresentada no Capítulo 2 do presente trabalho, onde o mesmo pode ser considerado um par de filtros digitais, denotados por $[H(z), HC(z)]$, onde $H(z)$ e $HC(z)$ são as funções de transferência desses filtros, exemplo similar ao apresentado na revisão bibliográfica. Nesta configuração, um par de filtros $[H(z), HC(z)]$ é um par de filtros complementares de passagem total se a soma de $H(z)$ e $HC(z)$ satisfaz a seguinte condição: $H(z) + HC(z) = A(z)$, onde $A(z)$ é uma função de transferência de passagem total (MILIĆ, 2009).

No trabalho de Duong (DUONG, et al., 2016), os autores apresentam um conceito relacionado ao Filtro Complementar Convencional (FCC), com duas medidas X e Y, obtidas com diferentes sensores, que medem a mesma grandeza Z, adicionando às medidas um filtro passa-baixa e um passa-alta. Dessa forma é possível gerar uma saída Z satisfatória e amenizar os ruídos presentes nos sinais dos sensores. O esquemático do modelo pode ser visto na Figura

70, onde $G(s)$ é o filtro de passa-baixa e $1 - G(s)$ o seu complemento, um filtro de passa-alta, dando origem ao termo filtro complementar.

Figura 70 – Filtro complementar básico



Fonte: Adaptado de Duong, et al. (2016)

O filtro complementar possui uma série de variações e aplicações distintas. Duong (DUONG, et al., 2016) relacionou alguns desses filtros como, por exemplo, o filtro complementar baseado em descida gradiente, cujo algoritmo é baseado na representação de *quaternions* e pode ser utilizado em uma IMU com dados de acelerômetros e giroscópios para realizar uma estimativa de orientação 2D, bem como o uso em conjunto com magnetômetro para estimativa de atitude 3D.

O algoritmo citado possui um ganho fixo β e é adequado para a estimativa de atitude do sistema em condições estáticas, porém, seus resultados também são alcançados para um sistema dinâmico moderado, sendo que tanto o ganho fixo como a taxa de amostragem podem afetar o desempenho do filtro.

O princípio do filtro complementar clássico é realizar a fusão de dados de diferentes sensores de acordo com suas características de frequência, ou seja, a fusão de dados é implementada por FC no domínio de frequência. Estudos iniciais do filtro de atitude complementar realizados por Xiang (XIANG & QUN, 2017), utilizaram duas ou mais estimativas de atitude feitas de acordo com dados de diferentes sensores, e posteriormente mescladas no domínio de frequência. Com essa aplicação os autores concluíram que o algoritmo proposto pode cooperar com vários estimadores de atitude e é computacionalmente eficiente.

O presente trabalho não explora todos os recursos existentes nas variações do filtro complementar e utiliza somente sua forma básica, a qual devido à aplicação proposta para a fusão envolvendo os dados utilizados pelo Sistema de Controle e Supervisão, já atende de forma satisfatória as necessidades impostas. Tal fator se deve ao fato de os dados serem obtidos de

forma distinta, e em alguns casos, já foram até realizadas fusões e filtragens, como mostrado nos tópicos anteriores a este.

Para gerar a saída psi linha (ψ'), a qual é utilizada como referência do ângulo de guinada do RAM pelo Sistema de Controle e Supervisão durante o processo de condução, e pelo algoritmo de conversão da distância no espaço cartesiano, é aplicado um filtro complementar adotando os seguintes pesos para os sinais: valor obtido pelo sensor magnetômetro, representado na Figura 47 por (Ψ), equivale ao percentual de 0.3 e os dados oriundos da fusão entre o acelerômetro e o giroscópio realizada utilizando o filtro de Kalman estendido representado na Figura 47 por Yaw, tem o peso equivalente a 0.7. Os resultados da fusão podem ser vistos na Figura 72 e o pseudocódigo do algoritmo do filtro complementar utilizado na fusão é mostrado a seguir.

Procedimento filtro complementar do ângulo de guinada (Psi_linha)

Variáveis

Flutuante: yaw, psi, Fg;
 Flutuante: Psi_Linha; ângulo de guinada do filtro complementar
 Inteiro: n;

Início

Leia (ekf3, Psi_M) ângulos de guinada do ekf e do magnetômetro

Faça

psi \leftarrow Psi_M;

Psi_M \leftarrow ekf;

Para n=1 até n=máximo

Faça

psi_linha(n) \leftarrow (0.70*yaw(n) + 0.30 * psi(n));

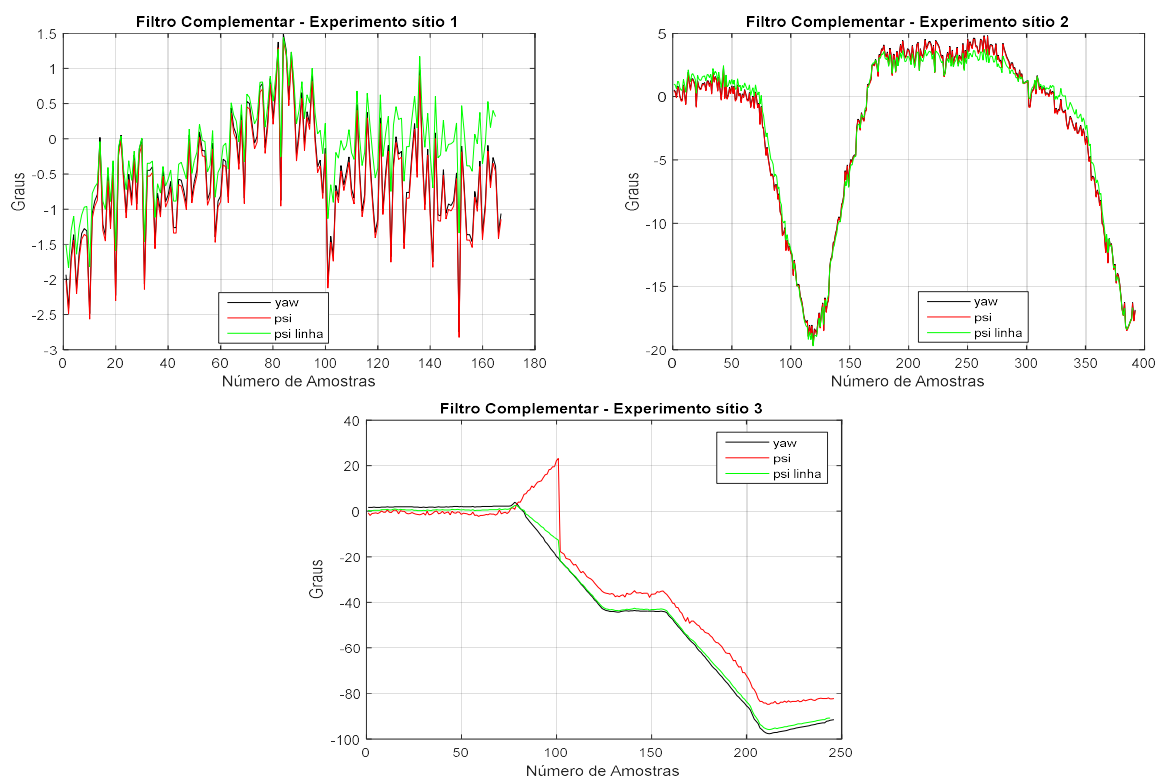
psi_linha(n) \leftarrow (Fg(n+1) - Fg(n)) * -1;

Fim Para

Retorna Psi_Linha(n);

Fim

Figura 71 - Filtro complementar para definição de psi linha



Fonte: Próprio autor

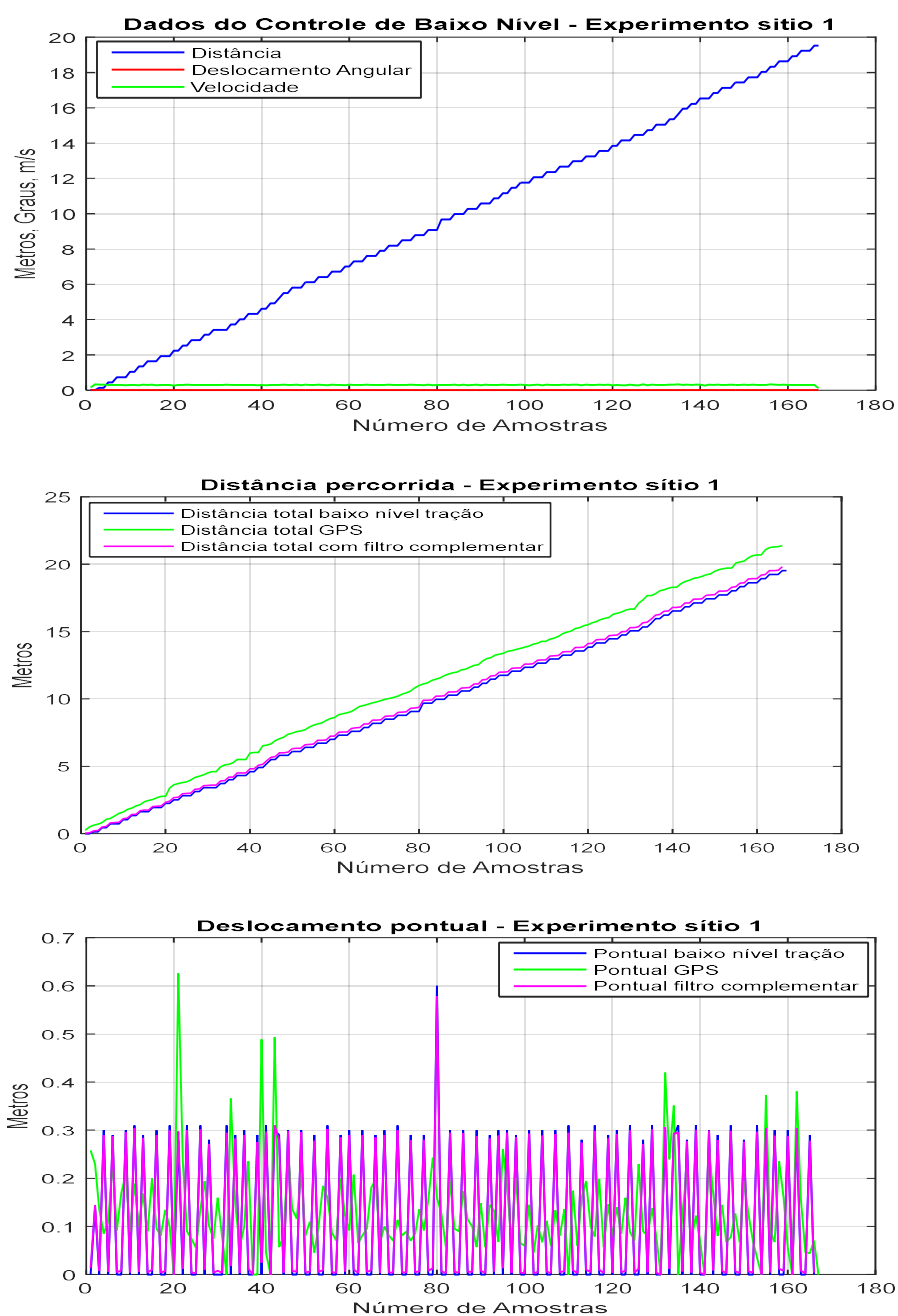
Como mostrado graficamente, com os dados obtidos no experimento 3 a utilização do filtro complementar melhora significativamente o ruído existente nos dados gerados pela fusão com o EKF e os disponibilizados pelo magnetômetro, além de minimizar a perda de fase do magnetômetro. Outro fator relevante é a forma como se realiza a fusão com o filtro complementar para gerar a saída referente ao ângulo de guinada do RAM, a qual se dá pela fusão de dados obtidos de processamentos distintos. Dessa maneira, diminuem o custo computacional utilizando algoritmos mais simples, e por fornecerem apenas a informação final, podem ser considerados módulos independentes.

Nesse contexto, as informações dos sensores podem ser geradas por aplicações distintas e implementadas separadamente, ou serem provenientes até mesmo de aplicações e equipamentos auxiliares como, por exemplo, uma IMU ou a placa com um aplicativo *Android*. Essa configuração modular permite maior segurança em caso de falha em um dos sensores e também torna possível a troca de sensor ou aplicação sem a necessidade de refazer todo o programa de controle e supervisão.

Filtro Complementar do Deslocamento e Conversão da Distância no Espaço Cartesiano

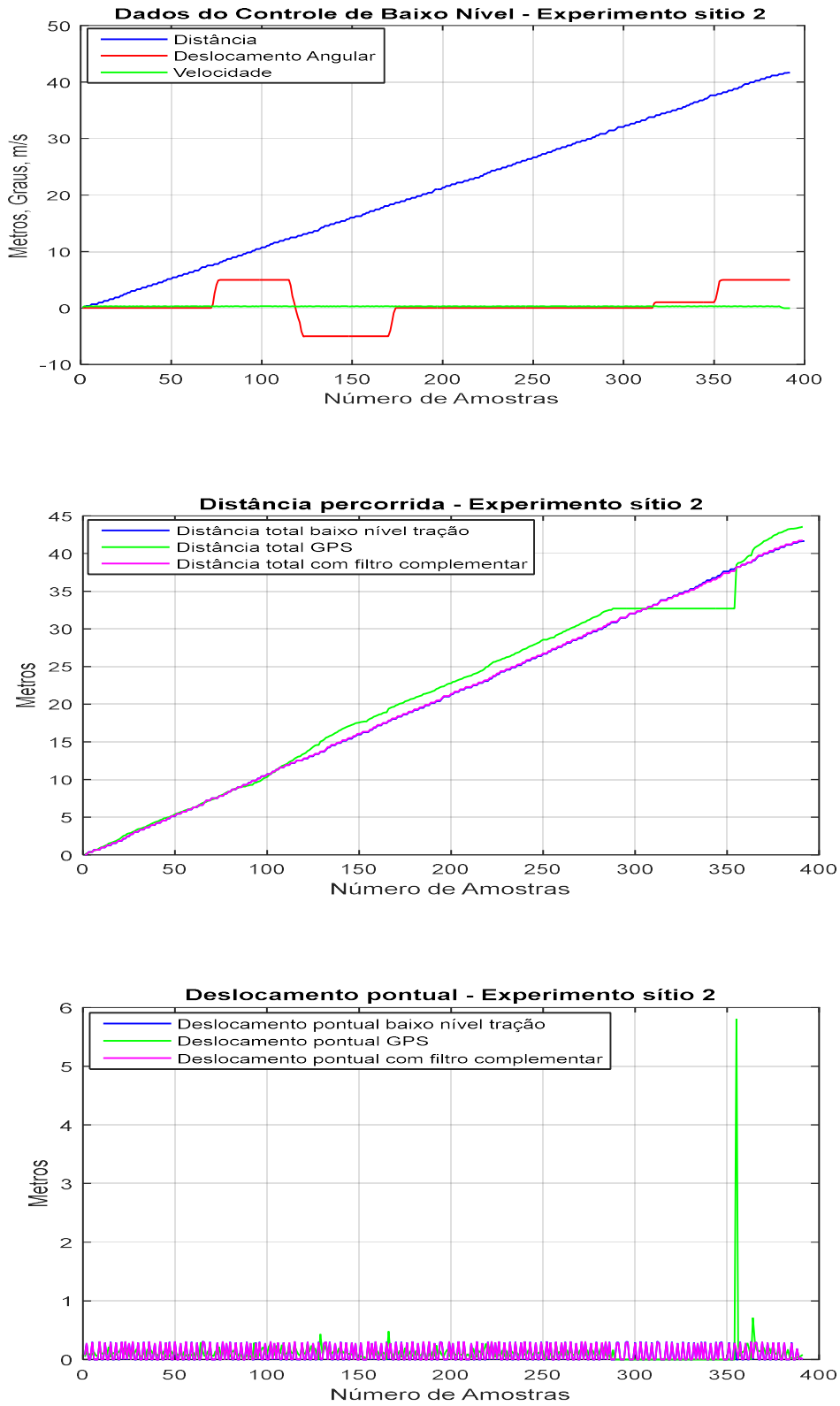
Utilizando os dados dos experimentos realizados no campo para a definição da distância percorrida e pontual durante o deslocamento do RAM, foi implementado um filtro complementar na fusão das informações e os resultados obtidos, podem ser vistos nas Figuras 72, 73 e 74 a seguir.

Figura 72 – Distância percorrida e deslocamento pontual com os dados do experimento sítio 1



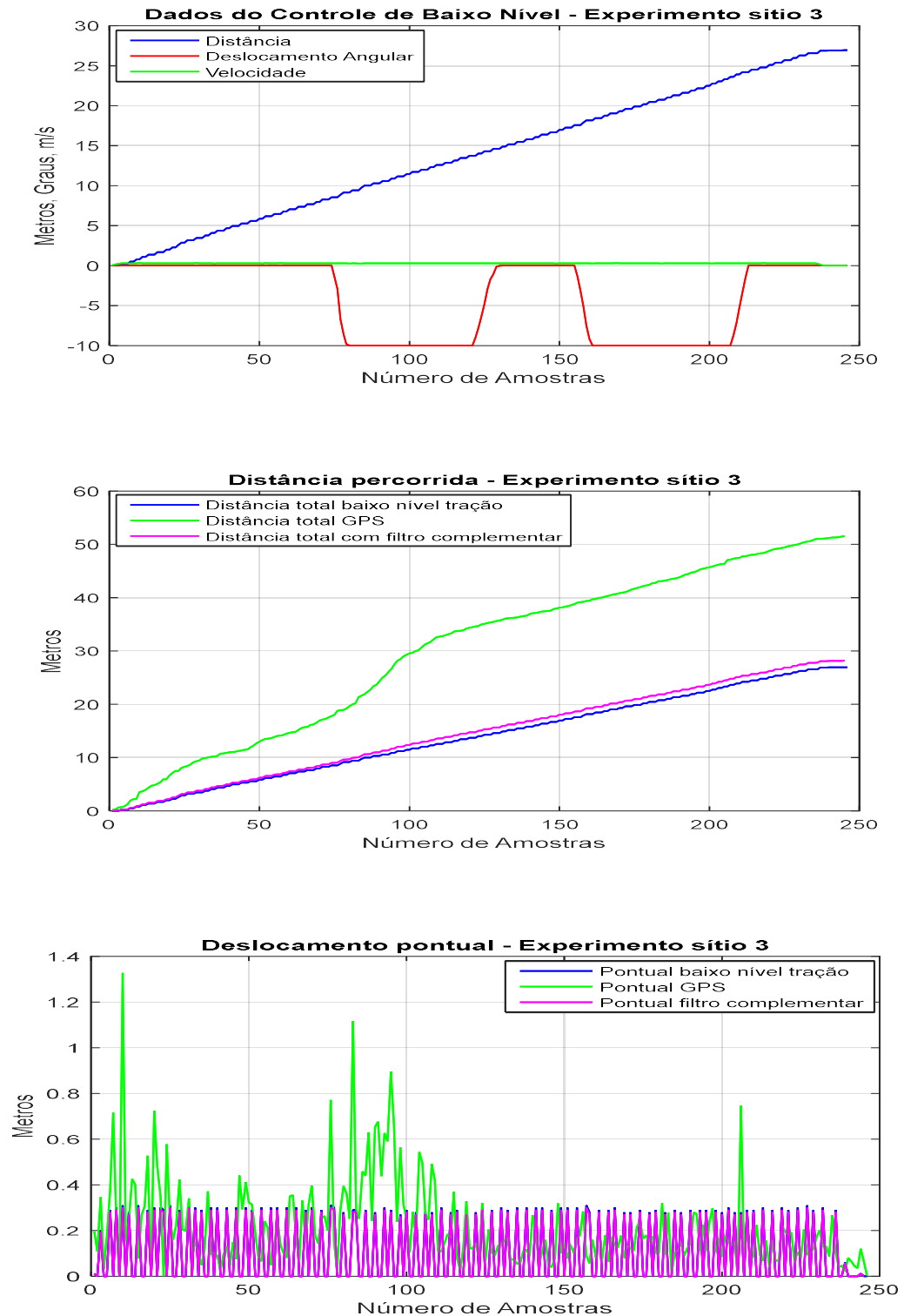
Fonte: Próprio autor

Figura 73 - Distância percorrida e deslocamento pontual com os dados do experimento sítio 2



Fonte: Próprio autor

Figura 74 – Distância percorrida e deslocamento pontual com os dados do experimento sítio 3



Fonte: Próprio autor

Analisando as figuras anteriores, é possível perceber que na distância total existe uma grande divergência de valores encontrados pelo GPS em relação à leitura baseada nos dados do controle de baixo nível oriundos dos encoders. Desta forma, o emprego do filtro complementar básico (o mesmo já aplicado anteriormente) se torna fundamental para aprimorar os valores percorridos pela plataforma RAM.

O filtro considera um percentual de 85% para as informações fornecidas pelo controle da plataforma e 15% para os dados do GPS. Tal percentual foi definido de forma empírica, em função dos testes realizados, os quais mostraram que o RAM percorreu uma distância de 70 metros em linha reta com um erro de 0,3 metros. No gráfico denominado deslocamento pontual é possível observar a existência de uma grande variação nos dados do GPS em relação aos dados da odometria do robô, isso se dá devido a soma de erros dos dados referente a localização do robô em campo, vale ressaltar, que tal fato ocorreu pelo tipo de sensor de GPS utilizado no experimento.

O valor referente à saída do filtro, além do seu uso pelo Sistema de Controle e Supervisão para condução e informação operacional, também é utilizado em um algoritmo, juntamente com o ângulo de guinada já definido anteriormente, para definir o deslocamento em “x” e “y”, que juntamente com o ângulo (ψ'), geram as informações necessárias para a condução do RAM. O pseudocódigo do algoritmo utilizado é mostrado a seguir.

Procedimento deslocamento pontual em (x, y)

Variáveis

Flutuante: gr, dx, dy, dpc, Psi';
Inteiro: n;

Início

Leia (distc, psi_Linha)

Faça

```
dpc ← distc(:,1); recebe distância pontual filtrada
Psi' ← psi_linha(:,1); recebe ângulo de guinada filtrado
gr ← psi' * (pi/180);
dx ← sin(gr) * dpc ;
dy ← cos(gr) * dpc ;
```

Retorna (dx, dy);

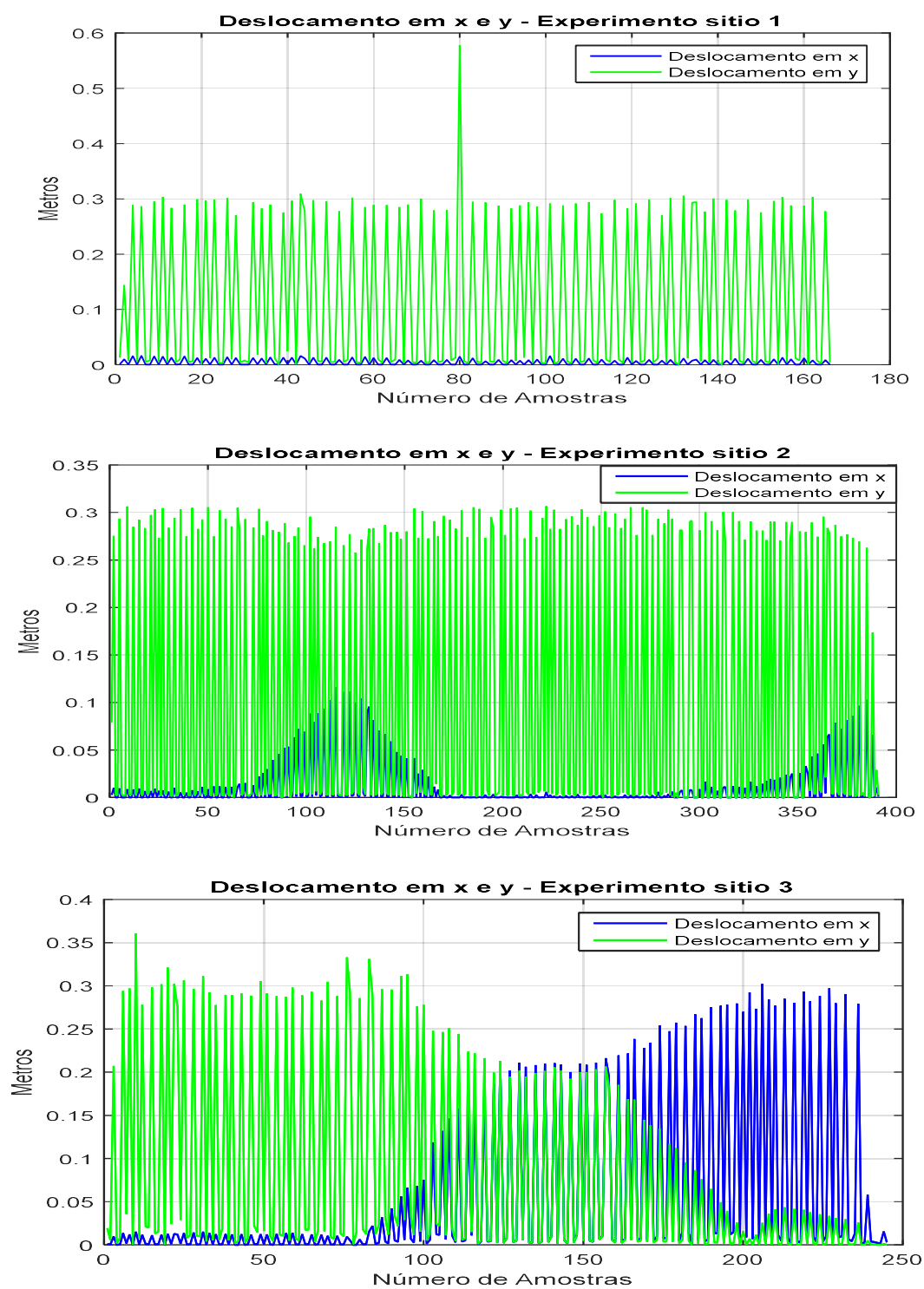
Fim

Nesse caso, “gr” é o valor do deslocamento angular do RAM em radianos, “dx” é a distância pontual referente ao eixo x no espaço cartesiano, “dy” é a distância pontual referente ao eixo y no espaço cartesiano e “dcp” o valor do deslocamento pontual da saída do filtro complementar do deslocamento linear.

A aplicação dessas equações matemáticas gera saídas que podem ser utilizadas por um algoritmo que permita a condução autônoma de um robô móvel. O algoritmo denominado *pure pursuit* (WANG, HSU & WU, 2017) é um bom exemplo. Outra aplicação para as informações obtidas com o deslocamento em x e y é fazer o processo inverso, convertendo os valores em latitude e longitude. Dessa forma, compensam-se os erros do GPS, obtendo uma melhora significativa na precisão das coordenadas geográficas, procedimento que pode ser útil para mapear ambientes não estruturados.

O resultado da aplicação do algoritmo, com os dados reais obtidos com o experimento realizado em ambiente não estruturado na fazenda, pode ser visto de forma gráfica na Figura 76, onde aparecem nitidamente os deslocamentos nos eixos x e y, principalmente durante a execução de manobras como, por exemplo, realizando desvios e mudando de direção em uma curva.

Figura 75 - Deslocamento pontual em x e y



Fonte: Próprio autor

4.2 Módulos Auxiliares

No Sistema de Controle e Supervisão do presente trabalho as aplicações envolvendo visão computacional são denominados módulos auxiliares, e as informações disponibilizadas por ele são tratadas pelo bloco sugestões de controle. Basicamente, os módulos auxiliares estão divididos em duas aplicações de sugestões de controle: a análise de caminho e a identificação de presença de obstáculos. Para a análise de caminho são utilizadas as informações disponibilizadas pela tabela construída com os dados fornecidos pelo sistema de visão omnidirecional. A segunda aplicação de sugestão de controle pode ser utilizada para identificar a existência de possíveis obstáculos no caminho percorrido pela plataforma.

O Sistema de Controle e Supervisão utiliza as tabelas contendo os valores binários enviados pelos módulos auxiliares de acordo com cada situação em que o robô for exposto.

Os dados gerados pelos dois sistemas auxiliares (Câmera Omnidirecional e Câmera Estéreo), são convertidos para o formato decimal e passam por um processo de agrupamento, dando origem a uma nova tabela, a qual contém um código correspondente a cada uma das possíveis situações, referentes a existência de obstáculo e áreas navegáveis.

As combinações entre as saídas dos dois módulos auxiliares geram 256 possíveis situações, as quais estão divididas em quatro grupos distintos, e de acordo com o modo de operação e o trajeto determinado, disponibilizam uma sugestão de controle para o módulo de controle e tomada de decisão. Devido ao elevado número de possíveis circunstâncias determinadas com a combinação dos sistemas auxiliares, foram estabelecidos quatro grupos com prioridades e cores distintas, os quais são utilizados para ponderar eventos relativos às seguintes condições plausíveis de ação pelo bloco de controle e tomada de decisão:

- P1 - Normal, sem obstáculos e com área navegável;
- P2 - Atenção durante a condução do robô;
- P3 - Atenção com ação do controle de trajetória;
- P4 - Parar o robô.

Um exemplo da tabela com as combinações geradas pelos módulos auxiliares pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10 – Sequência das combinações das saídas dos módulos de Visão

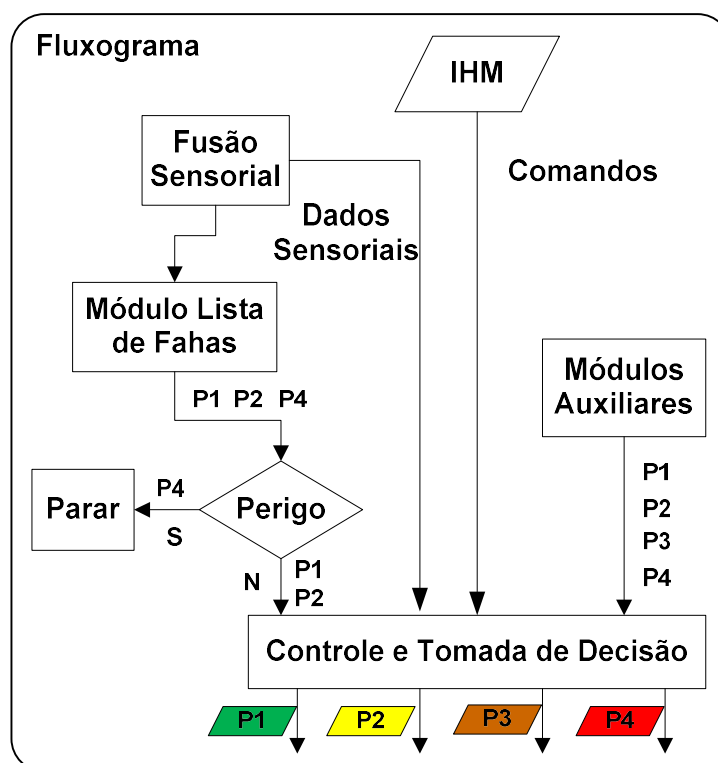
Prioridade	Junção	Estéreo/Omnidirecional	Descrição
P4	1	1.1	Não Existe Objeto Distante //Não Existe Área Navegável.
P1	32	2.16	Não Existe Objeto Próximo //Todas as Áreas em Condição de Navegação.
P3	205	13.13	Objeto Próximo e a Esquerda do robô //Frontal e Lateral Direita.
P4	222	14.14	Objeto Próximo a Esquerda e Direita do robô //Frontal, Lateral Direita e Lateral Esquerda.
P3	233	15.9	Objeto Próximo no Centro e a Esquerda do robô //Frontal.
P1	219	14.11	Objeto Próximo a Esquerda e Direita do robô //Frontal e Traseira.
P2	256,	16.16	Objeto Próximo no Centro, a Esquerda e a Direita do robô //Todas as Áreas em Condição de Navegação

Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos com as tabelas geradas a partir dos módulos auxiliares que compõem o Sistema de Controle e Supervisão, são utilizadas após passarem por um algoritmo que realiza a fusão dos sistemas de visão. Tal procedimento, gera as saídas para ponderar qual ação deve ser tomada, baseando-se na condição atual do robô em relação ao ambiente que ele está operando. As informações resultantes são fundamentais para definição da ação a ser tomada durante a condução do robô, realizando uma análise do cenário atual em que o mesmo se encontra e priorizando a segurança operacional independentemente do comando enviado pelo operador.

O módulo “lista de falhas” disponibiliza saídas contendo três níveis de prioridade, sendo P1 e P2, liberando o comando para ser analisado na camada de controle e tomada de decisão, e P4 parando as atividades do robô. Por sua vez, o módulo auxiliar, fornece informações para a camada de controle e tomada de decisão empregando quatro níveis de prioridade. Na Figura 76 é mostrado um fluxograma contendo a sequência de entradas de informações e suas prioridades.

Figura 76 - Fluxograma de entradas com prioridade da camada de controle e tomada de decisão



Fonte: Próprio autor

Analisando o fluxograma é possível ver as entradas disponibilizadas e as recebidas pela camada de controle e tomada de decisão. Sendo que ela não só replica as entradas recebidas, mas realiza um processo de ponderação, determinando níveis de prioridade para gerar as saídas referentes ao comando de entrada sendo os mesmos indicados na Figura 77 por P1, P2, P3 e P4. Isso ocorre devido às inúmeras possibilidades de combinações geradas pelo módulo auxiliar, as quais quando relacionadas com o comando dado pelo operador podem mudar o nível de prioridade. Um exemplo que ilustra a descrição pode ser visto na tabela 11.

Tabela 11 – Alteração de prioridade realizado pela camada de controle e tomada de decisão

Código	Descrição
Ângulo > 0 LD	Significa que existe o comando para virar à direita
P4 - 154	Objeto Próximo e a Direita do robô //Frontal e Lateral Esquerda
Ângulo > 0 LE	Significa que existe o comando para virar à esquerda
P2 - 154	Objeto Próximo e a Direita do robô //Frontal e Lateral Esquerda
Ângulo = 0 DF	Significa que existe o comando para seguir trajetória linear
P3 - 154	Objeto Próximo e a Direita do robô //Frontal e Lateral Esquerda

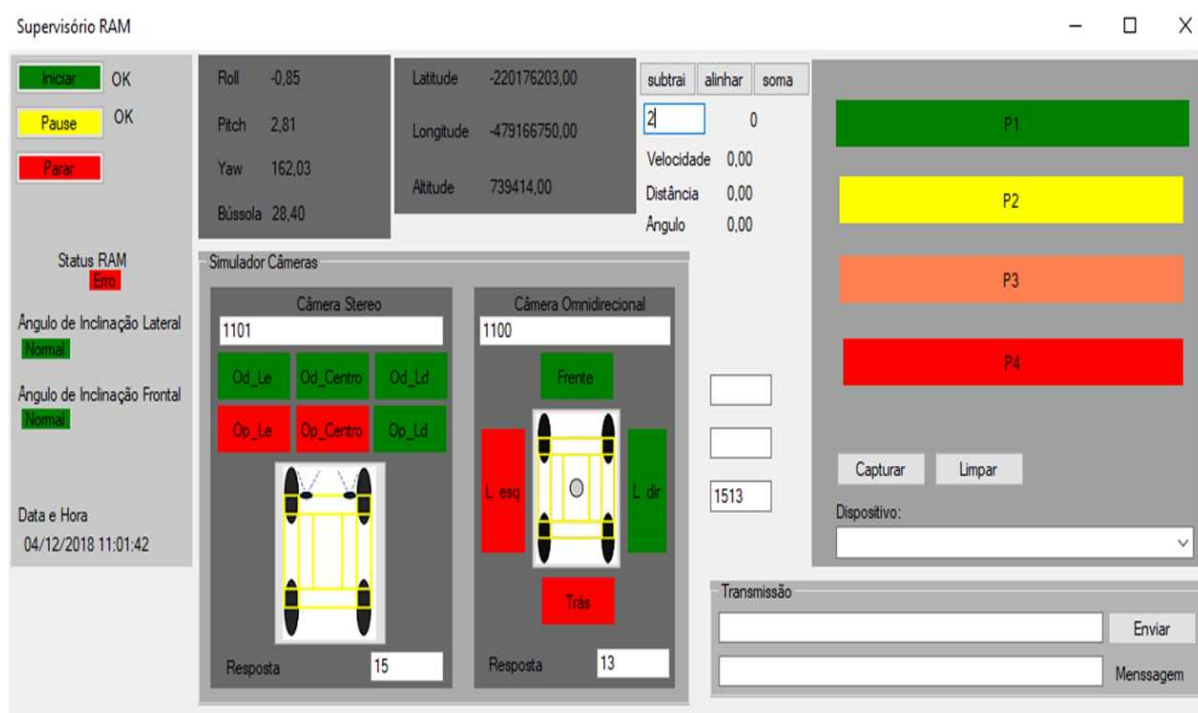
Fonte: Próprio autor

A tabela apresenta três níveis distintos de prioridade para uma mesma condição de entrada fornecida pelo módulo auxiliar. Nela, é possível notar que variando o ângulo do comando que está em execução em um mesmo cenário de área navegável e presença de obstáculo, muda-se o nível de prioridade da saída. Fornecendo as informações necessárias para a camada da geometria de Ackerman, a qual gera os comandos que o Sistema de Controle e Supervisão envia para com controle de baixo nível executar.

4.3 IHM e o funcionamento do Sistema de Controle e Supervisão

O Sistema de Controle e Supervisão desenvolvido no presente trabalho, possui uma IHM que proporciona a interação entre o operador e robô, fornecendo informações sobre a plataforma e possíveis condições adversas que podem ocorrer durante a condução do mesmo, além de possibilitar o envio de comandos e leitura de dados sensoriais. Também, o programa tem implementado o algoritmo que realiza toda parte de fusão sensorial e tomadas de decisões baseadas em informações auxiliares. A tela principal do sistema supervisorio é mostrada na Figura 77, a seguir.

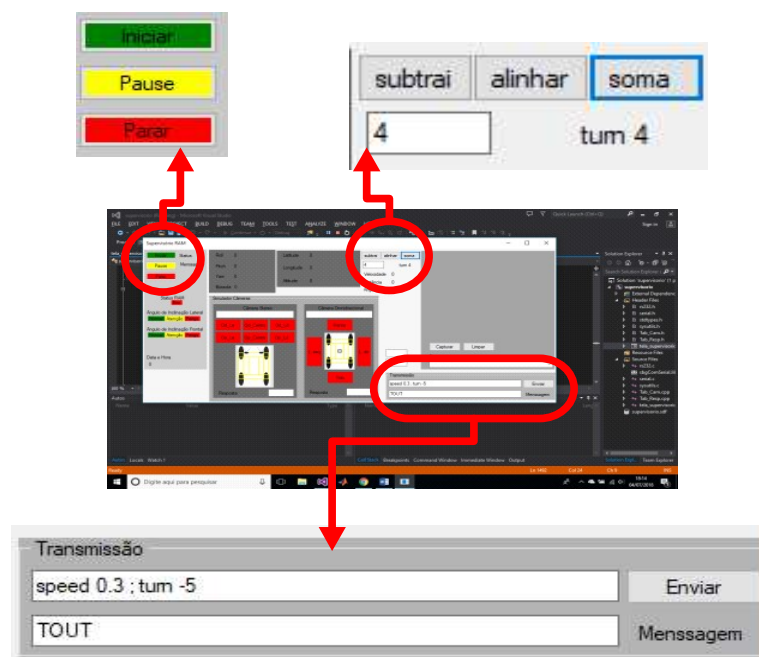
Figura 77 - Tela do Sistema de Controle e Supervisão do RAM



Fonte: Próprio autor

Esta interface permite ao operador acompanhar as intercorrências do RAM durante sua condução, além de visualizar os dados sensoriais e parâmetros como, por exemplo, velocidade, distância percorrida e ângulo de esterçamento. Também é possível acompanhar as informações referentes aos módulos de falha e sugestão de controle. Por meio da IHM também é possível enviar comandos utilizados na condução do robô, sendo que o envio pode ser de forma direta, escrevendo o comando por caixa de texto ou por botões virtuais. Na Figura 78, são mostradas, em detalhe, as partes da IHM destinadas à inicialização e à condução da plataforma RAM, por meio de comandos manuais.

Figura 78 - Comandos utilizados em operação manual do RAM



Fonte: Próprio autor

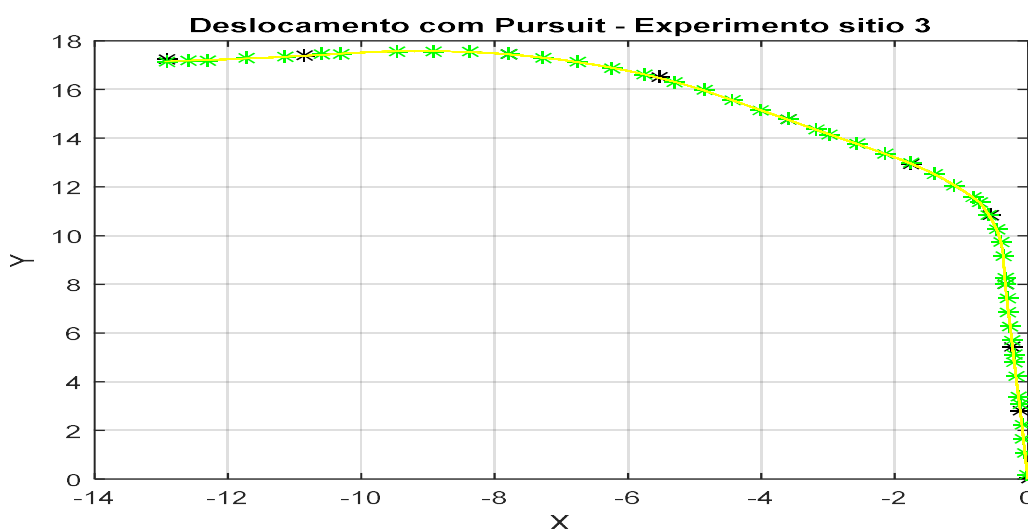
Na Figura 78 são mostrados três campos expandidos que representam o conjunto de botões, que podem ser acionados manualmente e são utilizados para iniciar, pausar e parar. O campo denominado transmissão, localizado abaixo da figura, possui duas caixas de textos: A primeira é uma destinada ao envio de comandos direto ao controlador de baixo nível como, por exemplo, velocidade, tempo de aceleração, entre outros. Os comandos são escritos na caixa de texto e são enviados quando o botão *enviar* é acionado. A segunda caixa de texto retorna informações sobre as variáveis que estão sendo controladas ou se existe algum erro no controle de baixo nível.

Na parte superior da figura existe um quadro expandido contendo uma caixa de texto e três botões, onde é possível colocar um valor numérico referente ao ângulo de esterçamento das rodas. Uma vez determinado o ângulo, os botões podem ser utilizados para soma-los ou subtraí-los do valor em execução. Adicionalmente, existe um botão para o alinhamento automático das rodas. O acionamento dos botões pode ser feito pela IHM ou utilizando as teclas f 10, f 11 e f 12.

Outra aplicação relevante no presente trabalho é a utilização do algoritmo *Pure Pursuit* como referência na definição da trajetória na condução automática do RAM, o qual foi implementado e simulado no *Software Matlab*, com os dados reais do experimento realizado no campo, e seu comportamento correspondeu satisfatoriamente atendo os objetivos do projeto.

Na Figura 79 é possível analisar os resultados obtidos com sua utilização. Para realizar o experimento, foram determinados onze pontos, os quais tem a coloração preta e correspondem a coordenadas obtidas da trajetória original do terceiro experimento realizado da fazenda. Os pontos em verde no gráfico são as coordenadas disponibilizadas pelo algoritmo *pure pursuit* para o deslocamento da plataforma RAM e a linha amarela representa a trajetória original.

Figura 79 – trajetória descrita pelo algoritmo *Pure Pursuit*



Fonte: Próprio autor

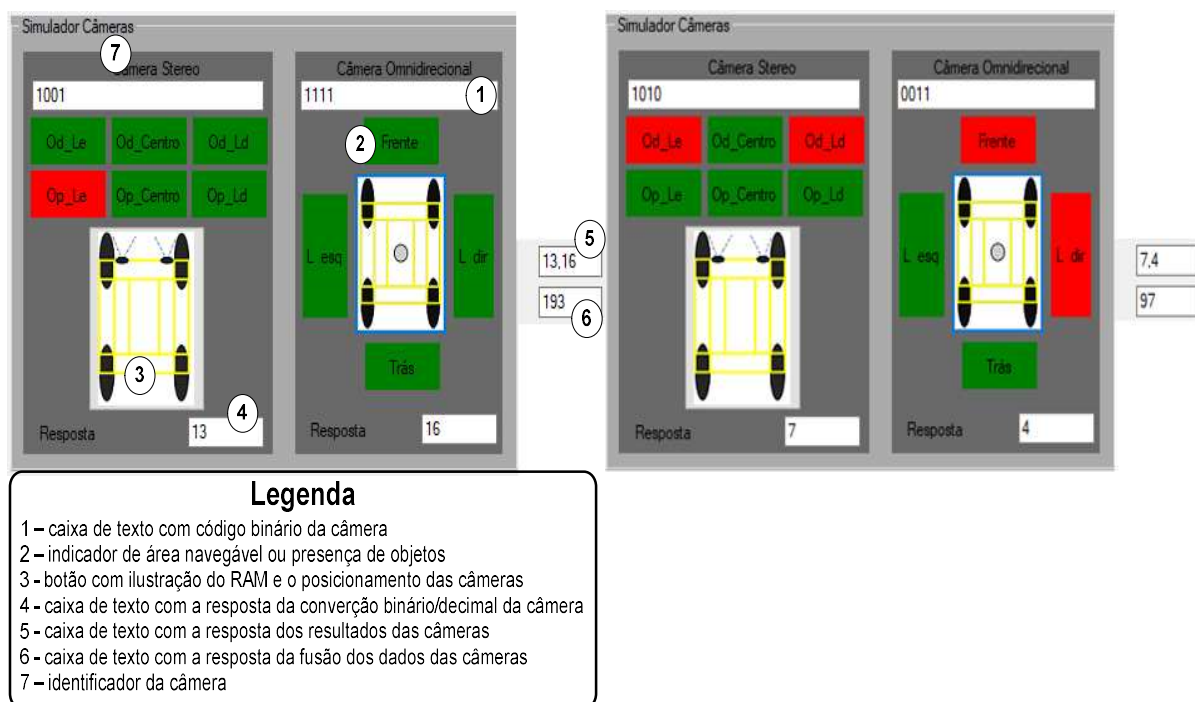
Por meio da IHM o operador consegue, além de identificar possíveis falhas, executar manobras enviando comandos de forma direta via comunicação serial e receber respostas sobre a execução dos mesmos. Também é possível ser alertado sobre a existência de obstáculos e onde eles se encontram, sobre a inclinação frontal ou lateral da plataforma e, parar, pausar e iniciar o programa. Além de criar arquivos no formato de texto com os dados disponibilizados na tela, contendo data e horário da leitura.

Na Figura 80 pode ser vista a parte da tela do Sistema de Controle e Supervisão, com os campos que contém as informações referentes a cada parte da combinação das tabelas dos módulos auxiliares, e a representação da situação em que se encontra o robô naquele momento.

Na área representando o sistema de Câmera Estéreo, a cor verde indica a não existência de obstáculo à frente, e a cor vermelha indica a existência de obstáculo, possibilitando ao operador identificar se ele está próximo ou longe, e em qual posição se encontra, tendo como referência, o centro do robô. Para o sistema de Câmera Omnidirecional, também ilustrada na tela, utiliza-se o mesmo padrão de identificação por cor, com o verde indicando que existe área

navegável e o vermelho usado para indicar a não existência de área navegável, tendo o centro do robô como referencial.

Figura 80 - tela do sistema supervisor, com os campos contendo as informações referentes a cada parte da combinação das câmeras



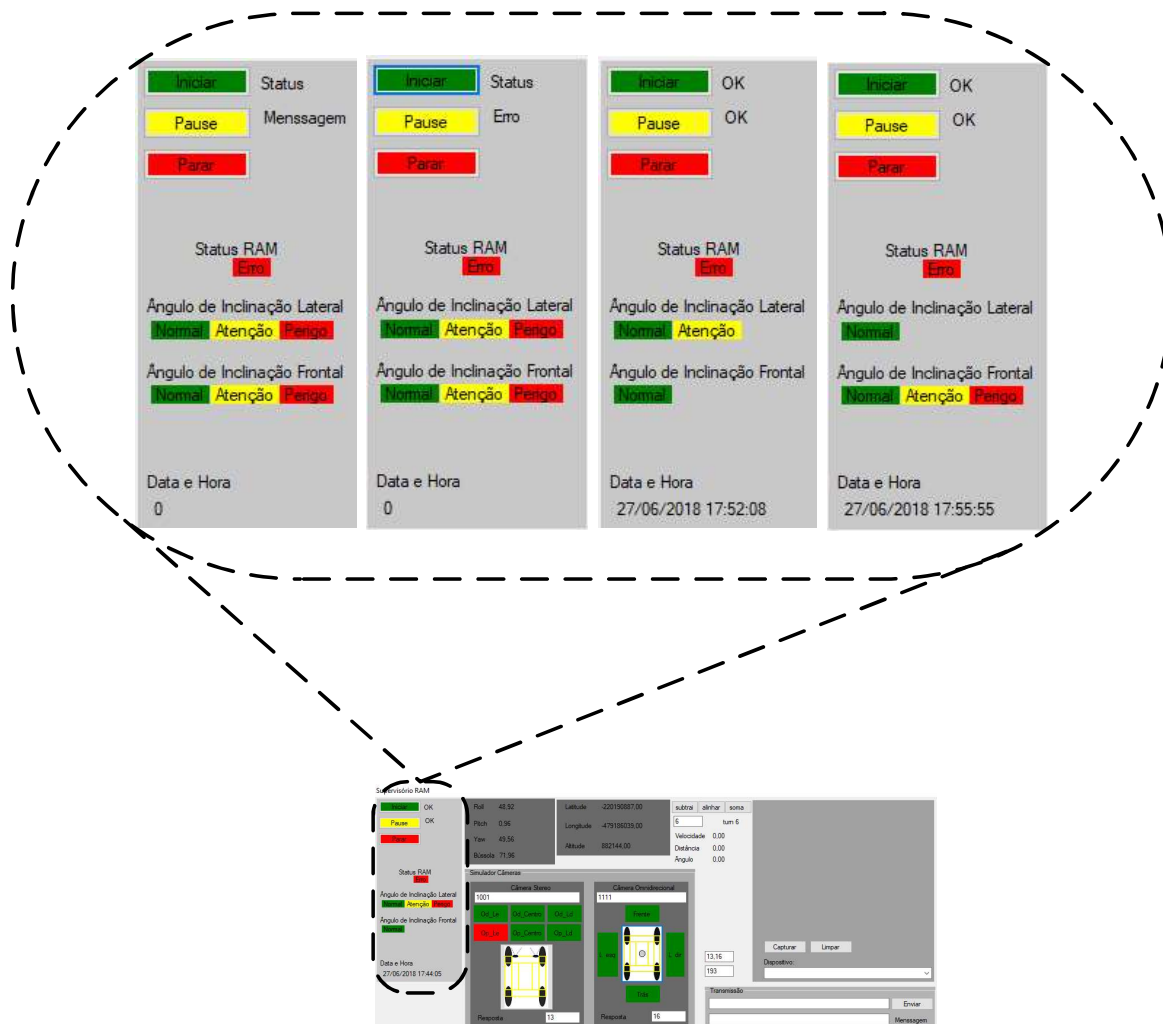
Fonte: Próprio autor

O módulo de lista de falhas trabalha basicamente com os dados fornecidos pelo controle de baixo nível e a análise operacional de risco de tombamento lateral ou frontal com base nos ângulos de Euler (IMU), devido ao bom resultado obtido pela fusão de dados do acelerômetro com o giroscópio, com o filtro de Kalman estendido. Também pelo fato dessa aplicação admitir uma variação relativamente grande, os dados são utilizados de forma direta, sem passar por outros filtros. O resultado obtido pelo módulo lista de falhas, empregando blocos comparadores descritos no capítulo anterior, teve um excelente desempenho durante os testes atendendo aos requisitos necessários definidos para compor o Sistema de Controle e Supervisão.

Na IHM as funções do módulo, lista de falhas e sua interação com o usuário se encontram em um retângulo localizado à direita da tela, que possui três botões: iniciar, pausar e parar. Também conta com campos que indicam o *status* das controladoras, da comunicação, data e horário, além de informar de forma visual se o ângulo de inclinação da plataforma está

ou não a colocando em risco operacional. Uma imagem da IHM com quatro possíveis situações relacionadas à lista de falhas no sistema é mostrada na Figura 81.

Figura 81 - Lista de falhas tela do sistema de supervisão e controle do RAM



Fonte: Próprio autor

No canto superior pode se observar a existência de três botões, cada um deles com uma função distinta. O botão iniciar, de cor verde, inicializa o programa, estabelece a comunicação com o controle de baixo nível e com os sensores. Ambas as comunicações são realizadas com protocolo de comunicação USB. Realizada a inicialização são atualizadas as informações dos status, dos ângulos de inclinação, e no rodapé aparece a hora e a data atual.

O botão pausar, amarelo, tem, como função única, pausar a leitura de dados pelo programa do Sistema de Controle e Supervisão.

O botão parar, vermelho, para (freia) o robô de forma imediata quando acionado, e também suspende a execução do programa, interrompendo a comunicação, e obrigando o operador a reiniciar a operação.

O módulo lista de falhas, também conta com avisos escritos e cores utilizados para identificar o ângulo de inclinação que o robô está operando, além de informar ao operador sobre algum perigo iminente, quando se constata que um ângulo de inclinação chegou a um ponto crítico, e gera uma ação de controle que para o robô. Caso exista risco de acidente, até que não seja solucionado o fato gerador dessa condição, não é possível operar o robô via IHM.

5 Conclusão

O principal objetivo do presente trabalho, foi o desenvolvimento de uma arquitetura de controle e supervisão baseada em fusão de dados sensoriais, que fosse modular e que pudesse ser independente em relação à plataforma utilizada, promovendo, assim, a sua portabilidade para o uso na robótica agrícola móvel no âmbito nacional. Para tal, foi realizando um estudo detalhado sobre as fusões sensoriais que apresentavam bons resultados quando empregados na robótica agrícola, interfaces existentes e métodos de guiagem e navegação em ambientes não estruturados. Entretanto, constatou-se que para a robótica agrícola se tornar um produto comercialmente viável, questões como, por exemplo, a portabilidade de sistemas de controle e segurança operacional, devem ser melhorados.

Com base em tal lacuna existente no setor, que deve ser explorada, e com base nos conceitos adquiridos com a literatura científica, foi possível desenvolver uma proposta e estabelecer uma metodologia de trabalho para implementar essa nova concepção de um Sistema de Controle e Supervisão, cujos processos de geração de informações são individualizados, e utiliza uma combinação entre sistemas de visão computacional, que disponibilizam informações referentes ao ambiente, no qual o robô está navegando, e a partir da junção das informações, pondera situações de risco utilizadas para auxiliar na sua condução quando exposto a um ambiente não estruturado.

Outra característica importante do Sistema de Controle e Supervisão está relacionada ao fato do mesmo ser desenvolvido de forma modular, o que proporciona vantagens como, por exemplo, independência de uma plataforma específica para ser implantado, possibilidade de troca de módulos de sensoriamento com a mínima alteração do programa principal, baixo custo computacional e inovação no sentido de aperfeiçoamento da robótica agrícola nacional, desenvolvendo uma camada intermediária, um *middleware*, que atua com certo grau de autonomia em relação à segurança operacional durante a condução do robô e integra o controle de baixo nível com aplicações de gerenciamento ou de alto nível.

Nesse contexto, no presente trabalho com o intuito de testar e validar a proposta do Sistema de Controle e Supervisão, foram realizados alguns experimentos em ambiente real em uma fazenda, onde pode ser observado o comportamento da plataforma utilizada como laboratório de desenvolvimento durante sua condução. Para ser possível realizar testes de uma

aplicação real e gerar um histórico de dados em relação ao seu comportamento durante sua trajetória e realizando manobras, o robô foi operado manualmente, utilizando a IHM desenvolvida e implementada do Sistema de Controle e Supervisão.

O presente trabalho obteve o resultado esperado fazendo com que o RAM percorresse um caminho em ambiente agrícola, executando manobras pré-estabelecidas, saindo de um marco inicial e indo até um ponto determinado após cumprir uma rotina estabelecida, utilizando a metodologia empregada nessa tese, a qual permitiu viabilizar o desenvolvimento uma arquitetura de um Sistema de Controle e Supervisão, independente de uma plataforma específica, que com características modulares no sentido de gerar informação para o sistema, proporcionando integração entre sistemas de sensoriamento e sistemas de visão computacional, ambos fornecendo dados que passam por um processo de ponderação e estabelecimento de prioridades para auxiliar na condução de um robô agrícola móvel. Foi desenvolvida também uma IHM que promove a interação entre máquina e operador, e foram realizadas melhorias na estrutura física do RAM, deixando-o funcional e disponível para a implementação dos diferentes sistemas utilizados para navegação e equipamentos embarcados que são empregados na agricultura de precisão.

5.1 Trabalhos Futuros

O presente trabalho apresentou um avanço significativo nas pesquisas envolvendo a robótica agrícola móvel, desenvolvendo um Sistema de Controle e Supervisão baseado em fusão de dados sensoriais aplicado a robótica móvel agrícola, promovendo inovação nesse setor em particular. Entre as perspectivas futuras, espera-se 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, por exemplo, navegação autônoma, entre outras aplicações específicas do setor agrícola.

Referências

ADAMIDES, G.; KATSANOS, C.; PARMET, Y.; CHRISTOU, G.; XENOS, M.; HADZILACOS, T.; EDAN, Y. HRI usability evaluation of interaction modes for a teleoperated agricultural robotic sprayer, *Applied Ergonomics*, ELSEVIER, 2017, p. 237-246.

ANDERSON, R.; BEVLY, D. M. Using GPS with a model-based estimator to estimate critical vehicle states. In: *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. Vol.48, N.12, 2010, p.1413–1438.

ANDREEV, V. P; KIRSANOV, K. B.; PLETENEV, P. F.; PODURAEV, YU. V.; PRYANICHNIKOV, V. E.; PRYSEV, E. A. Technology Supervisory Control for Mechatronic Devices via the Internet In: *25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, DAAAM,Vienna, 2014. p. 33–40

APPALA T.; GHOSAL, A. A mobile robot with a two-degree-of-freedom suspension for traversing uneven terrain with minimal slip: Modeling, simulation and experiments, *Mechanism and Machine Theory*, ELSEVIER, 2015, p. 83-97.

ÅSTRAND, B.; BAERVELDT, A.-J. An Agricultural Mobile Robot with Vision-Based Perception for 737 Mechanical Weed Control. *Autonomous Robots*, v.13, n.1, p.21-35. 2002.

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 ness an in print of Elsevier, Great Britain, 2003. p. 298.

BAK, T.; JAKOBSEN, H. Agricultural Robotic Platform with Four Wheel Steering for Weed Detection. *739 Biosystems Engineering*, v.87, n.2, p.125-136. 2004.

BAKKER, T. An Autonomous Robot for Weed Control. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands 2009. 138 p.

BAKKER, T.; ASSELT, K. V.; BONTSEMA, J.; MULLER, J.; STRATEN, G.V. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field, bio systems engineering, ELSEVIER, 2011, Vol. 109, p. 357-368.

BASHIRI, B.; MANN, D. D. Automation and the situation awareness of drivers in agricultural semi-autonomous vehicles, bio systems engineering, ELSEVIER, 2014, p. 8 - 15.

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

BECHAR, A.; VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems, biosystems engineering, ELSEVIER, 2017, p. 110 - 128.

BECHAR, A., & VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. In: Biosystems Engineering, 149, 2016, p. 94-111.

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

BLACKMORE, B. S.; HAVE, H.; FOUNTAS, S. A specification of behavioral requirements for an autonomous tractor. Presented at the 6th international symposium on fruit, nut and vegetable production engineering conference, Potsdam, Germany; 11–14 September 2001.

BLACKMORE, S.; HAVE, H.; KELLER, B.; FOUNTAS, S.; NIELSEN, H.; THEILBY, F. Autonomous weeders for Christmas tree plantations - a feasibility study. D.E.P. Agency: Danish Environmental Protection Agency. Pesticides Research Nr. 59 2002: 88 p. 2002

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

CAI, J.; LI, L. Autonomous Navigation Strategy in Mobile Robot. JOURNAL OF COMPUTERS, 2013. Vol. 8, N. 8, p. 2118–2125

CARDEIRA, B. M. S. C. Arquiteturas para Navegação Inercial/GPS com Aplicação a Veículos Autónomos. Dissertação de Mestrado Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009. p. 171.

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

CHEEIN, F. A. A.; CARELLI, R. Agricultural Robotics *Unmanned Robotic Service Units in Agricultural Tasks*. in: IEEE industrial electronics magazine , 2013 p. 48-58.

CHINAG, C. H.; DING, C. Robot Navigation in Dynamic Environments using Fuzzy Logic and Trajectory Prediction Table In: International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY2014), 2014. p. 99–104

CONTENTE, O.; LAU, N.; MORGADO, F.; MORAIS, R. Vineyard Skeletonization for Autonomous Robot Navigation, In: International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, 2015. p. 50 – 55.

COULTER, R. C.; “Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm” Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-92- 01, 1992.

CRESTANI, D.; GODARY-DEJEAN, K.; LAPIERRE, L. Enhancing fault tolerance of autonomous mobile robots, Robotics and Autonomous Systems, ELSEVIER, N.68, 2015, p. 140-155.

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

DUONG, D. Q.; SUN, J.; NGUYEN, T. P.; LUO, L. Attitude Estimation by Using MEMS IMU with Fuzzy Tuned Complementary Filter. In: International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Harbin, China, 2016.

DURMUŞ, H.; GÜNEŞ, E. O.; KIRCI, M.; ÜSTÜNDAĞ, B. B. The Design of General Purpose Autonomous Agricultural Mobile-Robot: “AGROBOT” In: The Fourth International Conference on Agro-Geo informatics, Istanbul, Turkey, 2015.

EMMI, L., GONZÁLEZ-DE-SOTO, M., PAJARES, G., GONZÁLEZ-DE-SANTOS, P., Integrating sensory/actuation systems in agricultural vehicles. *Sensors* 14 (3),4014–4049. 2014.

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, Vol. 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.

GAN, H.; LEE, W. S. Development of a Navigation System for a Smart Farm. In: IFAC (International Federation of Automatic Control) Papers OnLine, 2018, p. 51-17.

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

GONZÁLEZ, R.; FIACCHINI, M.; GUZMÁN, J. L.; ÁLAMO, T.; RODRÍGUEZ, F. Robust tube-based predictive control for mobile robots in off-road conditions, *Robotics and Autonomous Systems*, ELSEVIER, 2011, N.59, p. 711-726.

GRAY, K. Obstacle detection sensor technology. In: Proceedings of the ASAE conference in automation technology for off-road equipment, Chicago, Illinois, USA; July 26–27, 2002. p. 442–450.

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.

HAGUE, T.; MARCHANT, J. A.; TILLET, N. D. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles. *Comput Electron Agric*. Vol. 25, 2000, p 11–28.

HAY, C. Wheel-Speed Dead Reckoning for Vehicle Navigation. *GPS World*. 2005, p. 374.

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.

INGRAND F., GHALLAB, M. Deliberation for autonomous robots: A survey, LAAS-CNRS, University of Toulouse, France, ELSEVIER, 2014, p. 35.

ISHIBASHI, M; LIDA, M; SUGURI, M; MASUDA, R. Remote Monitoring of Agricultural Robot using Web Application. In: 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post Harvest Industry, Espoo, Finland, 2013.

JIAO, J.; ZHANG, Y.; SUN, L.; QIAO, Y.; KONG, W.; YUAN, C. A Sliding Parameter Estimation Method Based On UKF For Agricultural Tracked Robot, In: 2ndInternational Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2014), 2014. p. 277 – 282.

JØRGENSEN, R.N.; SØRENSEN, C.G.; JENSEN, K.; SØGAARD, H.T.; PEDERSEN, J.M.; SØRENSEN, L.B.; 764 HAVN, I.; SIBBESEN, S.; NIELSEN, J. Hortibot: An Accessory Kit Transforming a Slope Mower into a 765 Robotic Tool Carrier for High-Tech Plant Nursing - Part I. 2006 ASABE Annual International 766 Meeting. Portland, Oregon. 9 - 12 July, 2006. 1-12 p.

KADMIRY, B. Fuzzy Gain Scheduled EKF for Model-Based Skid-Steered Mobile Robot, In: Proceedings of the 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications, Queenstown, New Zealand, 2015.

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.

KAYACAN, E.; KAYACAN, E.; RAMON, H.; KAYNAK, O.; SAEYS, W. Towards Agrobots: Trajectory Control of an Autonomous Tractor Using Type-2 Fuzzy Logic Controllers, In: IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, Vol. 20.N.1, 2015, p 287 – 298.

KEICHER, R.; SEUFERT, H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. In: Comput Electron Agric. Vol. 25, 2000, p. 169–94.

KIM, P. Kalman Filter for Beginners with MATLAB Exemples Guia do Usuário. Korea. ed. A-jin, 2011. p. 233.

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.

KOBAYASHI, F.; TANABE, Y.; FUKUDA, T.; KOJIMA, F. Acquisition of Sensor Fusion Rule Based on Environmental Condition in Sensor Fusion System, In: IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference. Joint 9th, Vol. 4, 2001, p. 2096 – 2101.

KORTENBRUCK, D.; GRIEPENTROG, H. W.; PARAFOROS, D. S. Machine operation profiles generated from ISO 11783 communication data, Computers and Electronics in Agriculture, ELSEVIER, 2017, p. 227-236

LAKHOUA, M. N. Application of functional analysis on a SCADA system of a thermal power plant, In: 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.

LUNENFELD, H. Human factor considerations of motorist navigation and information systems Vehicle Navigation and Information Systems Conference. Toronto, Canada. p 35 - 42.

LUO, C.; GAO, J.; LI, X.; MO, H.; JIANG, Q. Sensor-based Autonomous Robot Navigation

Under Unknown Environments with Grid Map Representation, In: Swarm Intelligence (SIS), 2014 IEEE Symposium, 2014, P. 7

MAHADHIR, K. A., TAN, S. C., LOW, C. Y., DUMITRESCU, R., AMIN A. T. M., JAFFAR A. Terrain classification for track-driven agricultural robots, 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering, ELSEVIER, 2014, p. 775-782.

MADGWICK, S. O. H.; HARRISON, A. J. L.; VAIDYANATHAN, R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm, IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics Rehab Week Zurich, ETH Zurich Science City, Switzerland, June 29 - July 1, 2011

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 son industry applications, Vol. 33, N. 5, 1997.

MARIAPPAN, M.; WEE, C. C.; VELLIAN, K. ;WENG, C. K.. A Navigation Methodology of an Holonomic Mobile Robot Using Optical Tracking Device (OTD). In: TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference, 2009. p 1-6

MATTHIES, L. Dynamic estéreo vision, Tese de Doutorado - Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 1989.

MEJNERTSEN, A.; RESKE-NIELSEN, A. Control of Autonomous Tractor. Department of Automation, 771 Technical University of Denmark, Ørsted, 2006. 101 p

MILIĆ, L. Multirate Filtering for Digital Signal Processing: MATLAB Applications, Information Science Reference, NY, USA, 2009.

MIZUSHIMA, A.; NOGUCHI, N.; ISHII, K.; TERAOKA, H. Automatic navigation of the agricultural vehicle by the geomagnetic direction sensor and gyroscope. In: Proc Autom Technol Off-Road Equip ASAE. 2002, Vol. 204, N. 11.

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

MOUSAZADEH, H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles, Journal of Terra mechanics, ELSEVIER, 2013, N. 50, p. 211 - 232.

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.

MURAKAMI, N.; ITOA, A.; WILL, J. D. ; STEFFEN, M.; INOUE, K.; KITA, K.; MIYAURA, S. Development of a teleoperation system for agricultural vehicles. Computers and Electronics in Agriculture, ELSEVIER, N. 63, 2008, p. 81-88.

NAGASAKA, Y.; UMEDA, N.; KANETAI, Y.; TANIWAKI, K.; SASAKI, Y. Autonomous guidance for rice 780 transplanting using global positioning and gyroscopes. computers and electronics in agriculture, 781 v.43, n.3, p.223-234. 2004.

NIELSEN, S. H.; JENSEN, K.; BØGILD, A.; JØRGENSEN, O. J.; JACOBSEN, N. J.; JÆGER, C. L. D.; JØRGENSEN, R. N. A Low Cost, Modular Robotics Tool Carrier For Precision Agriculture Research. In: 11th International Conference on Precision Agriculture International Society of Precision Agriculture, 2012.

NIKKILÄ, R.; SEILONEN, I.; KOSKINEN, K. Software architecture for farm management information systems in precision agriculture, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 70, Issue 2, 2010, p. 328-336, ISSN 0161699,10.1016/j.compag.2009.08.013.

NOF, S. Y.; CHENG, G. J.; WEINER, A. M.; CHEN, X. W.; BECHAR, A.; JONES, M. G. Laser and photonic systems Integration: Emerging innovations and framework for research and education. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 23(6), 2013, p. 483-516.

OKSANEN, T.; LINKOLEHTO, R.; SEILONEN, I. Adapting an industrial automation protocol to remote monitoring of mobile agricultural machinery: a combine harvester with IoT. In: *IFAC (International Federation of Automatic Control) Papers OnLine*, 2016, p. 127-131.

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, Vol. 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.

PHILLIPS, M.; LIKHACHEV, M. “Sipp: Safe interval path planning for dynamic environments,” in *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 5628-5635, 2011.

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.

RAJA, P.; PUGAZHENTHI, S. Path planning for a mobile robot in dynamic environments, *International Journal of the Physical Sciences*, 2011. Vol. 6, N. 20, pp. 4721-4731

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

REID, J. F. Mobile intelligent equipment for off-road environments. In: *Proceedings of the ASAE conference*. Kyoto, Japan; 7–8 October, 2004.

REIS, G. L.; ABDALLA JR., M. A.; NOLASCO, J. D.; SOUZA, L. F. F.; BARROSO, M. F. S.; PEREIRA, E. B. Controle de posição de um manipulador robótico utilizando sensores inerciais e eletromiografia, In: *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*. Belo Horizonte, Brasil, 2014.

REZAEI, R.; SENGUPTA, R. Kalman Filter Based Integration of DGPS and Vehicle Sensors for Localization, In: *IEEE. Conference on Mechatronics and Automation*. Ontario, Canada, 2005.

RODRIGUES, V. A. Análise De Regiões Em Cenários Agrícolas Utilizando Um Sistema De Visão Catadióptrico. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus São José do Rio Preto, São José do Rio Preto, 2014. p. 151.

RONKAINEN, A. Design considerations for ISOBUS class 3 machinery system’s human-machine interaction. In: *4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post Harvest Industry*, Espoo, Finland, 2013.

ROVIRA-MÁS, F.; ZHANG, Q.; HANSEN, A.C. *Mechatronics and Intelligent Systems for Off-Road Vehicles*. Springer, London, 2010, p. 68–71.

ROVIRA-MÁS, F.; CHATTERJEE, I.; SÁIZ-RUBIO, V. The role of GNSS in the navigation strategies of cost-effective agricultural robots, *Computers and Electronics in Agriculture*, ELSEVIER, N.112, 2015, p. 172-183.

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*.

SABATELLI, S.; GALGANI, M.; FANUCC, L.; ROCCHI, A. A double stage Kalman filter for sensor fusion and orientation tracking in 9D IM. Dept. of Information Engineering, University of Pisa, Pisa, Italy. 2012 IEEE.

SAEALAL, M. S.; DERAWI, D.; SALIM, N. D.; TUMARI, M. Z. M. Real-Time nonlinear complementary filter on SO (3) for attitude estimation of Small-scale aerial robot. In: *International Conference on Vision, Image and Signal Processing*, 2017. pp 109-113.

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

SAMMARCO, V. D.; TORRES, C. J.; TRONCO, M. L.; PEDRINO, E. C.; TIBERTI, A. J.; VALÊNCIO, C. R.; ARCHILA, J. F. Modelagem e Projeto dos Sistemas de Controle de Tração e Esterçamento da Plataforma Robótica Agrícola Móvel RAM. In: *Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Salvador, Brasil, 2018.

SAMUEL, J. O.; TANG, L.; ABPLANALP, P. GPS-Guided Modular Design Mobile Robot Platform for Agricultural Applications In: *Seventh International Conference on Sensing Technology*, Wellington, New Zealand, 2013.

SANTANA, D. D. S. Navegação Terrestre Usando Unidade de Medição Inercial de Baixo Desempenho e Fusão Sensorial Com Filtro de Kalman Adaptativo Suavizado. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. p. 230.

SANTIAGO, A. M.; ANZUETO, J. L. C.; FEIJOO, J. A. V.; LEÓN, H. R. H.; GRAJALES, R. M. Neural Control System in Obstacle Avoidance in Mobile Robots Using Ultrasonic Sensors, In: Journal of Applied Research and Technology, 2014, Vol. 12, p. 104 – 110.

SAVAGE. Suportive autonomous vehicle for agriculture. Disponível em: <<http://www.savage.gr/about.html>> Acesso em: 18/05/2015.

SBG SYSTEMS. *Datasheet* IG500-N. Disponível em: <<http://www.sbg-systems.com>> Acesso em: 20/07/2018.

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

SELLMANN, F.; BANGERT, W.; GRZONKA, S.; HÄNSEL, M.; HAUG, S.; KIELHORN, A.; MICHAELS, A.; MÖLLER, K.; RAHE, F.; STROTHMANN, W.; TRAUTZ, D.; RUCKELSHAUSEN, A. RemoteFarming.1: Human-machine interaction for a field-robot-based weed control application in organic farming In: 4th International Conference on Machine Control & Guidance, 2014. P. 7.

SENNI, A.; TRONCO, M. L. Projeto de Hardware Dedicado para Processamento de Imagens em Aplicação de Navegação Autônoma de Robôs Móveis Agrícolas In: 9º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2016, Fortaleza - CE. CONEM, 2016 (em processo de avaliação)

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

SILVA, L. G. D. Navegação de Robôs Autônomos utilizando Visão Computacional. Dissertação de Mestrado Universidade de São Paulo “EESC-USP”, São Carlos - SP, 2018. p.

SILVA, L. L. Classificação e caracterização de ambientes para navegação de robôs móveis baseada em mapas. Dissertação de Mestrado Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita”, São José do Rio Preto, 2008. p. 83.

SHARIFI, M.; CHEN, X. A Novel Vision Based Row Guidance Approach for Navigation of Agricultural Mobile Robots in Orchards, In: 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications, 2015. p. 251 –255

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. 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.

SUN, L.; LUO, Y.; X. DING, X.; WU, L. Path planning and obstacle avoidance for mobile robots in a dynamic environment, *The Open Automation and Control Systems Journal*, 2014. Vol. 6, p. 77-83

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*, 2011. Vol.31, N.1, p.130-142.

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.

TAKAI, R.; BARAWID, O.; NOGUCHI, N. Autonomous Navigation System of Crawler-Type Robot Tractor In: *Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy*, 2011.

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 Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2011, São João Del Rei. Anais do SBAI 2011.

TORII T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan. *Comput Electron Agric.* 2000, Vol. 25, p.133–53.

TORRES, C. J.; ARCHILA, J. F.; BECKER, M.; TRONCO, M. L.; TIBERTI, A. J.; PORTO, A. J. V. Cinemática direta 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

TORRES, C. J. Arquitetura Supervisória Aplicável na Robótica Agrícola Móvel. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. p. 146.

TRENTINI, V. B. Navegação Autônoma em Ambientes Agrícolas Utilizando Visão Estéreo. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Bauru, Bauru, 2014. p. 75.

TRIPATHI, P.; SINGH, H.; NAGLA, K.S.; MAHAJAN, S. Occupancy Grid Mapping for Mobile Robot using Sensor Fusion, In: Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT), 2014 International Conference on, 2014, p. 47 – 51.

TRONCO, M. L. Segmentação de Cenas Agrícolas – uma contribuição à geração de parâmetros para uso em Sistema de Multiprojeção Imersivo. Tese de Livre Docência – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

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, Vol. 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.

VOUGIOUKAS S, FOUNTAS S, BLACKMORE S, TANG L. Combining reactive and deterministic behaviours for mobile agricultural robots. *International Journal Operational Research*, p.153–63, 2005.

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

Wheeler, W. A.; Lee, J. D.; Raby, M.; Kinghom, R. A.; Bittner, A. C.; Mccallum, M. C. Development of human factors guidelines for advanced traveler information systems (ATIS) and commercial vehicle operations (CVO): Display formats and commercial vehicle operator (CVO) workload. Washington, DC: Federal Highway Administration. FHWAeRDe95e176.

WANG, L.; YANG, S. X.; BIGLARBEKIAN, M. "A fuzzy logic based bio-inspired system for mobile robot navigation," Proc. of IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, p. 219-224, 2012.

WANG, W.; HSU, T; WU, T; The Improved Pure Pursuit Algorithm for Autonomous Driving Advanced System, IEEE 10th International Workshop on Computational Intelligence and Applications November 11-12, 2017, Hiroshima, Japan

Wu, Z.; Feng, L. "Obstacle prediction-based dynamic path planning for a mobile robot," International Journal of Advancements in Computing Technology, vol. 4, no. 3, p. 118-124, 2012.

XIANG, L. & QUN, L. External Acceleration Elimination for Complementary Attitude Filter, In: International Conference on Information and Automation (ICIA), Macau, China, 2017. p. 208 –212.

YANG, C. L.; NOGUCHI, N. Development of a Human-driven tractor following a Robot System In: Preprints of the 19th World Congress the International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa, 2014.

YOO, T. S.; A; HONG, S. K.; YOON, H. M.; PARK, S. Gain-Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System, Sensors, Vol. 11, 29 March 2011, p. 3816-3830. ISSN 1424-8220, doi:10.3390/s110403816.

Anexos

Anexo 1:

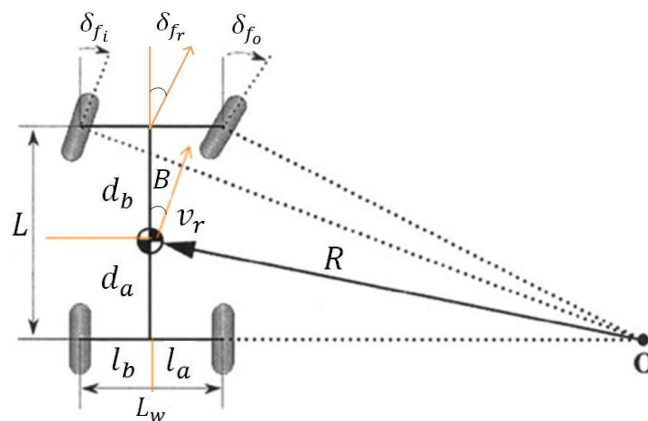
Figura 82, onde é possível observar a representação e a simbologia referente a cada parâmetro empregado nos cálculos. Para a formulação do problema define-se uma plataforma simétrica, a qual tem seu peso dividido, de forma a manter o centro de massa exatamente em seu centro geométrico. Dessa forma, pode-se considerar as seguintes relações referentes ao comprimento e a largura da plataforma:

$$L = d_a + d_b \quad (5.4.1)$$

$$L_w = l_a + l_b \quad (5.4.2)$$

Na Figura 82, ainda pode ser visto um parâmetro R , o qual representa o raio de curvatura a partir de um ponto de origem (O), alinhado com o eixo traseiro do robô. Os ângulos de esterçamento das rodas são representados por: δ_{f_o} e δ_{f_i} e a velocidade de rotação do robô por: v_r . Além dos pontos citados, existem ainda mais dois pontos de referência: o ângulo de rotação do centro de massa do robô, que é representado por B , e o ângulo de deslocamento frontal do robô em relação a uma reta perpendicular ao seu eixo dianteiro, que é representado por δ_{f_r} .

Figura 82 - Geometria de Ackermann



Fonte: Adaptado de Rajamani (2006)

O modelo cinemático proposto para o RAM utiliza seus parâmetros físicos e suas dimensões gerais para elaborar as equações referentes às cinemáticas direta e inversa. Fator também considerado para definição da velocidade angular de cada roda, o qual é fundamental para definir o diferencial de velocidade das rodas durante a execução de uma curva, devido à não existência de um diferencial mecânico no RAM. As equações da cinemática inversa e as da direta são mostradas a seguir, ambas adotando um valor para R como referencial:

$$(l_a + r_{r_i})^2 = R^2 - d_a^2 \quad (5.4.3)$$

$$r_{r_i} = \sqrt{R^2 + d_a^2} - l_a \quad (5.4.4)$$

$$B = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{l_a + r_{r_i}}{d_a} \right) \quad (5.4.5)$$

$$B = \cot^{-1} \left(\frac{l_a + r_{r_i}}{d_a} \right) \quad (5.4.6)$$

$$B = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left(\frac{d_a}{R} \right) \quad (5.4.7)$$

$$r_{r_o} = r_{r_i} + l_a + l_b \quad (5.4.8)$$

$$r_{f_i} = \sqrt{r_{r_i}^2 + (d_a + d_b)^2} \quad (5.4.9)$$

$$r_{f_o} = \sqrt{(r_{r_i} + l_a + l_b)^2 + (d_a + d_b)^2} \quad (5.4.10)$$

$$\delta_{f_i} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_{r_i}}{d_a + d_b} \right) \quad (5.4.11)$$

$$\delta_{f_o} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_{r_i} + l_a + l_b}{d_a + d_b} \right) \quad (5.4.12)$$

$$\delta_{f_r} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_{r_i} + l_a}{d_a + d_b} \right) \quad (5.4.13)$$

Equações da cinemática direta:

$$\dot{\xi}_r = R(\theta) \cdot \dot{\xi} \quad (5.4.14)$$

$$\dot{\xi} = \{ \dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta} \}^T \quad (5.4.15)$$

$$\dot{\xi}_r = \{ \dot{x}_r \quad \dot{y}_r \quad \dot{\theta}_r \}^T \quad (5.4.16)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} c\theta & s\theta & 0 \\ -s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4.17)$$

$$\dot{\xi} = R(\theta)^{-1} \cdot \dot{\xi}_r \quad (5.4.18)$$

$$R(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4.19)$$

$$\dot{\xi}_r = \{ v_r c_\beta \quad -v_r s_\beta \quad \dot{\beta} \}^T \quad (5.4.20)$$

$$v_r c_\beta = \omega_{r_i} \cdot r_\omega \quad (5.4.21)$$

$$-v_r s_\beta = \frac{\omega_{r_i} \cdot r_\omega \cdot d_a}{\sqrt{R^2 - d_a^2 - l_a}} \quad (5.4.22)$$

$$\dot{\beta} = \frac{\omega_{r_i} \cdot r_\omega}{\sqrt{R^2 - d_a^2 - l_a}} \quad (5.4.23)$$

O modelo utilizado pelo controle de baixo nível para o controle de esterçamento e trajetória usa as equações matemáticas da cinemática inversa, atribuindo um valor para R em metros e adotando o centro de gravidade do robô como referência. Obtém-se como resultado os ângulos de esterçamento das rodas δ_{f_i} e δ_{f_o} e o ângulo de orientação do robô B .

Devido à trajetória percorrida pelo robô em uma curva e ao ângulo formado entre as rodas e o centro de rotação, se faz necessária a existência de um diferencial de velocidade entre cada uma das rodas, diminuindo assim, a tendência de ocorrer o fenômeno conhecido como *Wheel Slip*. Esse diferencial é realizado pelo controle individual de rotação dos motores de tração das rodas do robô, com os valores definidos por meio da aplicação das equações: 5.4.22 a 5.4.25, as quais definem as velocidades angulares relativas de cada roda, e estão representadas da seguinte maneira: 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:

$$\omega_{r_i} = \frac{r_{r_i}}{r_{\omega}} \chi \frac{v}{R} \quad (5.4.22)$$

$$\omega_{r_o} = \frac{r_{r_o}}{r_{\omega}} \chi \frac{v}{R} \quad (5.4.23)$$

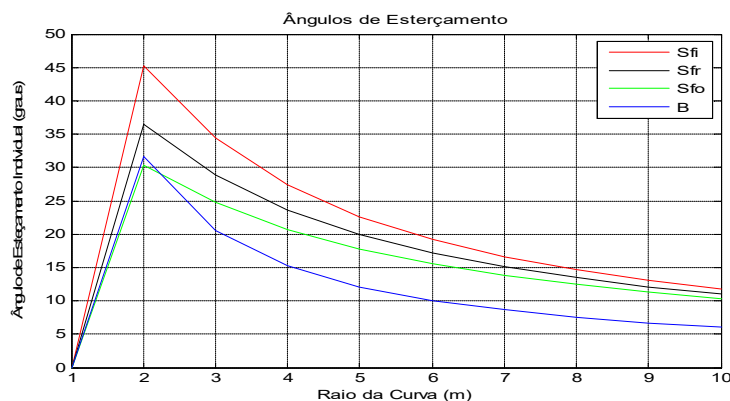
$$\omega_{f_i} = \frac{r_{f_i}}{r_{\omega}} \chi \frac{v}{R} \quad (5.4.24)$$

$$\omega_{f_o} = \frac{r_{f_o}}{r_{\omega}} \chi \frac{v}{R} \quad (5.4.25)$$

Ackerman – Resultados

O robô agrícola móvel RAM, é utilizado como plataforma experimental para o desenvolvimento do Sistema de Controle e Supervisão, tem como característica o esterçamento das duas rodas frontais para realizar manobras, e emprega o modelo da geometria de Ackerman, método que só é considerado eficaz devido à baixa velocidade operacional do RAM. O modelo adotado para o presente trabalho utiliza as equações descritas no Capítulo 3, e os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo, que estima o comportamento da variação angular que ocorre nas rodas dianteiras, alterando o valor de R , o qual representa o raio da curva desejada, e os valores dos ângulos B e δ_{f_r} do robô podem ser vistos na Figura 83.

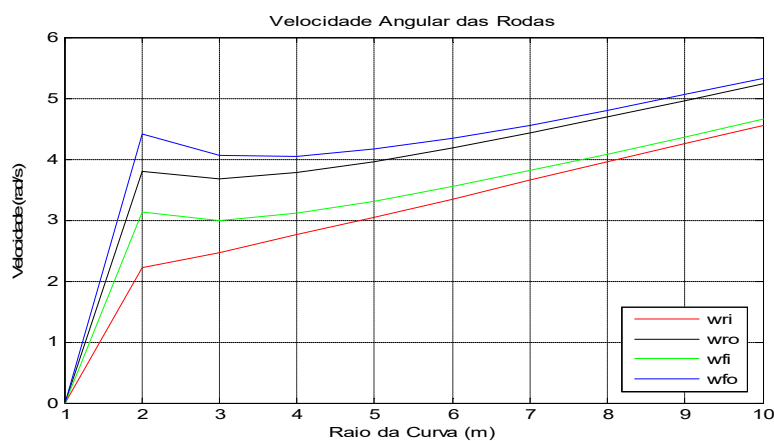
Figura 83 - Comportamento angular das rodas em relação à variação de (R)



Fonte: Adaptado de Torres (2014)

Uma simulação representando a diferença de velocidade das rodas, baseada nas mesmas condições estabelecidas para a simulação da Figura 83, utilizando a geometria de Ackerman e utilizando o *software Matlab* pode ser vista na Figura 84, onde é possível analisar a variação da velocidade existente em cada uma das rodas em relação ao raio da curva (R).

Figura 84 - Diferencial de velocidade das rodas do RAM



Fonte: Adaptado de Torres (2014)

Os resultados obtidos com base na aplicação das equações do modelo de Ackerman são utilizados pelo Sistema de Controle e Supervisão para, juntamente com o controle de baixo nível, realizar a condução da plataforma RAM.