RUBENS ANDRE TABILE

Desenvolvimento de uma plataforma robótica modular e multifuncional para aquisição de dados em agricultura de precisão.

**São Carlos
2012**

RUBENS ANDRE TABILE

Desenvolvimento de uma plataforma robótica modular e multifuncional para aquisição de dados em agricultura de precisão.

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

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Manufatura

Orientador: Prof. Tit. Arthur José Vieira Porto

Este exemplar trata-se da versão corrigida. A versão original encontra-se disponível junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da EESC - USP

**São Carlos
2012**

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

Tabile, Rubens Andre
T114d Desenvolvimento de uma plataforma robótica modular
e multifuncional para aquisição de dados em agricultura de
precisão. / Rubens Andre Tabile ; orientador Arthur José Vieira
Porto. São Carlos, 2012.

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, 2012.

1. Sensoriamento remoto. 2. Automação de máquinas
agrícolas. 3. Robô agrícola móvel. 4. Robótica. 5. ISOBUS.
Sistemas de controle. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RUBENS ANDRÉ TABILE**.

Título da tese: "Desenvolvimento de uma plataforma robótica modular e multifuncional para aquisição de dados em agricultura de precisão".

Data da defesa: 01/03/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Arthur José Vieira Porto (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Dr. Ricardo Yassushi Inamasu
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA-São Carlos)

Aprovado

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

APROVADO

Dr. João de Mendonça Naime
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA-São Carlos)

Aprovado

Prof. Associado **José Paulo Molin**
(Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ)

Aprovado

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

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

A meus pais: *Valdemar Tabile e Joacir Richetti Tabile*

A meus irmãos: *Rafael Augusto Tabile e Robson Adriel Tabile*

Pelo amor, carinho, incentivo e confiança

Dedico

A meu eterno amigo: *Douglas De Maman (in memoriam).*

Pois um amigo nunca morre.

Ofereço e Homenageio

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Arthur José Vieira Porto pela oportunidade oferecida para realização deste doutoramento, dedicada orientação e acima de tudo amizade.

Ao Professor Ricardo Yassushi Inamasu pela co-orientação, e apoio nas tarefas que envolveram essa pesquisa além da amizade.

A todos os demais professores, funcionários e amigos do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, em especial aos do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Automação e Simulação, pela convivência e colaboração.

Ao Professor Lie Tang membro do Department of Agricultural and Biosystems Engineering da Iowa State University e ao Professor Lei Tian membro do Agricultural and Biological Engineering Department da University of Illinois at Urbana-Champaign pela oportunidade e aprendizagem durante a realização do estágio de doutorado no exterior.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da Bolsa de Doutorado, ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela Bolsa no Exterior, a FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos pelo apoio financeiro junto ao projeto Agribot (convênio 01.09.0233.00) e a Jacto Máquinas Agrícolas S/A pelo apoio financeiro junto ao projeto Agribot.

Aos amigos, em especial a Eduardo Godoy, Robson Pereira, Fernando Scorzoni, Bruno Bragato, Welington Lopes, Luciano Lulio, Giovana Tangerino, Ancelmo Pitombeira, David Sena pela amizade e companheirismo.

As famílias Maman, Perri, Venturini, Ponciano e Portelinha.

Em especial a Francine Perri Venturini, pela amizade, cumplicidade e carinho.

RESUMO

TABILE, R.A. *Desenvolvimento de uma plataforma robótica modular e multifuncional para aquisição de dados em agricultura de precisão*. 2012. 103f. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

A Agricultura de Precisão e as práticas agrícolas que levam em consideração a proteção do meio ambiente trouxeram, com as suas evoluções, uma série de desafios para a pesquisa. A escala de amostragem e a precisão exigida por estas novas práticas agrícolas muitas vezes são maiores que as exigidas pela agricultura tradicional, elevando os custos de produção. Todo esse processo demanda um expressivo número de pesquisas em desenvolvimento de instrumentos para automação. Entre elas destaca-se a utilização de técnicas de sensoriamento remoto baseado na utilização de tecnologia de sensores *On-The-Go*, atrelado a sistemas de informação geográfica, os quais são adaptados e desenvolvidos para o uso agrícola. Com esse objetivo, a aplicação de Robôs Agrícolas Móveis é vista como forte tendência, principalmente na União Europeia, Estado Unidos e Japão. No Brasil existe a necessidade da realização de pesquisas para o desenvolvimento de plataformas robóticas, que sirvam de base para sistemas de navegação semi-autônomos e autônomos, que facilitem as operações de aquisição de dados em campo. O objetivo desse trabalho é descrever o projeto de uma plataforma experimental para aquisição de dados e para desenvolvimento de tecnologias de veículos autônomos para operar em ambientes agrícolas. A proposta é baseada em uma sistematização de trabalhos científicos evidenciando as principais metodologias e tecnologias empregadas em veículos e robôs agrícolas, que serviram como base para a construção do modelo apresentado nesse trabalho. A plataforma deve permitir a aquisição em massa de dados em campo para estudo da variabilidade espacial através de sensores e equipamentos que serão embarcados na estrutura.

Palavras chave: Automação de máquinas agrícolas, sensoriamento remoto, robô agrícola móvel, robótica, ISOBUS, Sistemas de controle.

ABSTRACT

TABILE, R.A. *Development of a modular and multifunction robotic platform for data acquisition in precision agriculture system*. 2012. 103f. PhD Thesis – Engineering School of São Carlos, University de São Paulo, São Carlos, 2012.

Precision Agriculture and agricultural practices which take into account environment protection leads to several research challenges. Sampling scale and the precision required by these new agricultural practices are often higher than those required by traditional agriculture, raising the costs of production. This whole process requests an expressive number of researches in developing automation instruments. Among them, highlights the use of remote sensing techniques based on the use of On-the-Go sensors technology, coupled to a geographic information system adapted and developed for agricultural use. Aiming this, the application of Agricultural Mobile Robots is a strong tendency, mainly in the European Union, USA and Japan. In Brazil, researches are necessary for the development of robotics platforms, serving as a basis for semi-autonomous and autonomous navigation systems, facilitating data acquisition in the field. The aim of this work is to describe the project of an experimental platform for data acquisition and for the development of autonomous vehicles technologies to operate in agricultural environments. The proposal is based on a systematization of scientific work containing the main methodologies and technologies employed in agricultural vehicles and robots, which were used as a basis for construction of the presented model. The platform shall allow acquisition of field data to study the spatial variability through sensors and equipment that will be loaded in the structure.

Keywords: Agricultural automation, remote sensing, agricultural mobile robot, robotics, ISOBUS, control systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Causa e efeito dos fatores de projeto (adaptado YAVUZ, 2007).	53
Figura 2. Visão sistêmica do robô agrícola (adaptado BLACKMORE <i>et al.</i> , 2007).	55
Figura 3. Modelo Kano (adaptado LEE & HUANG, 2009).	61
Figura 4. Veículo Autônomo para Tratamento de Culturas.	64
Figura 5. Robô Capinador.	65
Figura 6. Trator Autônomo.	67
Figura 7. Capinador Automático para “Árvores de Natal”.	68
Figura 8. Veículo Autônomo de Apoio para Agricultura.	69
Figura 9. Plataforma Autônoma e Sistema de Informação.	70
Figura 10. The Hortibot.	71
Figura 11. Robô Capinador.	73
Figura 12. Halmstad.	74
Figura 13. SOLERO e SHRIMP.	75
Figura 14. Aurora.	76
Figura 15. Robô Autônomo de Seis Rodas.	78
Figura 16. Transplantador Automático de Arroz.	79
Figura 17. Guiagem Automática.	79
Figura 18. AgRover.	81
Figura 19. Gantry.	82
Figura 20. Garoto Magro (SkinnyBoy).	83
Figura 21. Veículo Agrícola Autônomo (VAA).	84
Figura 22. Robô Agrícola Móvel (RAM).	84
Figura 23. Agricultural Robot (AGRIBOT).	85
Figura 24. Fluxograma do processo de desenvolvimento de um robô móvel.	93
Figura 25. Requisitos dos clientes e sua importância.	96
Figura 26. Parâmetros de projeto e sua importância relativa.	98
Figura 27. Vista isométrica da plataforma robótica.	102
Figura 28. Dimensões do veículo.	103
Figura 29. Chassi principal e secundário.	104
Figura 30. Sistema de regulação da bitola.	105
Figura 31. Módulo roda: esquerda – vista isométrica; direita vista frontal.	105
Figura 32. Circuito eletro-hidráulico da plataforma.	108
Figura 33. Vista geral dos principais componentes da plataforma.	108
Figura 34. Sistema de esterçamento: esquerda – vista isométrica; direita vista superior.	112

Figura 35. Sistema de suspensão.....	114
Figura 36. Chassi superior com esforços de torção.	117
Figura 37. Análise da deformação total do chassi superior sob esforços de torção.	117
Figura 38. Esquerda: análise da deformação elástica equivalente; Direita: Análise da tensão equivalente (Von-Mises).	118
Figura 39. Chassi superior em condição de rampa e inclinação lateral sem apoio de uma roda.	118
Figura 40. Deformação total da estrutura do chassi superior em condição de rampa e inclinação lateral sem apoio de uma roda.	119
Figura 41. Esquerda: análise da deformação elástica equivalente; Direita: Análise da tensão equivalente (Von-Mises).	120
Figura 42. Conjunto roda e as cargas aplicadas.	121
Figura 43. Deformação total do conjunto roda.	121
Figura 44. Esquerda: análise da deformação elástica equivalente; Direita: Análise da tensão equivalente (Von-Mises).	122
Figura 45. Sistema de coordenadas inercial e local (esquerda) e declaração das variáveis da geometria do robô (direita).....	127
Figura 46. Distribuição de massa da plataforma robótica em plano (esquerda) e inclinada (direita).	128
Figura 47. Declaração das variáveis do modelo cinemático.....	131
Figura 48. Comportamento da plataforma em função do ângulo adotado.	131
Figura 49. Ângulo de esterçamento.	133
Figura 50. Zona morta do sistema de esterçamento.	137
Figura 51. Reta entre a roda e o ICR.	138
Figura 52. Função da mecânica do solo (adaptado de WONG, 2009).	143
Figura 53. Variáveis do sistema inercial.....	144
Figura 54. Posicionamento relativo dos rodados.....	146
Figura 55. Comportamento mecânico do solo.....	149
Figura 56. Área de contato em função do tipo de solo (adaptado WONG, 2009).	153
Figura 57. Comportamento do pneu em função da pressão crítica de contato (Adaptado WONG, 2009).	154
Figura 58. Estrutura de um sistema de controle via rede (NCS).....	159
Figura 59. Rede ISO 11783 em Máquina e Implemento (Adaptado de SOUZA, 2002).	161
Figura 60. Circuito eletro-hidráulico da plataforma.	164
Figura 61. Fluxograma da estratégia de controle da NCS.....	166
Figura 62. Velocidade e aceleração da plataforma em função do tempo.	169
Figura 63. Resistência ao rolamento da plataforma para diferentes tipos de solo.....	170

Figura 64. Potência demandada da plataforma para diferentes tipos de solo.	170
Figura 65. Interface do usuário.	171
Figura 66. Trajetória simulada para a plataforma.	171
Figura 67. Raio de giro durante a simulação.	172
Figura 68. Ângulo Beta durante a simulação.	172
Figura 69. Velocidade angular durante a simulação.	173
Figura 70. Aceleração durante a simulação.	173
Figura 71. Velocidade escalar durante a simulação.	173
Figura 72. Ângulo de arfagem durante a simulação.	174
Figura 73. Ângulo de rolagem durante a simulação.	174
Figura 74. Ângulo de guinada durante a simulação.	174
Figura 75. Ângulo de esterçamento e rotação roda dianteira esquerda.	175
Figura 76. Ângulo de esterçamento e rotação roda traseira esquerda.	175
Figura 77. Ângulo de esterçamento e rotação roda traseira direita.	175
Figura 78. Ângulo de esterçamento e rotação roda dianteira direita.	176
Figura 79. Ângulo de esterçamento das rodas.	176
Figura 80. Ângulo de rotação das rodas.	177
Figura 81. Somatória das forças no eixo x.	177
Figura 82. Somatória das forças no eixo y.	178
Figura 83. Somatória das forças no eixo z.	178
Figura 84. Potência total consumida pela plataforma ao longo do tempo.	179
Figura 85. Variáveis do sistema de controle da roda dianteira direita	180
Figura 86. Variáveis do sistema de controle da roda dianteira esquerda	180
Figura 87. Variáveis do sistema de controle da traseira direita	181
Figura 88. Variáveis do sistema de controle da traseira esquerda	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Visão geral das tecnologias para detecção de doenças no campo.	41
Tabela 2. Resumo dos projetos de robôs agrícolas no mundo.....	89
Tabela 3. Lista dos requisitos funcionais e não funcionais necessários para o projeto.	94
Tabela 4. Requisitos dos clientes.....	95
Tabela 5. Parâmetros de projeto.....	97
Tabela 6. Função mobilidade e suas sub-funções relacionadas com as alternativas técnicas disponíveis.....	99
Tabela 7. Função navegação e suas sub-funções relacionadas com as alternativas técnicas disponíveis.....	100
Tabela 8. Função autonomia e suas sub-funções relacionadas com as alternativas técnicas disponíveis.....	101
Tabela 9. Massa sob os rodados.	128
Tabela 10. Parâmetros físicos de solos brasileiros típicos.	150
Tabela 11. Principais tipos de redes CAN.....	160
Tabela 12. Parâmetros do solo usado na simulação.....	169
Tabela 13. Disciplinas concluídas.	185

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

Abreviaturas

QFD	Quality Function Deploiment
4WS	<i>four-wheel steering</i>
2WS	<i>two-wheel steering</i>
CAN	Control Area Network
NCS	Network Control System
GPS	Global Positioning System
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
AP	Agricultura de precisão

Nomenclatura para estrutura mecânica

W_F	Largura frontal	[m]
W_{FL}	Distância do centro de massa até a lateral frontal esquerda do robô	[m]
W_{FR}	Distância do centro de massa até a lateral frontal direita do robô	[m]
W_B	Largura traseira	[m]
W_{BL}	Distância do centro de massa até a lateral traseira esquerda do robô	[m]
W_{BR}	Distância do centro de massa até a lateral traseira direita do robô	[m]
L	Comprimento	[m]
L_F	Distância do centro de massa até a frente do robô	[m]
L_B	Distância do centro de massa até a traseira do robô	[m]
k_i	Distância do centro de massa até o rodado	[m]
h_{CM}	Altura do centro de massa	[m]
W_i	Roda i sendo que i é igual a 1, 2, 3, 4	
m	Massa do robô	[kg]
D_W	Diâmetro do pneu	[m]

Notaces algébricas

$\vec{A}$	Vetor definido por um par ordenado (X ; Y)
$\ \vec{A}\ $	Módulo do vetor
$\vec{A} \cdot \vec{B}$	Produto vetorial
$[M_i]$	Matriz quadrada
$[M]^T$	Matriz transposta
det	Determinante da matriz

<i>if</i>	Função condicional “se”
<i>and</i>	Função lógica “e”

Nomenclatura para modelagem cinemática.

ψ	Guinada (<i>Yaw</i>)	[graus]
ϕ	Rolagem (<i>Roll</i>)	[graus]
θ	Arfagem (<i>Pitch</i>)	[graus]
$\{P\}$	Sistema de coordenadas local	
$\{I\}$	Sistema de coordenadas inercial	
$?^P$	Expoente indica que a variável está no sistema local	
$?^I$	Expoente indica que a variável está no sistema inercial	
$\mathfrak{R}_I^P$	Matriz de rotação em 3 eixos	
CM	Centro de massa (<i>center of mass</i>)	
TR_{CM}	Raio de giro do robô com referencia ao CM (<i>turning radius</i>)	[m]
$ICR^?$	Centro instantâneo de rotação (<i>instantaneun center rotation</i>)	
β	Deslocamento angular do ICR	[graus]
$X_{CM}^?$	Posição do CM do robô no eixo-x	
$Y_{CM}^?$	Posição do CM do robô no eixo-y	
$Z_{CM}^?$	Posição do CM do robô no eixo-z	
$X_{ICR}^?$	Posição do ICR do robô no eixo-x	
$Y_{ICR}^?$	Posição do ICR do robô no eixo-y	
$Z_{ICR}^?$	Posição do ICR do robô no eixo-z	
$X_{W_i}^?$	Posição da roda W_i no eixo-x	
$Y_{W_i}^?$	Posição da roda W_i no eixo-y	
$Z_{W_i}^?$	Posição da roda W_i no eixo-z	
TR_{W_i}	Raio de giro formado pelo percurso da roda W_i	[m]
ω_{CM}^P	Velocidade angular do CM	[rad/s]
v_{CM}	Velocidade escalar do CM do robô	[m/s]
ϕ^P	Deslocamento angular do centro de massa	[graus]
v_{W_i}	Velocidade escalar da roda W_i	[m/s]
Δt	Tempo do loop do sistema de controle	[s]
rot_{W_i}	Rotação da roda W_i	(RPM)
$S_X^?$	Distância percorrida pelo CM no eixo-x	[m]

$S_Y^?$	Distância percorrida pelo <i>CM</i> no eixo-y	[m]
$S_Z^?$	Distância percorrida pelo <i>CM</i> no eixo-z	[m]
γ_{W_i}	Ângulo entre os vetores da roda <i>Wi</i>	[graus]
σ_i	Variável utilizada para obtenção do ângulo de esterçamento da roda <i>Wi</i>	[graus]
γ_{error}	Correção do ângulo de esterçamento devido diferença entre as bitolas	[graus]
δ_i	Ângulo de esterçamento da roda <i>Wi</i>	[graus]

Nomenclatura para modelagem dinâmica.

ψ	Guinada (<i>Yaw</i>)	[graus]
ϕ	Rolagem (<i>Roll</i>)	[graus]
θ	Arfagem (<i>Pitch</i>)	[graus]
g	Aceleração da gravidade ($\sim 9,80665$)	[m/s ²]
F_c	Força centrífuga	[N]
F_{c_h}	Componente horizontal da força centrípeta	[kgf]
F_{c_v}	Componente vertical da força centrípeta	[kgf]
$m_{W_i}^P$	Força resultante na roda <i>Wi</i> no plano	[kgf]
$m_{W_i}^{I \rightarrow \theta}$	Alteração da força resultante na roda <i>Wi</i> devido ao ângulo de arfagem	[kgf]
$m_{W_i}^{I \rightarrow \phi}$	Alteração da força resultante na roda <i>Wi</i> devido ao ângulo de rolagem	[kgf]
$X_{W_i}^{I \rightarrow \beta}$	Distância relativa no eixo-x entre a roda <i>Wi</i> e o <i>CM</i>	[m]
$Y_{W_i}^{I \rightarrow \beta}$	Distância relativa no eixo-y entre a roda <i>Wi</i> e o <i>CM</i>	[m]
$X_{max}^{I \rightarrow \beta}$	Máxima distância relativa no eixo-x entre a roda <i>Wi</i> e o <i>CM</i>	[m]
$Y_{max}^{I \rightarrow \beta}$	Máxima distância relativa no eixo-y entre a roda <i>Wi</i> e o <i>CM</i>	[m]
$m_{W_i}^{I \rightarrow F_c}$	Alteração da força resultante na roda <i>Wi</i> devido a força centrípeta	[kgf]
$m_{W_i}^{I \rightarrow ac}$	Alteração da força resultante na roda <i>Wi</i> devido a aceleração	[kgf]
$F_{z_{W_i}}^P$	Força resultante na roda <i>Wi</i>	[kN]
$\sum F_x^P$	Somatória das forças no eixo-x	[kN]
$\sum F_y^P$	Somatória das forças no eixo-y	[kN]
$\sum F_z^P$	Somatória das forças no eixo-z	[kN]

Nomenclatura para modelagem da interação solo-rodado.

$P_{gr,i}$	Pressão crítica entre o pneu e o solo	[kPa]
k_c	Coeficiente de recalque (<i>pressure-sinkage</i>) equação de Bekker	[kN/m ²]
k_ϕ	Coeficiente de recalque (<i>pressure-sinkage</i>) equação de Bekker	[kN/m ³]

b	Largura da garra do pneu	[m]
n	Expoente de recalque (<i>exponente of sinkage</i>)	[adm]
b_{ii}	Largura do pneu	[m]
P_t	Pressão de contato entre o pneu e o terreno	[kPa]
P_a	Pressão de inflação do pneu	[kPa]
P_c	Pressão de resistência da carcaça do pneu	[kPa]
$z_{e,i}$	Deformação do solo na roda W_i	[m]
$l_{t,i}$	Comprimento do contato entre o pneu e o solo na roda W_i	[m]
Ac_i	Área de contato entre o pneu e o solo na roda W_i	[m ²]
Rc_i	Resistência devido à compactação do solo na roda W_i	[kN]
Rf_i	Resistência devido à deformação do pneu na roda W_i	[kN]
ε_i	Coefficiente do pneu	[adm]
α_i	Ângulo de contato entre pneu e solo	[graus]
δt_i	Deformação na altura do pneu	[m]
k_e	Coefficiente do pneu (radial = 7; diagonal = 15)	[adm]
Rr_i	Resistência ao rolamento	[kN]
$\sum Rr$	Somatória da resistência ao rolamento	[kN]
$F_{max,i}$	Força de tração máxima possível de se desempenhar na roda W_i	[kN]
F_b	Força de tração por garra	[kN]
h_b	Profundidade de penetração da garra no solo	[m]
N_Φ	Valor de fluxo (<i>flow value</i>)	[adm]
Φ	Ângulo de resistência interna (<i>angle of internal shear resistance</i>)	[graus]
γ_s	Densidade do solo	kN/m ³
c	Coesão do solo	[kPa]
$C_{t,i}$	Capacidade de tração máxima por rodado	[kN]
S_b	Espaço entre uma garra e outra	[m]

Nomenclatura para modelagem hidráulica.

δ_i^{pot}	Posição linear do potenciômetro da roda W_i	[adm]
$\Delta \delta_i^{pot}$	Variação do deslocamento linear do potenciômetro da roda W_i	[adm]
$\delta_{i\max}$	Deslocamento angular máximo da roda W_i	[graus]
$\Delta X_{cil,i}$	Deslocamento linear do cilindro hidráulico da roda W_i	[mm]
$v_{cil,i}$	Velocidade de deslocamento linear do cilindro hidráulico da roda W_i	[m/s]
$A_{cil \rightarrow}$	Área do cilindro em movimento de expansão	[mm ²]

$A_{cil\leftarrow}$	Área do cilindro em movimento de retração	[mm ²]
η_{vol}	Eficiência volumétrica	[adm]
η_{mec}	Eficiência mecânica	[adm]
$Q_{cil,i}$	Fluxo volumétrico do cilindro hidráulico	[l/s]
T_{W_i}	Torque necessário para se esterçar o conjunto roda	[Nm]
μ	Coeficiente de atrito pneu - solo	[adm]
$P_{cil,i}$	Pressão nominal no cilindro hidráulico	[kPa]
$Pot_{cil,i}$	Potência necessária para o movimento do conjunto roda	[kW]
$T_{mot,i}$	Torque motor hidráulico	[Nm]
$Pot_{mot,i}$	Potência motor hidráulico	[kW]
V_g	Vazão volumétrica nominal por revolução	[cm ³ /rev]
$Q_{mot,i}$	Fluxo volumétrico do motor hidráulico	[l/s]
cil	Modo de operação do motor (cilindrada total=1; cilindrada reduzida=1/2)	[adm]
$P_{mot,i}$	Pressão nominal no motor hidráulico	[kPa]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	28
1.1. Objetivos	31
1.2. Justificativa	31
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1. Agricultura de precisão	33
2.1.1. O processo de gerenciamento.....	34
2.1.2. Tecnologias envolvidas	36
2.1.3. Imagens de alta resolução.....	37
2.1.4. Termografia	38
2.1.5. Visão de máquina.....	39
2.1.6. Detecção de plantas invasoras	39
2.1.7. Detecção de fileiras de cultivo	40
2.1.8. Análise foliar	40
2.1.9. Volume de Biomassa.....	41
2.1.10. Características do solo.....	41
2.1.11. Identificação por Radio Frequência (RFID)	43
2.1.12. Rede de sensores	43
2.2. Desenvolvimento de sistemas complexos	44
2.2.1. Conceitos de projetos	46
2.2.2. Fases de um projeto	46
2.2.3. Tipos de projetos	48
2.2.4. Projeto de sistemas robóticos móveis.....	49
2.2.5. Funcionalidades de sistemas robóticos móveis	51
2.2.6. Necessidades de um sistema robótico móvel agrícola.....	54
2.2.7. Ferramentas de qualidade	58
2.2.7.1. Quality Function Deployment – QFD	58
2.2.7.2. Modelo Kano	61
2.3. Histórico dos robôs na agricultura.....	63
2.3.1. Veículo Autônomo para Tratamento de Culturas	63
2.3.2. Robô Capinador	64
2.3.3. Trator Autônomo.....	65
2.3.4. Capinador Automático para “Árvores de Natal”	67
2.3.5. Veículo Autônomo de Apoio para Agricultura.....	68
2.3.6. Plataforma Autônoma e Sistema de Informação.....	69
2.3.7. Hortibot.....	70

2.3.8.	Robô Capinador	72
2.3.9.	Halmstad	73
2.3.10.	SOLERO e SHRIMP	74
2.3.11.	Aurora	75
2.3.12.	Robô Autônomo de Seis Rodas	77
2.3.13.	Transplantador Automático de Arroz	78
2.3.14.	Guiagem Automática.....	79
2.3.15.	AgRover.....	80
2.3.16.	Gantry	81
2.3.17.	Escola de Engenharia de São Carlos.....	82
3.	CONCEPÇÃO DA PLATAFORMA ROBÓTICA.....	92
3.1.	Levantamento das necessidades do projeto	92
3.2.	Alternativas técnicas do projeto	98
3.3.	Escolhas técnicas.....	102
3.3.1.	Dimensões e estrutura.....	103
3.3.2.	Fonte de alimentação	106
3.3.3.	Sistema de transmissão	106
3.3.4.	Sistema de propulsão	109
3.3.5.	Sistema de guiagem	111
3.3.6.	Sistema reserva.....	113
3.3.7.	Sistema de suspensão	114
3.4.	Modelo CAE	116
4.	MODELOS MATEMÁTICOS	123
4.1.	Conceitos iniciais.....	123
4.2.	Sistema cinemático.....	125
4.2.1.	Sistema de coordenadas	126
4.2.2.	Posição do centro de gravidade (CG)	127
4.2.3.	Matriz de rotação	129
4.2.4.	Ângulo de esterçamento das rodas	130
4.2.5.	Correção dos ângulos das rodas	137
4.2.6.	Movimento do centro de massa.....	139
4.2.7.	Transformação do sistema de coordenadas	141
4.3.	Modelagem dinâmica.....	141
4.3.1.	Forças de resistência ao movimento	142
4.3.2.	Desempenho de veículos <i>off-road</i>	143
4.3.3.	Comportamento do solo	149
4.3.4.	Interação solo-máquina	151

4.4.	Sistema hidráulico	155
4.4.1.	Cilindro hidráulico de esterçamento.....	155
4.4.2.	Motor hidráulico de propulsão.....	157
4.5.	Sistema de Controle	158
4.5.1.	Sistema de Controle via Rede (Network Control System - NCS)	158
4.5.2.	Protocolo Control Area Network (CAN).....	159
4.5.3.	Sistema de controle propulsão	161
4.5.4.	Sistema de controle esterçamento.....	162
4.5.4.1.	Descrição do sistema de controle esterçamento	163
4.5.4.2.	Estratégia de controle esterçamento.....	165
5.	ENSAIO SIMULADO E REAL.	168
5.1.	Sistema supervisorío	168
5.2.	Sistema de controle	179
6.	CONCLUSÃO	183
7.	ATIVIDADES REALIZADAS	185
7.1.	Disciplinas	185
7.2.	Participações em eventos e publicações	185
7.3.	Trabalhos futuros.....	187
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	188

ESTRUTURA E CONTEÚDO

Esta tese de doutorado está organizada em oito capítulos e uma lista de referências bibliográficas.

Capítulo 1 - Introdução: estão apresentadas as justificativas para a realização deste trabalho, bem como seus objetivos.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica: estão apresentados os conceitos e fundamentos sobre agricultura de precisão, tecnologias envolvidas na área agrícola, conceitos ligados a área de projetos e o histórico de projetos de robôs agrícolas móveis existentes.

Capítulo 3 - Concepção da plataforma robótica: destaca-se aqui o levantamento das necessidades do projeto, bem como as opções existentes para atender a essas necessidades, a justificativa dos parâmetros de projeto adotados na concepção da plataforma robótica, modelos CAD e CAE e descrição do sistema eletro-hidráulico.

Capítulo 4 - Modelos matemáticos: discute-se os conceitos adotados e o detalhamento do modelo cinemático, modelo dinâmico, sistema hidráulico e sistema de controle.

Capítulo 5 - Resultados: dados obtidos dos modelos desenvolvidos e análise da operação da plataforma robótica.

Capítulo 7 - Conclusão: conclusões e as principais contribuições deste trabalho.

Capítulo 8 - Atividades realizadas: resumo das atividades executadas durante o período de doutoramento, e publicações realizadas e perspectivas futuras.

Lista de Referências: é apresentada em ordem alfabética e contém todos os documentos referenciados no decorrer deste trabalho.

1. INTRODUÇÃO

Os veículos autônomos são utilizados amplamente na produção industrial e em depósitos, onde pode-se garantir um ambiente controlado. Na agricultura, pesquisas sobre veículos sem condutor “driverless” sempre foram almejadas, entretanto, as mais elaboradas só começaram no início da década de 1960 (FOUNTAS *et al.*, 2007). Esses trabalhos não obtiveram sucesso por não possuírem a habilidade de abranger a complexidade do mundo real. A maioria deles adotou um estilo industrial na agricultura, onde tudo era conhecido de antemão e as máquinas podiam trabalhar inteiramente com caminhos pré-definidos, parecido com uma linha de produção.

O desafio agora é desenvolver máquinas inteligentes o suficiente para trabalhar em um ambiente não-modificado ou semi-natural. Essas máquinas não necessitam ser inteligentes como um humano, mas devem apresentar um comportamento sensato em contextos reconhecidos. Deste modo, devem incorporar inteligência artificial suficiente para trabalharem de maneira eficiente e segura por longos períodos de tempo, de forma autônoma, em ambiente semi-natural, enquanto realizam uma tarefa útil (PEDERSEN *et al.*, 2005). Uma forma de compreender a complexidade é identificar o que pessoas fariam em certas situações e decompor as ações no controle da máquina (BLACKMORE *et al.*, 2005).

Nos últimos anos, o desenvolvimento destes veículos apresentou um aumento de interesse. Este aumento conduz a várias pesquisas que visam o desenvolvimento de veículos mais racionais e adaptáveis. No campo de veículos autônomos agrícolas, um conceito tem sido desenvolvido para investigar se múltiplas pequenas máquinas autônomas seriam mais eficientes que tratores grandes tradicionais (BLACKMORE *et al.*, 2004a). Estes veículos devem ser capazes de realizar as tarefas obedecendo as necessidades de autonomia descritas a cima.

O aumento da aplicação de automação e da informática na área, tem propiciado o surgimento de novas práticas agrícolas, relacionadas com a Agricultura de Precisão. Essas reforçam a importância da pesquisa de sensores incorporados e redes de comunicação (AUERNHAMMER & SPECKMANN, 2006) para o estudo da variabilidade espacial e aplicações de sensoriamento remoto. Certo grau de automação é necessário para o uso dessas práticas que dependem de algumas tecnologias recentes, adaptadas à área agrícola, como no caso dos sistemas de posicionamento global, sistemas de informação geográfica e interligação de dispositivos e controladores utilizados no maquinário agrícola (OKSANEN *et al.*, 2004). Tecnologias e dispositivos para aquisição de dados e atuação em tempo real têm sido desenvolvidas para equipar máquinas agrícolas com o intuito de

automatizá-las ou fornecer suporte para novas práticas de manejo (AUERNHAMMER, 2004).

A Agricultura de Precisão permitiu modificar a forma de gerenciamento das atividades agrícolas. Uma determinada área que era gerenciada como um todo, passou a ser fragmentada em sub-níveis. Este processo de redução na escala poderá possibilitar o tratamento individual das plantas. Devido ao aumento da quantidade de dados que deveriam ser processadas para cobrir uma área de campo completo a nível de plantas individuais, apenas certas operações poderiam ser realizadas utilizando-se a intervenção humana. Em função disto, diferentes formas de automação, principalmente em culturas de alto valor, são necessárias. Nos últimos anos, o desenvolvimento da autonomia de veículos na agricultura recebeu maior interesse, com o intuito de atender à essa demanda.

Na literatura científica podem ser encontrados estudos que visam adaptar o maquinário agrícola comercial para produzir plataformas agrícolas autônomas (veículos ou robôs agrícolas autônomos) como pode ser visto em REID *et al.*, 2000 e KEICHER & SEUFERT, 2000. Atualmente existe uma forte tendência em desenvolver robôs móveis e/ou veículos autônomos para aplicação em tarefas específicas, ocasionando o aumento da eficiência das operações e a melhoria dos resultados, quando comparado ao uso de grandes tratores e acessórios tradicionais (BLACKMORE *et al.*, 2007), como pode ser visto em REID *et al.*, 2000, KEICHER & SEUFERT, 2000, HAGUE *et al.*, 2000, HAGUE & TILLET, 1996, , MOGENSEN *et al.*, 2007, RESKE-NIELSEN *et al.*, 2006, BLACKMORE *et al.*, 2007. No entanto, o desenvolvimento de plataformas específicas apresenta dois desafios (BLACKMORE *et al.*, 2004a): desenvolver uma estrutura física adequada para o ambiente agrícola, e uma arquitetura eletrônica para integrar os vários dispositivos eletrônicos.

Uma tendência que pode ajudar no desenvolvimento de máquinas mais complexas que atendam às necessidades da nova prática na área agrícola é a Prototipagem Virtual. Esse é um processo de design computadorizado preocupado com a construção de modelos de produtos digitais (protótipos virtuais) e simulações gráficas realistas que abordam as questões gerais do plano físico, conceitos operacionais, especificações funcionais, e análises dinâmicas sob diversos ambientes operacionais (HUANG *et al.*, 2007 e SHEN *et al.*, 2005). Tal evento consiste de muitas capacidades, sendo a mais conhecida a criação e a visualização de modelos sólidos tridimensionais com diversas cores e texturas de superfícies (ZORRIASSATINE *et al.*, 2003).

A fim de completar o sistema, a arquitetura eletrônica deve ser robusta e confiável, proporcionar manutenção fácil e rápida e ter modularidade e flexibilidade para permitir futuras expansões e conexões de novos equipamentos. Algumas das aplicações recentes de robôs móveis, utilizam arquiteturas distribuídas baseadas em redes “fieldbus” para atender a esses requisitos (BLACKMORE & GRIEPENTROG, 2006; BLACKMORE *et al.*,

2007). Sistemas de controle “fieldbus” têm substituído os tradicionais sistemas de controle centralizados por causa de vários benefícios, tal como a redução de custos e a quantidade de fios, maior confiabilidade e interoperabilidade, melhoria da capacidade de reconfiguração do sistema e facilidade de manutenção (MOYNE & TILBURY, 2007a). Embora os sistemas de controle distribuído “fieldbus” ofereçam diversas vantagens sobre sistemas tradicionais de controle centralizado, a existência de redes de comunicação faz o design e a implementação dessas soluções mais complexas. Sistemas de controle em rede impõem problemas adicionais inerentes às aplicações de controle com “fieldbus”: atrasos, variação de atrasos, limitações de largura de banda e perdas de pacotes (BAILLIEUL & ANTSAKLIS, 2007b).

Entre as várias redes de campo, uma tecnologia que é muito comum a ser aplicada na interligação desses dispositivos é a comunicação distribuída baseada no protocolo Controller Area Network (CAN). Na área agrícola, o protocolo CAN (BOSCH, 2010) foi escolhido como rede de comunicação devido ao seu baixo custo de desenvolvimento e grande aceitação e sucesso para a eletrônica embutida na área automotiva. O uso do CAN na área agrícola é confirmado em SUVINEN & SAARILAHTI, 2006 e sua aplicação aos veículos autônomos e robôs móveis é apresentado em NAGASAKA *et al.*, 2004 e DARR *et al.*, 2005. A implementação da norma ISO11783, também chamada de ISOBUS, representa a padronização do protocolo CAN para a área agrícola tendo como principal objetivo o desenvolvimento de rede de comunicação de dados para o ambiente agrícola, como descrito em BENNEWEIS, 2005.

1.1. Objetivos

Considerando o contexto apresentado, o objetivo deste trabalho é descrever o desenvolvimento e a implementação de uma plataforma robótica modular para aquisição de dados e pesquisa de novas tecnologias para sensoriamento remoto em ambientes agrícolas. A plataforma robótica base apresenta uma característica multifuncional no sentido de permitir o acoplamento de módulos de aquisição de dados em campo para o estudo da variabilidade espacial por meio de sensores e equipamentos considerados portáteis. O projeto visa incorporar características construtivas que sejam capazes de potencializar as atividades de sensoriamento remoto no meio agrícola atuando em culturas perenes, semi-perenes e anuais. Os objetivos específicos são:

- Levantamento das principais tecnologias usadas na agricultura de precisão;
- Descrição dos métodos usados para criação do projeto e escolha dos parâmetros de projeto;
- Descrição dos parâmetros de projeto adotados, criação de modelos CAD e CAE;
- Criação de modelos que representem a cinemática, dinâmica e a interação solo-máquina da plataforma robótica;
- Elaboração de um sistema de controle para a plataforma.

Área de conhecimento e subáreas

- Máquinas e implementos agrícolas (área predominante);
- Veículos e equipamentos de controle;
- Eletrônica Industrial, sistemas e controles eletrônicos;
- Projetos de máquinas;
- Ciências aplicadas ao meio ambiente;
- Telecomunicações;
- Mecânica dos sólidos.

1.2. Justificativa

A Agricultura de Precisão demanda um expressivo número de trabalhos que visam o desenvolvimento de instrumentos para automação, como apresentado por AUERNHAMMER & SPECKMANN, 2006. As tecnologias de sensoriamento remoto, estratégia de amostragem de solo, uso de GPS e GIS (Sistema de Informação Geográfico), entre muitos outros estão sendo adaptadas e desenvolvidas para o uso agrícola. Cita-se o uso de sensores para identificar níveis de nitrogênio (SCHARF & LORY, 2000), matéria orgânica (SHIBUSAWA *et*

al., 2001), insetos (MICHELS *et al.*, 2000), plantas invasoras (BILLER & SCHICKE, 2000) e medir e construir mapa de condutividade elétrica do solo (<http://www.veristech.com>) os quais mostram-se viáveis para aplicação agrícola.

A utilização de sensores ditos *on-the-go* são um dos grandes alvos da indústria e da pesquisa nesta área. A técnica aproveita o momento das operações agrícolas para a realização de inspeção ou monitoramento da cultura, visando evitar custos operacionais adicionais. Porém sua aplicação nem sempre é possível, em casos como monitoramento de pragas, doenças, níveis de nitrogênio na planta e outras variáveis da área cultivada, torna-se necessário adentrar na área cultivada por via terrestre, dificultando assim a realização de uma amostragem eficiente.

Atrelado ao panorama descrito acima, e à presença de outros fatores, como o altíssimo custo de mão-de-obra, o envelhecimento da população rural sem perspectivas de renovação, a necessidade de minimizar a exposição dos operadores às atividades insalubres e a preocupação com a conservação do equilíbrio ambiental têm incentivado e justificado pesquisas em robôs agrícolas móveis por grupos, como os apresentados em KEICHER & SEUFERT, 2000, REID *et al.*, 2000, TORII, 2000 e SOUZA, 2007.

Posto isso, há no Brasil a necessidade e motivação suficiente para iniciar trabalhos em veículos agrícolas semiautônomos e autônomos por meio do desenvolvimento de uma plataforma robótica. Espera-se que a plataforma facilite as operações de aquisição de dados em campo e permita ao interessado a aquisição de módulos com tecnologias específicas para seu tipo de cultura. Com isto é possível diminuir os altos custos de investimentos em grandes máquinas agrícolas e sistemas de monitoramento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentado o embasamento bibliográfico utilizado como referência para a realização deste trabalho. Inicialmente, aborda-se o histórico de desenvolvimento e o atual estado da arte da agricultura de precisão e as principais tecnologias estudadas para aplicações em sensoriamento de parâmetros agrícolas. Destacam-se também as etapas que regem o desenvolvimento de um produto, focando especificamente na organização de um projeto para uma plataforma robótica móvel para aplicação no ambiente agrícola. E como parte da estratégia de desenvolvimento de produtos, apresenta-se uma revisão sobre os principais projetos envolvendo robôs e tecnologias para navegação em ambientes agrícolas.

2.1. Agricultura de precisão

Antes de iniciar o estudo sobre robótica agrícola, é necessário entender como a automação de sistemas e o uso de tecnologia de informação está presente no setor agrícola. Basicamente, podemos dizer que estes tópicos, assim como uma série de outros, contribuem para formar o sistema de manejo conhecido como Agricultura de Precisão. Dentre as diversas abordagens existentes relacionadas ao tema Agricultura de Precisão, é comum encontrar citações referentes à coleta massiva de dados, sistemas georreferenciados, geração de mapas e aplicação de insumos a taxa variável. Entretanto, essas operações quando realizadas de forma isoladas, ou sem um gerenciamento adequado, não providenciam ganhos efetivos ou, geram informações desconstruídas.

Diante do cenário apresentado, admite-se que a Agricultura de Precisão deve ser vista como um conjunto de técnicas para o gerenciamento da produção agrícola, o qual tem o objetivo de reduzir as incertezas das tomadas de decisões para o melhor entendimento e gerenciamento das variáveis do campo. Este método gerencial incorpora diversas áreas da ciência, tais como ciências agrárias, engenharias, geoestatística, ciências da computação entre outras, resultando em um sistema com caráter multidisciplinar (SRINIVASAN, 2006; PEREIRA, 2008). Por isto, os membros envolvidos com o seu desenvolvimento e uso precisam dispor de vasta quantidade de dados, que por sua vez, são oriundos de múltiplas fontes, para realizar as tarefas de tomadas de decisão (MCBRATNEY *et al.*, 2005).

O conceito de Agricultura de Precisão foi definido de várias formas ao longo dos anos. Seu significado pode ter distintas interpretações em função do foco de análise, tecnologia disponível e método adotado. Exemplos podem ser vistos em: SCHUELLER, 1992; OPARA, 1997; SEARCY, 1995; CLARK & MCGUCKIN, 1996; BLACKMORE & LARSCHEID, 1997; STRAUSS *et al.*, 1998. De forma geral, a Agricultura de Precisão pode

ser definida como: “Elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que as lavouras e o sistema de produção sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados” (MOLIN, 2001).

A fim de buscar o objetivo discutido acima, houve um aumento do uso de sistemas automatizados e de equipamentos e procedimentos para coleta e processamento de dados, o que proporcionou o surgimento de novas práticas agrícolas. Essas são baseadas em tecnologias previamente existentes e utilizadas em outras áreas, as quais foram adaptadas para o ambiente agrícola, como no caso dos sistemas de posicionamento global, sistemas de informação geográfica, sensores, redes de comunicação e interligação de dispositivos e controladores (OKSANEN *et al.*, 2004; ZHANG *et al.*, 2002; GOZDOWSK & SAMBORSKI, 2007; PEREIRA, 2008; TANGERINO, 2009, LEE *et al.*, 2010; AHAMED *et al.*, 2011). Além disso, é importante desenvolver tecnologias e dispositivos para a aquisição de dados e atuação em tempo real, fusão de sensores e redes de comunicação. Tais ações visam analisar a variabilidade espacial por meio de sensoriamento remoto além de automatizar máquinas agrícolas ou fornecer suporte para novas práticas de manejo (AUERNHAMMER, 2004; AUERNHAMMER & SPECKMANN, 2006).

2.1.1. O processo de gerenciamento.

Historicamente o desejo de aperfeiçoar a eficiência da produtividade agrícola foi estimulado por inovações tecnológicas. Entretanto com o aumento das áreas cultivadas, tornou-se inviável gerenciar de modo eficiente a variabilidade espacial por métodos de observação e/ou experiência. A incorporação de técnicas mais apuradas em relação à Tecnologia da Informação no ambiente agrícola iniciou-se no meio da década de 1980 e cresceu continuamente com o decorrer dos anos. Salienta-se que o uso da informação para a tomada de decisão no ambiente agrícola não é algo novo, pois há décadas os dados de solo e do produto final são coletados e analisados para gerenciar insumos e operações. Nesse sentido, uma diferença chave entre o gerenciamento convencional e o que envolve a Agricultura de Precisão é o uso de métodos específicos para processar e analisar dados de múltiplas fontes de alta resolução espacial e temporal para tomada de decisão (PEREIRA, 2008; NATIONAL RESEARCH COUNCIL USA, 1997).

No fim da década 1990, várias práticas e tecnologias emergentes foram testadas e refinadas para uso na Agricultura de Precisão; estas por sua vez, poderiam ser implementadas ou rejeitadas de acordo com os resultados obtidos. Como o avanço da tecnologia é constante, novas ferramentas continuam a ser desenvolvidas e testadas (GOZDOWSK & SAMBORSKI, 2007). Assim sendo, a dinâmica deste processo possibilita que uma determinada prática ou tecnologia que era inviável tecnicamente ou

economicamente torne-se viável com o resultado de pesquisa e desenvolvimento de áreas não agrícolas. Embora a abrangência da Agricultura de Precisão evolua constantemente, grande parte em função de avanços em áreas correlatas, suas principais características continuam a ser:

- A aquisição de dados por meio eletrônico-digital é automatizada e de baixo custo;
- A aquisição de dados ocorre com maior frequência e mais detalhada;
- Informações, provenientes das operações de campo ou amostras do solo/produtos agrícolas, são consideradas como entradas de dados da produção agrícola;
- A interpretação e análises dos dados são mais formais e analíticas;
- A implementação da resposta é mais localizada e adequada;
- O desempenho dos sistemas de gerenciamento alternativo pode ser quantitativamente avaliado (NATIONAL RESEARCH COUNCIL USA, 1997).

No quesito escala amostral, a tendência é aumentar a frequência amostral, chegando ao ponto de se fazer o tratamento por planta (HAGUE & TILLET, 1996). Entretanto, cada fator específico que possa ser gerenciado, pode ter sua própria escala de variabilidade. O controle de insetos e o monitoramento do clima para o gerenciamento das tomadas de decisões para o cultivo são exemplos de variáveis que são gerenciadas em larga escala. Outros fatores como fertilidade do solo e distribuições de doenças podem variar significativamente em nível de talhão durante a semeadura e a germinação. Por esta razão, é importante observar a Agricultura de Precisão em termos das unidades espacial e temporal para tomada de decisão. Estas escalas são vistas como um fluxo contínuo de informações das áreas de atuação, desde uma planta até o território nacional. FRESCO, 1995 ressalta a necessidade de se relacionar resultados ou fenômenos com processos realizados em todas as escalas para determinar uma escala ótima de trabalho e do gerenciamento agrícola.

Os fatores que delimitam um talhão podem mudar anualmente (por exemplo, a disponibilidade de nutrientes, doenças, pragas, plantas invasoras, clima, etc.), gerando barreiras que dificultam seu manejo. Um dos aspectos mais atrativos da Agricultura de Precisão é o potencial para o gerenciamento individual de pequenas áreas, cujo tamanho é determinado por características locais e/ou pelo tipo de cultivo (NATIONAL RESEARCH COUNCIL USA, 1997; GOZDOWSKI & SAMBORSKI, 2007). A capacidade em determinar a localização repetidamente de um talhão e suas características agronômicas proporciona uma oportunidade de aperfeiçoar o gerenciamento total da área de produção. A subdivisão de um campo em pequenas unidades de manejo pode-se aperfeiçoar sustentavelmente os sistemas de produção agrícola em aspectos econômicos e ambientais.

Os primeiros defensores da Agricultura de Precisão utilizavam a abordagem de que as decisões de gerenciamento deveriam ser baseadas nas características do solo,

assumindo que um conjunto de solos semelhantes poderia ser gerenciado como unidade homogênea. Pesquisas posteriores mostraram que vários tipos de solos possuem aproximadamente a mesma variabilidade de nutrientes. O gerenciamento preciso baseado na variabilidade das propriedades físicas e químicas dentro dos tipos de solos pode ou não ser suficiente para o gerenciamento ótimo das atividades da produção agrícola. Para aumentar a precisão da tomada de decisão, os produtores agrícolas devem estar cientes dos fatores limitantes de cada talhão e ter a capacidade de modificar o gerenciamento nesta escala. No entanto, a determinação destes fatores é ao mesmo tempo difícil e onerosa (NATIONAL RESEARCH COUNCIL USA, 1997).

2.1.2. Tecnologias envolvidas

A multidisciplinaridade envolvida na Agricultura de Precisão faz com que diversos métodos, baseados em distintas áreas da ciência, sejam desenvolvidos visando uma mesma aplicação. Da mesma forma, uma determinada tecnologia não fica restritamente comprometida em melhorar uma única prática, mas pode ser empregada em múltiplas situações, auxiliando no processo como um todo. Devido ao processo contínuo de evolução das áreas que englobam a Tecnologia da Informação, tais como, microeletrônica, sensores, computadores, telecomunicações, o avanço da tecnologia é constante e novas ferramentas continuam a ser desenvolvidas e testadas (GOZDOWSK & SAMBORSKI, 2007). Assim sendo, a dinâmica deste processo possibilita que uma determinada prática ou tecnologia que era inviável tecnicamente ou economicamente torne-se viável com o resultado de pesquisa e desenvolvimento de áreas não agrícolas.

Diversos autores como PIERCE & NOWAK, 1999; COX, 2002; ZHANG *et al.*, 2002; ADAMCHUK *et al.*, 2004; ADRIAN *et al.*, 2005; CORWIN & PLANT, 2005; HATFIELD *et al.*, 2008; SCHELLBERG *et al.*, 2008; LEE *et al.*, 2010; AHAMED *et al.*, 2011; AQEEL UR *et al.*, 2011 fizeram revisões bibliográficas mostrando os principais tópicos alvos de pesquisas. Dentre as variáveis agrícolas destacam-se produtividade, propriedades físicas e químicas do solo, nutrição vegetal, volume vegetal, biomassa, conteúdo de água, pragas (doenças, plantas invasoras, insetos). Os recursos utilizados para obter dados que possam ser correlacionados com estas variáveis são vastos, incluindo: sensores espalhados no campo, espectrorradiômetros, visão de máquina, sensoriamento remoto aéreo multiespectral e hiperespectral, imagens de satélite, imagens térmicas, entre outros.

2.1.3. Imagens de alta resolução

O mapa de produtividade é uma das mais importantes informações que se pode obter de uma área, pois integra os efeitos de diversas variáveis espaciais como solo, topografia, fertilidade, etc. (SEARCY *et al.*, 1989). A forma usual de se obter esses mapas é no momento da colheita, por meio de monitores instalados nas colhedoras. Entretanto, essa informação somente será útil para a próxima safra e eventuais problemas não poderão ser gerenciados durante a safra corrente. Nesse sentido, o sensoriamento remoto por imagens feitas durante o período da safra é útil para administrar eventuais deficiências antes da colheita, além de servir como alternativa caso monitores de colheita não estejam disponíveis.

Tradicionalmente são usadas imagens de satélite para estimar grandes áreas. Contudo, o custo elevado e a baixa resolução temporal e espectral tornam essa prática pouco atrativa para áreas menores, além da necessidade de condições climáticas favoráveis no exato momento da captura da imagem. Uma alternativa que tem se mostrado viável é o uso de veículos aéreos não tripulados. Esses podem fornecer imagens com grande resolução espacial e temporal além de múltiplos espectros (QIAN *et al.*, 2005; YANG & ANDERSON, 1999; SHANAHAN *et al.*, 2001; LEON *et al.*, 2003; KHOSLA *et al.*, 2008). Outro ponto positivo desses veículos é o baixo custo para coleta de dados e a capacidade de fácil atualização dos sistemas de captura de dados. Outra alternativa é a instalação desses sensores nas máquinas agrícolas e o consequente aproveitamento as operações tradicionais para coletar informações.

A correlação de informações obtidas pelos dados multiespectrais e hiperespectrais tem se mostrado eficientes para a estimação de variáveis agrícolas como índice vegetativo, o qual pode ser correlacionado com a produtividade além de indicar deficiências (TUCKER *et al.*, 1980; WIEGAND *et al.*, 1991; PLANT *et al.*, 2000; YANG *et al.*, 2006; YE *et al.*, 2008; DOBERMANN & PING, 2004; VIÑA *et al.*, 2011) tanto em culturas anuais como perenes. Estes geralmente são obtidos pela combinação de espectros como o Infravermelho Próximo e o Vermelho (NIR/Red) (JORDAN, 1969), o Índice Vegetativo por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) (ROUSE *et al.*, 1973), o Índice Vegetativo Solo-Ajustado (Soil-Adjusted Vegetation Index - SAVI) (HUETE, 1988), o Infravermelho Próximo e o Verde (NIR/Green) e o Índice Vegetativo Diferencial Normalizado baseado em verde (Green Normalized Difference Vegetation Index – GNDVI) (YANG *et al.*, 2000; DOBERMANN & PING, 2004; YANG *et al.*, 2006). Por meio de análises de regressão é possível utilizar imagens para correlacionar com outras variáveis agrícolas.

2.1.4. Termografia

Similar às imagens visíveis (Red-Green-Blue - RGB) e infravermelho próximo (Near-Infrared - NIR), imagens térmicas (Thermal Infrared - TIR) contém informação espacial do objeto retratado. As diferenças básicas são que as imagens TIR contém informação sobre a energia emitida em forma de ondas magnéticas (comprimento de onda de 3 até 12 μm) pela superfície do corpo, enquanto que as imagens RGB e NIR contém informação sobre a energia eletromagnética refletida (comprimento de onda de 0,35 até 1,0 μm) pela superfície do corpo. Imagens RGB estão relacionadas com o pigmento absorvido (composição química), imagens NIR estão relacionadas com a dispersão (estrutura geométrica celular) e imagens TIR estão relacionadas com propriedades termodinâmicas, emissividade e situação do arredor LEE *et al.*, 2010.

Um dos usos da termografia é para estimação do número de frutas em pomares (STAJNKO *et al.*, 2004; BULANON *et al.*, 2008; WACHS *et al.*, 2009). A detecção é baseada na suposição de que a temperatura do fruto é diferente dos arredores. Essa suposição é verdadeira em muitos casos, uma vez que as propriedades termodinâmicas do fruto são diferentes dos elementos arredores. Tanto frutos como biomassa (folhas e galhos) são constituídos basicamente de água, mas como a massa é usualmente diferente, isto faz com que a resposta do transiente termodinâmico seja diferente. Uma série de fatores interferem nos dados, tais como insolação, umidade relativa do ar, velocidade do vento e temperatura ambiente. A fusão de imagens multimodais (BULANON *et al.*, 2008; WACHS *et al.*, 2009) é uma boa alternativa para completar esse recurso.

Outra função das imagens térmicas está relacionada com o estado hídrico das plantas, detecção e mapeamento de doenças e vetores. Há muito tempo a temperatura do dossel das plantas é reconhecida como uma medida do estado de hidratação das plantas (JACKSON *et al.*, 1981; ZYL, 1986) e continua sendo pesquisada até os dias atuais (AYENEH *et al.*, 2002; WANJURA *et al.*, 2004; ZHANG *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2010). Entretanto, somente a temperatura não pode ser usada como indicador hídrico, uma vez que esta é influenciada pelas condições meteorológicas. Sendo assim, recomenda-se o uso de um índice normalizado (CWSI - Crop Water Stress Index) (CLAWSON *et al.*, 1989; IDSO *et al.*, 1981), baseado na diferença entre a temperatura encontrada em uma superfície úmida, seca e a planta analisada. A aquisição das imagens pode ser feita por uso de veículos aéreos não tripulados (MERON *et al.*, 2010).

Outros estudos envolvendo a fusão de imagens RGB (Red-Green-Blue), NIR (Near-Infrared), TIR (Thermal Infrared), GLCM (Grey-Level Concurrence Matrix) podem ser encontrados visando relacionar o estado de hidratação da planta (MOLLER *et al.*, 2007; LEINONEN & JONES, 2004; ALCHANATIS *et al.*, 2006)

2.1.5. Visão de máquina

A visão de máquina é baseada em imagens digitais e tenta mimetizar a percepção humana, servindo como fonte de dados para sistemas computadorizados. As aplicações mais comuns são baseadas em sensores de silício (400-1000 nm) devido ao baixo custo e a grande quantidade de informação presentes em imagens coloridas. As principais áreas que estão sendo desenvolvidas incluem a detecção de plantas invasoras (SOUTHALL *et al.*, 2002), detecção das fileiras de cultivo para navegação autônoma (ASTRAND & BAERVELDT, 2005) e detecção de frutas (CAVANI *et al.*, 2007) para colheita robotizada ou estimativa de produção (LEE *et al.*, 2010). Os principais problemas enfrentados estão relacionados com a mudança da coloração captada em função da iluminação natural. Métodos de processamento de imagens (TIAN & SLAUGHTER, 1998; ONYANGO & MARCHANT, 2003; CECCATTO *et al.*, 2005; NIEUWENHUIZEN *et al.*, 2007) podem ser usados para amenizar esse problema.

2.1.6. Detecção de plantas invasoras

Uma das aplicações mais comuns da visão computacional relacionada com o gerenciamento de atividades agrícolas é a detecção e o controle de plantas invasoras. Basicamente existem duas linhas de pesquisa relacionadas com o assunto: a primeira visa diferenciar plantas invasoras da cultura principal, e a segunda almeja identificar a espécie de planta invasora a fim de selecionar o herbicida e a dosagem adequados. A primeira tarefa é mais simples, visto que é necessário simplesmente distinguir duas espécies. Já a segunda tarefa mostra-se mais complicada, pois exige que se identifique um tipo específico de planta entre inúmeras espécies (LEE *et al.*, 2010).

A detecção pode ser feita de várias formas, os modelos mais simples usam a interceptação da luz para diferenciar a presença ou a ausência de uma planta no solo (VAN DER WEIDE *et al.*, 2008). Trabalhos avançados usam de algoritmos complexos que coletam e processam múltiplas fontes de dados por meio de métodos estatísticos para reconhecer padrões (STEWART & SHRESTHA, 2005; TILLET *et al.*, 2008; NIEUWENHUIZEN *et al.*, 2007; VAN EVERT *et al.*, 2006). Neste caso, podem ser usados parâmetros de refletância tanto ao espectro visível quanto ao infravermelho, textura, além do formato e posicionamento das plantas.

2.1.7. Detecção de fileiras de cultivo

A detecção de fileiras de cultivo está ligada principalmente com a navegação autônoma, além de ser uma das técnicas usadas para diferenciar plantas invasoras da cultura. A maioria dos sistemas desenvolvidos utiliza imagens coloridas. Como as fileiras de cultivo geralmente seguem um padrão retilíneo, a maioria dos algoritmos de processamento de imagens usa a transformada de Hough, que tem a característica inerente de localizar linhas retas (VAN EVERT *et al.*, 2006; ASTRAND & BAERVELDT, 2005; GEE *et al.*, 2008; BAKKER *et al.*, 2007; BAKKER *et al.*, 2008). Informações referentes a implementação da cultura (altura média da planta, espaçamento entre fileiras, etc.) também podem ser inserida no modelo, a fim de melhorar sua acurácia.

Outra técnica utilizada baseia-se no uso de scanners laser (LIDAR - Light Detection and Ranging) ou sensores ultrassônicos para criar um modelo tridimensional do ambiente (WEISS & BIBER, 2011). Essas técnicas são amplamente pesquisadas em projetos automobilísticos que objetivam a criação de sistemas autônomos de navegação ou sistemas de auxílio a direção (STILLER *et al.*, 2011). Alguns trabalhos propõem a fusão entre visão computacional e scanners tridimensionais para garantir maior robustez no processo de guiagem, além de prover a possibilidade de detecção de obstáculos (SUBRAMANIAN *et al.*, 2006; BURKS *et al.*, 2005)

2.1.8. Análise foliar

A análise foliar, por estar intimamente ligada ao vigor da planta é um ótimo mecanismo para detecção da qualidade do seu desenvolvimento. É possível verificar presença de doenças, estresse hídrico ou escassez de nutrientes. Os métodos usados são baseados em imagens feitas tanto no espectro visível como infravermelho (ZHANG *et al.*, 2003), além de imagens térmicas (LEINONEN & JONES, 2004) e até presença de fluorescência (KUCKENBERG *et al.*, 2009). Os estudos geralmente são específicos, e visam identificar áreas ou plantas contaminadas por determinada doença que podem ser causadas por insetos, fungos (LAMB *et al.*, 2007) ou vírus (NAIDU *et al.*, 2009). A Tabela 1 mostra algumas das tecnologias usadas para detecção de doenças em culturas.

Tabela 1. Visão geral das tecnologias para detecção de doenças no campo.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens	Uso potencial
Fluorescência	Detecção de doenças nos estágios iniciais mesmo antes de alterações visíveis no tecido da planta.	Não promove uma clara identificação do fator de stress específico, acurácia dependente da intensidade luminosa.	Uso noturno, alarme preventivo.
Foto reflexão	Clara identificação do fator de stress.	Eficiente após o aparecimento visível dos sintomas e sensível à idade e descoloração da folha.	Diferenciar entre fatores de estresse com uso em campo ou estufas.
Termografia	Detectar doenças que alteram a quantidade de água na folha, mais efetivo para sensoriamento aéreo.	Alta dependência de iluminação, baixa acurácia em climas instáveis e na identificação de espécies.	Estufas ou sensoriamento aéreo com iluminação e temperatura constante.

2.1.9. Volume de Biomassa

O volume de biomassa é um fator importante no momento de definir aplicações de insumos como fertilizantes, herbicidas, inseticidas, irrigação, etc. bem como um indicador da saúde da planta. Houve várias tentativas para a avaliação de volume de biomassa, utilizando métodos distintos, tais como scanner laser (RITCHIE *et al.*, 1993; SALYANI & WEI, 2004; SALYANI & WEI, 2005; EHLERT *et al.*, 2008), ultra-som (MOLTO *et al.*, 2001; SALYANI & ZAMAN, 2004; BALSARI *et al.*, 2008), imagens aéreas (LU, 2006) e penetração da luz no dossel (JAHN, 1979). Além disso, dependendo da cultura, o volume de biomassa está intimamente relacionado com o rendimento e ou qualidade do produto final (HASELGROVE *et al.*, 2000; WOOD *et al.*, 2003), tanto para culturas anuais como perenes.

2.1.10. Características do solo

As características físicas, químicas e biológicas do solo têm grande influência no desenvolvimento da cultura. Devido a isto, métodos de sensoriamento remoto ou análises *on-the-go* são estudados há muito tempo. Métodos tradicionais retiram amostras para posterior análise laboratorial, o que pode ser inviável dependendo da resolução amostral que se deseja alcançar.

A espectroscopia de reflectância por meio de espectros como ultravioleta (UV), RGB, IR e NIR para análise de solos foi iniciada na década de 1960. Por meio terrestre podem ser encontrados trabalhos que objetivam relacionar várias propriedades como matéria orgânica (KRISHNAN *et al.*, 1980; HUMMEL *et al.*, 2001; KOOISTRA *et al.*, 2003), carbono no solo (COZZOLINO & MORON, 2006; RINNAN & RINNAN, 2007; LADONI *et al.*, 2010), e umidade do solo (KANO *et al.*, 1985; KALEITA *et al.*, 2005; MOUAZEN *et al.*, 2006).

Elementos químicos como o fosfato (YOON *et al.*, 1993; BOGREKCI & LEE, 2005b; BOGREKCI & LEE, 2005a; BOGREKCI & LEE, 2006), nitrato (EHSANI *et al.*, 2001) fósforo, cálcio, magnésio, sódio, zinco, areia, pH (THOMASSON *et al.*, 2001; GE & THOMASSON, 2006); tamanho de partículas (SALISBURY & DARIA, 1992; BOGREKCI & LEE, 2005a) entre diversos outros.

Por meio do uso de imagens aéreas existem estudos que visam identificar a área de transição entre dois tipos de solos e concentração de matéria orgânica (COLEMAN & TADESSE, 1995; FOX & SABBAGH, 2002; ZHANG *et al.*, 2011), fósforo e matéria orgânica (VARVEL *et al.*, 1999), e umidade (MULLER & DECAMPS, 2001), além de revisão bibliográfica (METTERNICHT & ZINCK, 2003) relacionando várias outras formas de análises remota de solos.

Outra linha de estudo envolve eletrodos e membranas seletivas principalmente voltados à coleta de dados relativos a propriedades químicas do solo, como pH e macronutrientes como nitrogênio, fosforo e potássio (ADAMCHUK *et al.*, 2004; BROUDER *et al.*, 2003; KIM *et al.*, 2007; ADAMCHUK *et al.*, 2008). Entretanto, todas as pesquisas salientam a necessidade de calibração constante e os modelos desenvolvidos são somente aplicáveis para áreas específicas. Também são encontrados trabalhos usando hastes ou discos introduzidos no solo a fim de mensurar a condutividade elétrica do solo. Uma das dificuldades de análises *on-the-go* por correlação é que o parâmetro coletado, como por exemplo condutividade elétrica, não é somente em função de uma variável, como um nutriente específico, mas sim de vários outros, como a umidade, matéria orgânica, porosidade.

Uma propriedade física do solo que merece destaque é a compactação, pois tem grande influência no desenvolvimento da cultura, interferindo em parâmetros como, a capacidade de armazenamento de água, fertilidade, crescimento vegetativo, atividade de micro-organismos além do desempenho de máquinas. A necessidade de conhecer como a pressão gerada pela passagem de rodados ou esteiras é distribuída no solo, e como isto influencia na produção, motivaram os primeiros trabalhos de interação solo-máquina (FROEHLICH, 1934 apud LEE *et al.*, 2010; FREITAG *et al.*, 1970; WISMER & LUTH, 1974).

Algumas das pesquisas seguintes visaram formas de estimar a compactação por meio de sensores. Os principais métodos usados relacionam a resistência imposta pelo solo à penetração ou ao corte por uma haste medida por meio de células de carga ou *strain gauge*, obtendo os níveis de compactação ao longo do perfil do solo (ADAMCHUK *et al.*, 2004; SUDDUTH *et al.*, 2008; HEMMAT & ADAMCHUK, 2008). Entretanto esse processo não é tão simples, pois existem diversas variáveis que interferem nas análises, tais como a umidade (VAZ *et al.*, 2011). Sendo assim, os projetos atuais visam a obtenção de múltiplos dados (PIERCE & CLAY, 2007; TEKIN *et al.*, 2008)

No que tange à umidade do solo, o uso de micro-ondas (time-domain reflectometer - TDR), tanto pelo método passivo como ativo, mostra resultados satisfatórios. Métodos de microondas também apresentam a vantagem adicional de não serem afetados por condições ambientais e de alta precisão, no caso de solo árido e solo com cobertura de vegetação rasteira (JACKSON & SCHMUGGE, 1989; GUHA *et al.*, 2003; JUDGE, 2007)

2.1.11. Identificação por Radio Frequência (RFID)

A identificação por radio frequência é uma tecnologia de identificação automática baseada no uso de etiquetas eletrônicas para armazenar uma pequena quantidade de dados e enviá-los remotamente. Tipicamente o sistema RFID é composto por um sistema de gerenciamento ligado a um transmissor/receptor que se comunica com as etiquetas. Estas, por sua vez, podem ser ativas ou passivas sendo as diferenças principais entre os dois tipos a alimentação interna, maior alcance, tamanho e consequentemente custo nas etiquetas ativas (ZHU *et al.*, 2011).

Existem várias aplicações específicas para o setor agrícola que são estudadas e aplicadas. O principal incentivo é o baixo custo de implementação, o que gera um rápido retorno econômico. RUIZ-GARCIA & LUNADEI, 2011 realizaram uma revisão mostrando as aplicações mais relevantes dos últimos anos. As principais aplicações estão relacionadas ao manejo de animais (MARSH *et al.*, 2008; VOULODIMOS *et al.*, 2010; CHANSUD *et al.*, 2008), monitoramento de clima (HAMRITA & HOFFACKER, 2005; AMADOR *et al.*, 2009), logística (LANIEL *et al.*, 2011), irrigação (VELLIDIS *et al.*, 2008). As aplicações devem levar em conta as diversas frequências disponíveis que vão de 110 kHz até 2,4 GHz que são intimamente ligadas com o alcance (20 cm até 30 m) e consumo energético do sensor.

2.1.12. Rede de sensores

Como visto até aqui, a agricultura de precisão demanda uma intensiva coleta de dados de campo. Por se tratar de um sistema caótico (HIRAFUJI & KUBOTA, 1994), a frequência de aquisição e interpretação pode ser a chave para entender a variabilidade na produção (CAMILLI *et al.*, 2007). Neste cenário, se torna inviável que o acesso aos dados provenientes dos inúmeros sensores espalhados pelo campo, seja feita de forma manual. A solução é interligar estas unidades por meio de uma rede de transmissão de dados sem fio.

A rede de sensores sem fio (Wireless Sensor Network - WSN) compreende diversos componentes chamados nós, os quais se comunicam entre si. Cada nó é um dispositivo inteligente capaz de coletar informações do ambiente e as transmite por meio de outros nós até uma central de processamento. Uma rede de sensores desempenha três funções

básicas: sensoriamento, comunicação e processamento. Há ainda a rede de sensores e atuadores sem fio (Wireless Sensor and Actuator - WSN) a qual é uma variante da WSN que possui um tipo adicional de componente que é um atuador. A inclusão de um atuador aumenta a capacidade da WSN de somente realizar tarefas de monitoramento e passar a executar tarefas de controle (AQEEL UR *et al.*, 2011).

Tecnologias de comunicação sem fio como ZigBee, Bluetooth, Wibree e WiFi são parte de vários trabalhos de pesquisa baseados em redes de sensores. Essas tecnologias apresentam diferentes capacidades e propriedades que podem ser complementares uns aos outros. A tecnologia ZigBee (IEEE 802.15.4) é preferida em relação às outras tecnologias por ser barata e de baixo consumo energético (AQEEL UR *et al.*, 2011). São verificadas diversas aplicações desse tipo de rede, tais como controle e comunicação entre sistemas de irrigação (DAMAS *et al.*, 2001) ou ainda coleta de dados climáticos, como temperatura do ar, luminosidade, concentração de CO₂, e/ou de solo, como, umidade, pH, temperatura do perfil, condutividade. Esses dados são usados para alimentar sistemas de tomada de decisão para irrigação automatizada (MORAIS *et al.*, 2005) ou aplicação de fertilizantes (HE *et al.*, 2011), comunicação, operação e/ou controle de equipamentos (CUGATI *et al.*, 2003; MEJNERTSEN & RESKE-NIELSEN, 2006), controle de vetores (OERKE *et al.*, 2010), além de monitoramento de animais e pastagens (WARK *et al.*, 2007) e estufas (HUI *et al.*, 2007) entre outros (WANG *et al.*, 2006).

2.2. Desenvolvimento de sistemas complexos

Em função das inovações expostas anteriormente, constata-se o crescimento da demanda de especialistas para manejar instrumentos complexos nas operações de aquisição massiva de dados. Por ser um recurso escasso no Brasil, os poucos especialistas aptos devem atuar de forma otimizada em atividades chave, evitando assim grande demanda de tempo em operações repetitivas e exaustivas no campo. Além disto, a escala amostral desejável em confronto com a extensão da atual área agriculturável, torna esta tarefa estafante. Uma das alternativas que merece destaque é o uso de sistemas autônomos para coleta de dados.

Neste ponto é interessante fazer um comparativo entre os objetivos do uso de sistemas autônomos no Brasil e na Europa, Japão ou Estados Unidos. A grande diferença é que nesses países, ao contrário do Brasil, a mão de obra especializada não é um problema e, muitas vezes as operações são realizadas pelo proprietário ou membros da família. Assim, a automação de tarefas pode proporcionar conforto e redução da jornada de trabalho. Além disso, por ser considerado um setor estratégico, o governo fornece subsídios aos produtores (FIGUEIREDO *et al.*, 2010) a fim de garantir a produção e barrar a entrada

de produtos importados. O acesso à tecnologia também é um fator determinante, pois essa geralmente tem um valor inferior ao praticado no Brasil. No Brasil, os sistemas autônomos vêm para suprir a carência de profissionais frente à demanda crescente, além de servir como laboratório para desenvolvimento de tecnologia nacional.

Dentre as áreas de pesquisas de sistemas autônomos a área de veículos não tripulados se destaca. Os robôs móveis foram desenvolvidos e podem operar autonomamente em diferentes ambientes, tais como no ar, água e no espaço externo. Existe um aumento contínuo no interesse de pesquisas acerca de veículos terrestres não tripulados, especialmente para uso nas áreas militar, agrícola e transporte terrestre. Avanços nas áreas de tecnologias de sensoriamento tais como: sistema de posicionamento global por satélites, capacidade computacional; miniaturização de eletrônica; algoritmos inteligentes para planejamento e controle, e também avanços nos projetos mecânicos, possibilitam realizar operações autônomas reais para aplicações que utilizam veículos terrestres não tripulados como visto em YAO *et al.*, 2009 e MOORE & FLANN, 2000.

Salienta-se que em projetos de veículos não tripulados não existem limitações no que concerne ao espaço destinado ao operador do veículo, caso este fosse tripulado. A eliminação do espaço destinado ao operador do veículo pode promover a atribuição de novas características que podem ser incorporadas ao projeto de estrutura destas máquinas, como, por exemplo, configuração de rodas, formato, tamanho, peso, potência, entre outros. Apesar do potencial de maior liberdade de projeto, na literatura são encontrados trabalhos que buscam adaptar máquinas agrícolas comerciais em plataformas agrícolas autônomas (veículos autônomos ou robôs móveis autônomos) e, também, trabalhos em que plataformas são construídas especificamente para serem veículos autônomos ou robôs agrícolas.

No segundo caso, identificam-se dois desafios: desenvolver uma estrutura física adequada ao ambiente agrícola e que atenda às necessidades da aplicação desejada; e desenvolver uma arquitetura eletrônica para integrar os diversos dispositivos presentes em sistemas como esses, bem como permitir sua expansão através da inserção de novos dispositivos.

Devido à complexidade de criar um sistema que englobe tecnologias, métodos e profissionais de múltiplas áreas do conhecimento, faz-se necessária uma base teórica no que cerne ao desenvolvimento de produtos e gerenciamento de atividades. Essa base será útil para delegar funções e definir estratégias durante a fase de criação do novo produto. Em razão disso, a seguir são apresentados os principais conceitos utilizados para o desenvolvimento de produtos e fatores ligados a qualidade do novo produto.

2.2.1. Conceitos de projetos

O processo gerencial é regido por métodos que possibilitam a determinação das reais necessidades dos usuários, o estabelecimento de técnicas de pesquisa e levantamento de dados, além de proceder à identificação dos meios materiais e instrumentos para realização do projeto (WOMACK & JONES, 2003). É importante salientar que os aspectos abordados na tomada de decisão durante a etapa de especificação do produto devem sempre visar atender às expectativas de recursos e custo do usuário. Como os projetos são geralmente grandes e complexos, e demandam a participação de um grupo de profissionais para sua realização, o trabalho deve ser dividido e organizado de forma que sejam definidas como, quando e por quem as atividades serão realizadas, contribuindo assim para o entrosamento da equipe e favorecendo o andamento do projeto (DUFOR, 1996 e DRIVA *et al.*, 2000).

O método utilizado para gerenciar o desenvolvimento do produto deve ser estruturado para incluir um projeto lógico antes de constituir um projeto físico, e abordar os requisitos dos usuários do sistema antes de considerar outras variáveis. Tal método deve ser iterativo, de forma que novas informações possam entrar progressivamente durante o desenvolvimento, à medida que se conhece melhor os requerimentos dos usuários, a fim de corrigir desvios e eventuais falhas.

Analisando os fatos neste contexto, o desenvolvimento de produtos pode ser definido como “O conjunto de atividades envolvendo quase todos os departamentos da empresa, que tem como objetivo a transformação de necessidades de mercado em produtos ou serviços economicamente viáveis” (KAMINSKI, 2000).

2.2.2. Fases de um projeto

Embora cada projeto seja único, as semelhanças entre os projetos de mesma natureza prevalecem sobre as diferenças. Assim, pode-se utilizar os padrões de um projeto anterior para selecionar os componentes relevantes de um novo projeto com características semelhantes. É claro que essa seleção demanda tempo, no entanto, este é consideravelmente menor do que aquele necessário para construir um novo projeto a partir de novos planos e novos padrões.

Apesar da importância do desenvolvimento eficiente do produto ser reconhecida e discutida por diversos autores (MAIDIQUE & ZIRGER, 1984; MCDONOUGH & BARCZAK, 1992; LYNN & AKGUN, 1998; BOUJUT & LAUREILLARD, 2002; FLINT, 2002; OKUDAN & ZAPPE, 2006) há considerável escassez de informações disponíveis e bem organizadas que possam ser úteis aos coordenadores de projeto. Estas informações que serviriam para

orientá-los sobre parâmetros de funcionamento e desempenho a serem adotados, são indisponíveis devido à dificuldade em desenvolver e implementar medidas apropriadas de avaliação e controle (DRIVA et al., 2000).

Autores como WANG *et al.*, 1995; PAHL & BEITZ, 1996; SOUSA, 1998; ALMEIDA, 2001; YAVUZ, 2007; BARBOSA, 2008 dividem as fases do projeto em etapas. Estas visam englobar toda a vida do produto, desde a busca pelas necessidades do mercado, o ciclo de produção e o consumo, até o descarte. Estas estratégias apresentam abordagens e elementos diferentes para delimitar as fases do projeto, sendo que todas dependem de dois fatores comuns: a aquisição de tecnologia e a eficácia do funcionamento desta tecnologia por seres humanos (ALMANNAI *et al.*, 2008). De forma geral, a elaboração de um projeto pode ser dividida nas seguintes partes:

Identificação das Necessidades: visa a coleta de informações referentes aos requisitos a serem cumpridos pela futura solução. Essa fase envolve a elaboração de especificações detalhadas ou lista de requerimentos para a necessidade levantada.

Projeto Conceitual: a estrutura funcional das soluções idealizadas é estabelecida, e são buscados os princípios de solução e sua combinação em variantes de conceito de solução para a necessidade já identificada. As variantes das soluções devem ser julgadas com base em critérios específicos, definidos na fase anterior. Essa fase finda pela eleição do melhor conceito de solução (solução conceitual). No Projeto Conceitual trabalha-se com as necessidades do cliente e as restrições externas e internas, objetivando-se definir o Conceito da Solução. Para tanto, seguem-se os passos:

- a) abstração, a fim de identificar os problemas essenciais;
- b) estabelecimento das estruturas funcionais da solução geral;
- c) definição das sub-funções e busca pelos princípios da solução;
- d) combinação de princípios de solução;
- e) seleção das combinações viáveis;
- f) geração das variantes dos conceitos;
- g) e avaliação das variantes da solução (PAHL & BEITZ, 1996).

Esse processo é predominantemente criativo, além de exigir do projetista o conhecimento de várias disciplinas diferentes, tais como tecnologia, ciências, psicologia, estética, sociologia, história e planejamento (WANG *et al.*, 1995; ALMEIDA, 2001).

Anteprojeto: determina-se a distribuição física do sistema que soluciona o problema, com verificação de funções, tamanho e compatibilidade espacial desse sistema. São delimitadas as características globais e principais do projeto, tais como peso, tamanho e custo final aproximado e potência necessária.

Detalhamento: desmembra-se o projeto em sub-elementos, até os mais simples. Nessa fase procede-se à definição das dimensões finais de todos os elementos componentes do projeto.

Projeto executivo: esta fase tem por objetivo desenvolver a especificação completa do produto, bem como testá-lo e garantir que está pronto para a produção. Este período do desenvolvimento ainda é propício para realização de alterações que se tornarem necessárias, sem prejuízos econômicos. Contudo, o projeto pode ser ainda abandonado caso o produto não possua condições para a produção;

Planejamento da produção / execução: esta fase elabora o planejamento da produção, que inclui a compra de todos os equipamentos e dispositivos necessários, determinação do processo de montagem, qualificação dos fornecedores, mão-de-obra, entre outros;

Planejamento da disponibilização ao cliente: esta etapa tem como objetivo planejar como o produto irá chegar até o cliente; cabe ao projetista, por exemplo, definir a embalagem, o transporte e a divulgação do produto;

Planejamento do consumo ou utilização do produto: o projetista deve também prever como o produto será utilizado ou consumido; o produto deve ser de fácil manutenção, alta confiabilidade, segurança, etc. Informações de campo são extremamente valiosas para que o produto possa ser melhorado;

Planejamento do abandono do produto: o produto pode ser descartado por duas razões: a obsolescência técnica ou o desgaste. O caso ideal acontece quando a obsolescência técnica e o desgaste ocorrem ao mesmo tempo; para isso, o projetista deve utilizar uma tecnologia adequada para reduzir a velocidade da obsolescência, e projetar para que a vida útil coincida com o tempo de utilização.

2.2.3. Tipos de projetos

Segundo ULLMAN, 1992 e PAHL & BEITZ, 1988 todos os produtos que estão no mercado podem ser classificados em três grandes grupos, dependendo da origem de seu desenvolvimento. Esta classificação ajuda a determinar quando se trata de um novo produto ou de um produto melhorado, que em termos legais representa a possibilidade de criação de patentes. De forma geral, a elaboração de um produto pode ser caracterizada da seguinte maneira:

Produto baseado numa nova tecnologia: Estes produtos são considerados totalmente inovadores, pelo fato de serem desenvolvidos a partir de uma nova tecnologia. Quando um produto é baseado em uma nova tecnologia, o risco de fracasso é muito grande, visto a falta de referencial de um produto similar, bem como a falta de conhecimento do

mercado no qual se pretende atuar. Caso este produto seja bem sucedido, o lucro também será muito grande em virtude do fator novidade. Durante este processo, o trabalho é sigiloso, com o objetivo de evitar a divulgação prévia de informações e, como o consumidor ainda não foi identificado claramente, os problemas e atitudes que poderiam ser decorrentes do uso desta nova tecnologia são prevenidos.

Produto baseado na integração de tecnologias existentes: Trata-se de produtos novos, sem semelhantes no mercado, cujas tecnologias ou sistemas utilizados em sua criação já existem no mercado e podem ter sido desenvolvidas por outras companhias ou não. Estas tecnologias podem ser terceirizadas ou adquiridas nos locais de venda especializada, de acordo com as necessidades específicas. Esta aquisição de tecnologia deve-se ao fato de que, em muitos casos, é mais barato utilizar e/ou adaptar as tecnologias existentes para estes produtos, do que desenvolver uma própria, tornando-os mais acessíveis e competitivos.

Produtos baseado em projetos já existentes: São produtos que foram lançados no mercado e que constantemente são sujeitos a melhorias. Esta categoria de desenvolvimento de produtos é a mais frequente e normalmente ocorre quando o produto está na fase de maturidade do seu ciclo de vida. As melhorias aplicadas a um produto podem ocorrer em diferentes graus, dependendo da intenção do reprojeto. Segundo GURGEL, 1995, podem ser feitas unicamente pequenas melhoras, onde o trabalho se direciona a uma única parte do produto atual, ou podem ser aplicadas melhorias de maior abrangência, onde quase a totalidade das partes ou sistemas é incluída no programa de melhoria. Em ambas as situações, o produto passa a ser quase sempre considerado, pelo mercado, como a criação de um novo produto. O reprojeto sempre busca tornar o produto mais eficiente, mantendo suas qualidades e características e eliminando seus problemas.

2.2.4. Projeto de sistemas robóticos móveis

Tendo em mente os principais conceitos e tipos de projetos que podem ser realizados, torna-se mais fácil definir uma estratégia de gerenciamento. Entretanto, em se tratando de sistemas robóticos, existem fatores técnicos que dificultam sua realização. O projeto de um sistema robótico móvel é difícil e complexo devido à sua natureza interdisciplinar e aos requerimentos de operação em tempo-real (JUNKER, 1995 ; TREVELYAN, 1997 ;YAVUZ, 1999). Assume-se que robôs móveis são projetados, construídos e testados em todo o mundo. Porém, apesar desta popularidade, a discussão a respeito da complexidade do projeto estrutural e dos mecanismos básicos de funcionamento é frequentemente obscura ou concentra a menor porção do foco do trabalho (DENG *et al.*, 2000).

YAVUZ, 2007 realizou uma análise na literatura com o objetivo de indicar as áreas em que há maior foco de pesquisas com relação a sistemas robóticos. Os principais tópicos e os artigos relacionados foram:

- **Mecanismos de tomada de decisão:** MEDLAND & MULLINEUX, 2000; GULDNERA *et al.*, 1995; KURZ, 1995; LEE, 2003; PETERSON & COOK, 2003; STER, 2004; YAVUZ & BRADSHAW, 2002
- **Sub-sistemas de aquisição de dados:** MEDLAND & MULLINEUX, 2000; BÜHLER *et al.*, 1995; GU & DE SILVA, 2004; KOPETZ, 1995; SHIMAKAWA *et al.*, 2001
- **Sub-sistemas de processamento de dados e sinais:** MEDLAND & MULLINEUX, 2000; BÜHLER *et al.*, 1995; KOPETZ, 1995; SHIMAKAWA *et al.*, 2001; BENET *et al.*, 2005; ISERMANN, 1996; KAZYS *et al.*, 2000; MAJUMDER *et al.*, 2001; MIHAYLOVA *et al.*, 2003; WINTERS & SANTOS-VICTOR, 2002
- **Sub-sistemas de controle adaptativo e Inteligência Artificial:** MEDLAND & MULLINEUX, 2000; GULDNERA *et al.*, 1995; KURZ, 1995; YAVUZ & BRADSHAW, 2002; DAS *et al.*, 2006; DONG, 2002; GU & HU, 2002; KIM *et al.*, 2003; KLAS & ROLF, 1999; POURBOGHRAT & KARLSSON, 2002
- **Sub-sistemas de hardware computacional:** MEDLAND & MULLINEUX, 2000; BÜHLER *et al.*, 1995; SHIMAKAWA *et al.*, 2001; KRÖSE *et al.*, 2000; LACAGNINA *et al.*, 2003; ULRICH *et al.*, 1997; YILMA & SEIF, 1999
- **Sub-sistemas de software operacional e relacionados:** SHIMAKAWA *et al.*, 2001; FERNANDEZ & GONZALEZ, 1999; THOMPSON *et al.*, 2006; ULRICH *et al.*, 1997
- **Software de estrutura de controle e pesquisas relacionadas:** GULDNERA *et al.*, 1995; YAVUZ & BRADSHAW, 2002; KLAS & ROLF, 1999; NING & YANG, 2006; XU & VAN BRUSSEL, 1997
- **Sistemas de sensoramento e pesquisas relacionadas:** MEDLAND & MULLINEUX, 2000; KURZ, 1995; KOPETZ, 1995; KAZYS *et al.*, 2000; LAWITZKY *et al.*, 1995; SANDINI *et al.*, 1996
- **Sistemas de atuadores e seus sub-sistemas:** MEDLAND & MULLINEUX, 2000; BÜHLER *et al.*, 1995; MATTIAZZO *et al.*, 1995.

Embora os tópicos abordados na lista acima não sejam restritos, um projeto não precisa necessariamente abordá-los em totalidade. A abordagem pode ser parcial, ou ainda englobar outras áreas de conhecimento. Isso demonstra claramente a complexidade que envolve o projeto, o desenvolvimento e a implementação prática de um robô móvel autônomo, particularmente em termos de variedade de áreas interdisciplinares (JONES *et*

al., 1998). Cada um dos subsistemas acima contribui para a funcionalidade geral do sistema, podendo aumentar o rol de aplicações e, de forma geral, sua sofisticação. No entanto, eles também contribuem com a complexidade do problema de projeto, tornando-se uma tarefa difícil para o engenheiro de projeto. Como resultado disto, não há muitos robôs em serviço ou em uso doméstico, como as projeções feitas na década de 1980 e 1990 afirmavam (BRADBEER, 1985; PURSER, 1985; REEKIE, 1985 apud YAVUZ, 2007) e, posteriormente, relatado por TREVELYAN, 1997.

A etapa mais complexa no projeto de um sistema de inteligência robótica é provê-lo com a habilidade necessária para sensoriar mudanças ambientais e se auto adaptar por meio de decisões inteligentes feitas automaticamente por um conjunto de tarefas. Isto requer a avaliação de funções complexas que operem ambos de forma rápida e eficiente, em tempo-real. Muitas funções incluem ferramentas de processamento de sinal, entradas e saídas em formato analógico e digital, inteligência artificial rápida baseada em tomada de decisão, rápidos sistemas computacionais, entre outros. Portanto, é evidente que a implementação em tempo-real para um robô autônomo inteligente requer a utilização de várias funções complexas.

2.2.5. Funcionalidades de sistemas robóticos móveis

A função de um robô móvel pode ser descrita como o sensoriamento inteligente das sequências de tarefas de tomada de decisão e atuação (JONES *et al.*, 1998). Aqui, dependendo da complexidade do procedimento de sensoriamento e atuação, vários níveis de tarefas computacionais são empregadas, variando de microprocessadores com simples estruturas de controle reativo até estruturas complexas com sistemas deliberativos (ARKIN, 1998; OREBÄCK & CHRISTENSEN, 2003), ou ainda os altamente populares sistemas híbridos, que são uma combinação dos dois (ARKIN, 1998; OREBÄCK & CHRISTENSEN, 2003; YAVUZ, 1999).

Os sistemas móveis precisam superar problemas relacionados à limitação de recursos computacionais e alimentação, devido às restrições relacionadas com a mobilidade do sistema. Recorrente a este aspecto, o desafio inerente é projetar esses complexos sistemas com configuração móvel com baixo consumo de energia, mantendo o alto poder computacional, claramente requerido.

Na fase inicial do processo de concepção, a primeira vista, parece necessário que se defina a funcionalidade, a arquitetura de controle, a capacidade de detecção, o tamanho do robô, a alimentação a bordo e outros requisitos de projeto. No entanto, a seleção de uma arquitetura de controle não é simples, pois a compatibilidade e a adequação de qualquer escolha é dependente da interação do subsistema de interesse com o sistema global, bem

como seu desempenho ao executar sua tarefa. Para esclarecer este ponto, YAVUZ, 2007 verificou, com base em resultados provenientes de uma análise de causa-efeito, as interações existentes no sistema de um típico robô móvel autônomo. O argumento que se refere à dificuldade em selecionar uma arquitetura de controle é corroborado com uma seleção de fatores típicos de projeto, que são listados na Figura 1. Esses fatores também são utilizados na determinação dos resultados intermediários. Estes resultados por sua vez habilitam fatores globais como custo, tamanho, alimentação, desempenho e complexidade do ponto de vista da estrutura global.

A análise apresentada na Figura 1 ilustra que fatores de projeto geram complexas relações de causa e efeito, consequentemente resultando em conflitos. É importante ressaltar que cada função adicionada ao sistema aumenta sua complexidade geral, uma vez que cada função requer, de alguma forma, módulos de hardware e software, bem como alimentação adicional, tornando o projeto mais difícil. A análise apresentada na Figura 1 indica que um bom projeto para um robô móvel depende de um equilíbrio entre os fatores citados acima com as funções requeridas. Este, por sua vez, sugere a necessidade de uma metodologia sistemática para a concepção, desenvolvimento e integração de sistemas nos diversos estágios do processo de desenvolvimento.

É amplamente aceito que as tomadas de decisões nas fases iniciais do projeto são críticas com relação ao desempenho do sistema (HSU & LIU, 2000). Por esta razão, todos os meios de seleção ou identificação de especificações de componentes e respectivas decisões são realizados posteriormente. Desta forma, o projeto conceitual é mantido no nível mais abstrato, habilitando assim a solução que cubra a mais vasta área de aplicação possível, a fim de eliminar vários problemas de projeto, como sugerido por HSU & LIU, 2000.

A fase inicial do processo de desenvolvimento requer a determinação das necessidades do projeto. A necessidade é definida como um robô móvel autônomo capaz de atender às especificações de um robô de uso. Para que um sistema flexível possa ser adaptável e executar tarefas nessas áreas de aplicação, estes sistemas contam com a capacidade de seguir um caminho, aprender padrões e se auto-adaptar a alterações dinâmicas do ambiente. Assim, uma definição típica de tal dispositivo poderia ser resumida da seguinte forma:

Um dispositivo autônomo capaz de se movimentar por um ambiente, aprender um padrão e autonomamente repetir esse padrão, além da capacidade de modificar este padrão para lidar com mudanças dinâmicas no ambiente (YAVUZ, 2007).

Figura 1. Causa e efeito dos fatores de projeto (adaptado YAVUZ, 2007).

A definição acima abrange a maioria das necessidades que um robô móvel tem para atingir seus alvos de aplicação. No entanto, ela não contém nenhuma informação específica sobre o ambiente ou o próprio robô, sendo, portanto, uma definição que cobre uma ampla gama de áreas de aplicação para robôs móveis com inúmeras configurações possíveis do sistema. Um típico robô móvel, como descrito acima, emprega três funções principais: mobilidade, navegação e autonomia, o que proporciona um sistema capaz de gerar movimento, e quando necessário realizar manobras, com base em tomadas de decisão próprias.

Modificando-se a estrutura funcional convencional de forma a reorganizar os pesos que cada uma das três funções principais terá na arquitetura robótica, é possível deslocar certas atividades que seriam realizadas por uma função, para outra. Por exemplo, a fim de reduzir a carga computacional do robô, é possível transferir algumas tarefas que seriam realizadas pelas funções de navegação e autonomia, simplesmente adequando alguma parte mecânica do robô com o intuito de fornecer melhor mobilidade ao sistema. Da mesma forma, muitas outras sub-funções podem ser transferidas de uma função principal para outra com o objetivo de facilitar a tarefa de concepção, além de distribuir uniformemente a carga sobre estas funções.

2.2.6. Necessidades de um sistema robótico móvel agrícola

Como relatado anteriormente, a eminente necessidade de robôs agrícolas no mercado tem incentivado a realização de diversas pesquisas nesta área. Contudo, o escopo das pesquisas foca no desenvolvimento individual do projeto de cada robô, e não nas necessidades da agricultura em relação aos robôs. Segundo BLACKMORE *et al.*, 2007, esta condição faz com que os projetos de robôs não atinjam o nível máximo de qualidade possível. Assim, para tal realização, uma das técnicas que pode ser aplicada é a análise deste nicho sob múltiplas perspectivas, a qual possibilita uma visão sistêmica dos pontos fortes e fracos do projeto.

Entretanto, a técnica proposta por BLACKMORE *et al.*, 2007, requer ideias radicais e pensamentos laterais para a obtenção de sucesso. Para exploração desta ideia, o autor identifica oito perspectivas que devem ser abordadas no desenvolvimento de um robô agrícola. São elas: segurança, energia, economia, meio ambiente, gerenciamento, mecanização, tecnologia e sociedade, conforme apresentado na Figura 2. Entretanto, é preciso ter em mente que as funcionalidades de um sistema robótico estão entrelaçadas entre si, e que a escolha de um determinado parâmetro pode interferir nos demais, como foi descrito anteriormente. Assim, é necessário estipular com clareza quais são os pontos chave que devem ser atendidos para que o projeto executado atenda suas expectativas.

Figura 2. Visão sistêmica do robô agrícola (adaptado BLACKMORE *et al.*, 2007).

Segurança

O quesito segurança deve ser observado de distintas perspectivas, a fim de garantir que as operações realizadas pelo robô não causem nenhum tipo de dano a terceiros, a cultura, ao meio ambiente ou a si próprio. Os danos a terceiros estão relacionados com pessoas, animais ou objetos que possam ser afetados durante o transporte, operação e até durante o período que o robô estiver desativado. Considerando-se que o robô não é tripulado e poderá trabalhar por longos períodos de tempo, se comparado a operações que requerem operadores, sua programação deve garantir que, no caso de dúvida na interpretação de qual operação deve ser feita, a decisão deve ser a que tenha menor probabilidade de ocorrência de um acidente.

Os danos à cultura e ao meio ambiente focam na competência do robô em executar as missões programadas, sem comprometer a produtividade da cultura, ou causar algum tipo de avaria nas plantas, os quais possam dificultar as etapas seguintes do ciclo produtivo, como plantio, cultivo ou colheita. Alguns exemplos são: a área de contato do pneu deve garantir que não haja compactação do solo; o vão livre entre o solo e a base do robô deve ser suficiente para atender a todos os estágios da cultura em que haverá intervenção; não descartar materiais contaminantes no meio ambiente.

Os danos a si próprio focam em evitar situações que possam prejudicar a integridade e o funcionamento do robô. Entre as situações que devem ser evitadas pode-se citar o

choque do robô com postes ou outras unidades, e ainda, a entrada em valas inundadas. Outros pontos que devem ser considerados nesta perspectiva são: a prevenção de roubo e a falha parcial no funcionamento dos seus sistemas deve ser gerenciada por uma arquitetura de controle hierárquica que preze pela segurança do conjunto.

Energia

Nesta perspectiva, é abordada a eficiência no uso de energia durante as diferentes tarefas que serão desempenhadas, e ainda a possibilidade de o robô apresentar autonomia energética. A quantidade de energia a ser utilizada deve ser a menor possível para a realização de determinada tarefa. O conceito de autonomia energética visa o funcionamento do robô através de energia obtida em seu local de trabalho. Por exemplo, um robô híbrido munido de um sistemas de baterias ligadas a um motor movido a biocombustível poderia ser capaz captar do meio-ambiente a matéria prima para produção de sua energia, processar esse material tendo energia por tempo indeterminado.

Economia

Sob a perspectiva econômica, durante o desenvolvimento do projeto deve considerar-se, entre outros fatores, o custo da aquisição de um robô em função do benefício gerado nas tarefas por ele desempenhadas. Dependendo das tarefas a serem desempenhadas existe a necessidade de que o robô possua componentes de custo elevado, como é o caso de sensores, computadores e sistema de posicionamento global cinemático, o que pode inviabilizar economicamente seu uso. Contudo, quando se considera a substituição permanente do custo da mão-de-obra e a precisão na execução das tarefas, o alto investimento inicial será abatido ao longo do tempo.

Meio Ambiente

É inegável que a utilização de robôs para realização de operações agrícolas causará impacto ao meio ambiente, podendo esse ser positivo ou negativo. Um exemplo de impacto positivo é a possibilidade da aplicação de insumos de forma pontual, respeitando a necessidade de cada planta. Um exemplo de impacto negativo é a possibilidade de dano ao solo, devido compactação excessiva gerada pelo aumento no tráfego e/ou em condições não adequadas. Nesse sentido, é importante que o projeto garanta condições para o robô e para seu usuário contornarem os resultados negativos. Uma forma de fornecer recursos de gestão ao usuário e assim maximizar os impactos positivos, é o uso de sensores específicos para mensurar condições ambientes e da cultura. Já os efeitos negativos podem ser reduzidos se feito uma correta gestão do uso do robô.

Gerenciamento

O projeto do robô deve garantir a facilidade de gerenciamento. Considerando-se a quantidade de decisões que um robô autônomo deve tomar durante seu processo operacional, sua lógica de decisões deve ser de fácil entendimento e apresentar flexibilidade suficiente para ser modificada por seu gerente. Além disto, deve apresentar a possibilidade de uma reprogramação geral do robô, permitindo que ele desempenhe a atividade que seu gerente decida e não somente as atividades inicialmente propostas na sua programação básica.

Outras funcionalidades que facilitem a interação entre o gerente e o robô podem ser consideradas, como por exemplo, durante o monitoramento da plantação qualquer irregularidade encontrada pelo robô pode ser registrada para análise subsequente do gerente, possibilitando assim a não necessidade de tratamentos profiláticos e se identificado suficientemente cedo, problemas futuros podem ser remediados. Esta atividade permite o racionamento de recursos econômicos e ambientais.

Mecanização

Sob esta perspectiva, deve ser considerada como uma necessidade do sistema mecanizado do robô que o projeto seja mais focado à planta do que os existentes atualmente. A maior parte das máquinas agrícolas é projetada para atender simplicidade e robustez, porém robôs autônomos podem utilizar as vantagens da abordagem mecatrônica para realizar um trabalho melhor. Para obter sucesso, o projeto do sistema de mecanização centrado à planta deve considerar as três fases principais do ciclo da cultura, as quais são o plantio, o manejo e a colheita.

Tecnologia

O nível de autonomia que um robô deve apresentar, sua confiabilidade baseada em sistemas computacionais e a arquitetura de seu sistema são itens que devem ser considerados sob a perspectiva de tecnologia.

Sociedade

Sob esta perspectiva, deve ser considerada a aceitação do robô pela sociedade. Inicialmente o processo de automação das atividades agrícolas encontrará algumas barreiras. Estas se devem à resistência natural que existe neste setor no que tange a mudanças no método gerencial. A partir do momento em que os robôs passarem a ser vistos não como uma ameaça física às pessoas e passarem a ser parte do sistema, a tendência é que seu uso se intensifique. Inevitavelmente, os robôs irão substituir seres humanos nas tarefas diárias, o que poderá causar problemas morais a diversas pessoas.

Após o entendimento das diferentes perspectivas pode-se visualizar melhor as vantagens, desvantagens e possíveis implicações do uso de robôs.

2.2.7. Ferramentas de qualidade

Como apresentando anteriormente, uma das grandes dificuldades na execução de um projeto, seja esse um novo produto ou a melhoria de um produto já existente, é identificar as necessidades do cliente e transformar essas necessidades em requisitos de projeto. Diversos métodos que auxiliam durante o processo de desenvolvimento estão disponíveis, como pode ser visto em LIAO, 2005. Um dos métodos mais abrangentes e utilizados é o *Quality Function Deployment* ou Desdobramento da Função Qualidade e o modelo Kano.

2.2.7.1. Quality Function Deployment – QFD

Segundo PRASAD, 1998 e LIAO, 2005 durante a década de 1960, Yoji Akao explorava maneiras de projetar produtos corretamente, quando análises mais profundas em um diagrama de espinha de peixe, o levaram a uma matriz para identificar os elementos de projeto que iriam impactar a satisfação do cliente da melhor maneira possível. Foi assim, que ele se tornou um dos fundadores do QFD.

Conforme definição de AKAO, 1990, o QFD é um método para transformar as necessidades do usuário em qualidade do projeto, é desdobrar as funções para formar qualidade, é garantir qualidade em cada fase do desenvolvimento do produto, é alcançar a qualidade desejada nos subsistemas, componentes e elementos específicos, começando pelo projeto. Em outras palavras, as necessidades das várias partes interessadas são transformados em uma descrição dos parâmetros de projeto técnico.

Contudo, existem várias dificuldades na sua aplicação, entre as quais se destacam a interpretação da voz do cliente, a definição das correlações entre a qualidade exigida e as características qualitativas (CHAN & WU, 2005; CHAN & WU, 2002), a definição da qualidade do projeto, as características de qualidade (RAMASAMY & SELLADURAI, 2004), a dificuldade em trabalhar em equipe, e a falta de conhecimento sobre o uso do método (MARTINS & ASPINWALL, 2001; CARNEVALLI & MIGUEL, 2008; ALMANNAI *et al.*, 2008).

Por ser uma ferramenta voltada para atender às necessidades dos clientes, e por ser utilizada por mais de quatro décadas, a utilização do QFD é extensamente abordada pela literatura. Diversos autores (HAUSER & CLAUSING, 1988; KING, 1989; AKAO, 1990; KANEKO, 1991) desenvolveram ou adaptaram soluções ligadas ao QFD. É possível utilizar um dos diversos métodos e modelos disponíveis no desenvolvimento de robôs como visto

em NASSIRAEI & ISHII, 2007; YAVUZ, 2007; ALMANNAL *et al.*, 2008. Por ser um sistema de qualidade que mescla sistemas de pensamento com elementos psicológicos e de conhecimento, o QFD provê um sistema para entendimento de diversos processos, entre eles:

- Entendimento das reais necessidades do cliente através de sua própria perspectiva;
- O significado de valor para o cliente, através de sua própria perspectiva;
- Entendimento de como o cliente se torna interessado, escolhe e fica satisfeito;
- Decidir quais atrativos incluir;
- Determinar o nível de desempenho a ser entregue;

De acordo com o apresentado, é possível afirmar que a definição operacional do QFD engloba duas noções chaves. A primeira delas é a tradução dos requisitos externos para os requisitos internos. A segunda é o desdobramento dos requisitos por meio das funções em um universo com alta qualidade na tradução e comunicação dos objetivos originais do cliente. Do ponto de vista do desenvolvimento de um produto, por atuar nas fases iniciais do projeto, o QFD proporciona a ocorrência de menor quantidade de mudanças e conseqüentemente redução no tempo, custo e incompatibilidades na concepção do produto (JUNIOR, 2010). As especificidades do processo de QFD descritas por AKAO, 1990 e CHAN & WU, 2005 e citado por SØRENSEN *et al.*, 2010 incluem os seguintes passos:

Passo 1: identificação do cliente

A primeira etapa envolve a identificação dos clientes em termos de operadores e gestores do produto proposto. O número de clientes entrevistados é importante para o equilíbrio entre os custos da entrevista e da análise e os benefícios de identificar de forma mais completa os requisitos de projeto e sua importância. GRIFFIN & HAUSER, 1993 mostraram que, a fim de identificar os 90-95% das necessidades do cliente, 20-30 entrevistas são suficientes em muitos casos.

Passo 2: requisitos do cliente

O objetivo do passo 2 é desenvolver uma lista de exigências dos clientes que podem afetar o projeto e o desempenho operacional do produto proposto e identificar os pré-requisitos, como a presença de supervisão humana. Normalmente, é grande o número de requisitos de projeto identificados pelo cliente. Tendo esse fator em vista, há a necessidade de agrupar estes requisitos em categorias principais, cada uma contendo um número de sub-requisitos.

Passo 3: Priorizar os requisitos dos clientes

Um passo importante no processo de QFD é a atribuição de importância relativa (como percebida pelo cliente) para cada exigência. Deste modo, um fator de ponderação é gerado para cada requisito e este fator vai dar ao projetista uma idéia de quanto tempo, esforço e dinheiro especificamente deve ser dedicado à cada requisito. Uma medida geralmente utilizada é uma escala de 5 pontos, definidos como segue: 1 = nada importante, 2 = pouco importante, 3 = importante, 4 = muito importante, e 5 = extremamente importante. A determinação da importância relativa inclui calcular a média das percepções dos clientes para cada requisito de projeto identificado.

Passo 4: Identificação de parâmetros de projeto

É realizado um workshop, ou uma reunião com os responsáveis pela execução do projeto a fim de identificar parâmetros de projeto. A escolha dos participantes deve ser tal que privilegie a existência de uma vasta gama de conhecimentos técnicos. A primeira parte do workshop deve ser usada para explorar todos os possíveis parâmetros de projeto que poderiam contribuir para o cumprimento dos requisitos do cliente. Posteriormente, os mesmos parâmetros de projeto devem ser divididos em categorias principais de forma a tentar minimizar a quantidade total de parâmetros de projeto.

Passo 5: Determinação de relacionamentos

Os graus de relacionamento entre as necessidades do utilizador e os parâmetros de projeto identificados devem ser determinados da seguinte maneira: primeiro, um entendimento comum da tarefa de classificação das relações deve ser estabelecida. Em seguida, cada relação deve ser elaborada em termos de características técnicas, custos envolvidos, entre outros, e classificados de acordo com o consenso.

Passo 6: Correlação entre os parâmetros de projeto

Os graus de correlação entre os parâmetros de projeto devem ser avaliados. Correlações positivas indicam que o veículo será de fácil construção, pois todos os parâmetros de projeto estão puxando na mesma direção. No entanto, correlações negativas indicam que uma solução terá de combinar os parâmetros de concepção conflitantes em um único veículo. Se este for o caso, uma solução sugerida seria a de dividir o projeto e o desenvolvimento de dois veículos especializados em separado para os dois grupos de clientes diferentes.

A pontuação relativa estimada para cada um dos parâmetros de projeto de ser classificada. Intervalos das pontuações relativas devem ser determinados, baseados em diferentes grupos de pontuação dos parâmetros de projeto, utilizando um agrupamento

hierárquico. Uma análise de agrupamento deve ser utilizada para obter e atribuir a cada um dos parâmetros de projeto dentro de um diferente grupo de importância (MARDIA *et al.*, 1979).

2.2.7.2. Modelo Kano

O modelo Kano é uma ferramenta utilizada para o entendimento da importância de cada atributo de qualidade dado pelo cliente, e é descrita em KANO, 1984. Este modelo cita que o contentamento do cliente pode aumentar extremamente, a partir de um pequeno melhoramento em uma determinada característica no produto, enquanto que para outra característica o contentamento aumenta pouco, mesmo que este melhoramento seja extraordinário.

O modelo de Kano ilustra a relação entre a satisfação do cliente e o desempenho de um produto ou um serviço. Como mostrado na Figura 3, o eixo-x mostra a quantidade que um elemento de qualidade é fornecido ao cliente. Quanto mais a seta se move para a direita, maior é a quantidade de parâmetros de projeto oferecidos que aumentam a qualidade final do produto, enquanto que quanto mais a seta se move para a esquerda, menor a qualidade final do produto. Vale salientar que isso não é necessariamente relacionado com a satisfação do cliente. A satisfação do cliente é indicada no eixo-y. Quanto maior a seta da parte superior, maior a satisfação do cliente, enquanto que quanto menor a seta da parte inferior, maior a insatisfação do cliente (LEE & HUANG, 2009).

Figura 3. Modelo Kano (adaptado LEE & HUANG, 2009).

O modelo de Kano divide características do produto ou serviço em cinco categorias distintas, sendo que cada uma delas afeta os clientes de uma maneira diferente. As cinco

categorias de atributos de qualidade propostos por Kano são (KANO et al., 1984; LEE & HUANG, 2009):

Atributo de qualidade atrativa (*attractive quality attribute*): Quando esse elemento é suficiente, os clientes se sentem satisfeitos, mas continuam satisfeitos se o elemento não for suficiente. São os mais difíceis de serem descobertos. Eles não são esperados, estão além das expectativas dos clientes e, quando encontrados, são extremamente satisfatórios. A ausência de um requisito excitante não é insatisfatória para o cliente, uma vez que este não era esperado.

Atributo de qualidade unidimensional (*one-dimensional quality attribute*): Se esse elemento é suficiente, os clientes se sentem satisfeitos. A insuficiência deste elemento resulta em insatisfação. São aqueles normalmente encontrados quando se pergunta ao cliente o que ele deseja. Este tipo de requisito satisfaz (ou não satisfaz) proporcionalmente à sua presença ou ausência. Neste tipo de requisito a satisfação é linear e bidirecional, por isto em alguns casos são chamados de requisitos lineares.

Atributo de qualidade esperado (*expected quality attribute*): o aumento da quantidade deste elemento não vai resultar em maior satisfação, mas a insuficiência deste elemento resulta em insatisfação. São os que o consumidor não pensaria em mencioná-los, até o momento em que ele não é encontrado no sistema. A presença no sistema vai do encontro da expectativa, mas não satisfaz ao cliente. Sua ausência, no entanto, causa muita insatisfação.

Atributo de qualidade indiferente (*indifferent quality attribute*): Independentemente de esse elemento ser ou não suficiente, isto não vai alterar a satisfação do cliente. Não importa se ele atende ou não às expectativas, pois, da mesma forma, não gera satisfação nem tampouco insatisfação.

Atributo de qualidade reverso (*reverse quality attribute*): Ocorre insatisfação quando é suficiente e o contrário acontece quando é o suficiente. São aqueles que mostram que o julgamento a priori sobre o que é funcional e disfuncional no questionário em relação ao atributo, é justamente o reverso do que o cliente realmente sente. Requisitos questionáveis demonstram uma contradição nas respostas dos clientes nas partes funcional e disfuncional do questionário.

Uma observação referente ao Modelo de Kano está na mudança das necessidades com o passar do tempo: o que foi um atributo atrativo ontem é um atributo de desempenho hoje, e será um atributo obrigatório amanhã. Como exemplo, podemos citar a presença de câmera fotográfica em celulares.

2.3. Histórico dos robôs na agricultura

A seguir é apresentada uma revisão de pesquisas realizadas com robôs para aplicação agrícola. Essa informação serve como ponto de partida para a definição da estrutura a ser construída.

2.3.1. Veículo Autônomo para Tratamento de Culturas

O veículo “Autonomous Crop Treatment Vehicle - Veículo Autônomo para Tratamento de Culturas” foi desenvolvido pelo Grupo de Robótica e Automação do atualmente extinto Instituto de Pesquisa de Silsoe - Reino Unido (Silsoe Research Institute – SRI), consiste em uma plataforma robótica para ser utilizada especificamente em horticultura, como descrito em HAGUE *et al.*, 2000 e HAGUE & TILLET, 1996. Esta plataforma emprega métodos de sensoramento da camada superficial do solo a fim de obter características locais específicas. Neste caso as plantas são usadas para corrigir a posição do veículo, ao contrário da maioria dos outros veículos que utilizam sistema de posicionamento absoluto para a localização, baseados em satélites como o GPS. Foram empregados sensores distribuídos em várias categorias, sendo elas: medição de movimento (odometria e inercial), pontos de referências artificiais, (posicionamento utilizando laser, onda de radar milimétrica) e detecção de características locais (sonar, visão de máquina). Foi dado ênfase em tecnologias que obtiveram sucesso no campo da agricultura, além da tecnologia de visão computacional, devido à sua atual importância no campo da robótica

Esta abordagem alternativa permitiu uma resolução muito mais fina da área de cultivo, chegando ao tratamento no nível de plantas individuais, exigindo pouco conhecimento prévio do campo, exceto uma estimativa da geometria de plantio. Este conceito foi nomeado por HAGUE & TILLET, 1996 de “*Plant Scale*” (escala de planta). Devido à alta segmentação das operações, a escala de planta pode ser muito lenta. Assim, foi desenvolvido um veículo autônomo como uma plataforma de operação experimental. Além de fornecer informações de orientação, o acompanhamento do padrão das fileiras de cultivo permitiu a distinção entre tipos de plantas, inferindo-se que plantas fora do padrão de plantação são ervas invasoras. Para fins práticos, foi desenvolvido um dispositivo para aplicação de herbicida acoplado à plataforma. Este consiste em uma série de bicos de aplicação comandados por válvulas solenóide que eram ativadas individualmente de acordo com as informações adquiridas pelo sistema.

O veículo utilizado nos experimentos possui fabricação comercial destinada ao cultivo de hortaliças. A energia é fornecida por um motor a gasolina com duas rodas motrizes localizadas na parte dianteira do veículo acionadas por meio de unidades independentes de transmissão hidrostática. A velocidade de rotação das rodas é medida por

meio de encoders incrementais, fixados junto às rodas. Na parte traseira do veículo são utilizadas duas rodas modelo *castor wheel*. A guiagem é do tipo diferencial, onde o controle da direção é feito variando a velocidade de rotação das duas rodas motrizes. Esta configuração é apropriada para automação, uma vez que tanto a velocidade como a direção do veículo podem ser constantemente variadas por meio do controle do deslocamento angular dos eixos das duas unidades hidrostáticas. O controle é feito por meio de dois servo motores auxiliares, equipados com potenciômetros. Os motores foram fixados nas válvulas de controle de fluxo de óleo dos sistemas hidrostáticos. O veículo pode ser visto na Figura 4 a esquerda, e uma imagem fragmentada pode ser visto na Figura 4 a direita.

Figura 4. Veículo Autônomo para Tratamento de Culturas.

2.3.2. Robô Capinador

O Robô Capinador (The weedy robot da Faculty of Engineering and Computer Science) foi desenvolvido pela Faculty of Engineering and Computer Science da University of Applied Sciences - Osnabrueck – Alemanha. Este consiste em uma plataforma para ser utilizada no controle mecânico de plantas invasoras, como descrito em RUCKELSHAUSEN *et al.*, 2006. Segundo os autores, o desenvolvimento da plataforma engloba diversas áreas de conhecimento, entre elas, tecnologia de sensores para detecção de culturas, atuadores para controle de plantas invasoras, linhas de execução, processo de mudança, tecnologia automotiva, engenharia de sistemas e aspectos de aplicação.

Assim como outras plataformas, esta utiliza métodos que analisam a superfície do solo e o conjunto de plantas que estão sobre ele. Assim, cada planta é analisada e tratada individualmente. Os autores nomearam essa metodologia de “Single-plant farming” (agricultura de planta). Para isto foram empregados na construção da plataforma sensores para detecção da cultura, sendo a complexidade da operação detectar e distinguir a cultura principal de plantas invasoras. Em situações com baixa infestação de plantas invasoras, é

possível empregar soluções ópticas, as quais são caracterizadas pela confiabilidade, baixo custo e alta velocidade de processamento.

Alguns resultados da aplicação de técnicas de processamento de imagem em casos onde existe sobreposição de plantas podem ser encontrados em ASTRAND & BAERVELDT, 2005. Os autores utilizaram câmeras CCD para aquisição de imagens e por meio de um algoritmo realizaram o processamento destas em tempo real. Esse método possibilita a transferência reduzida de dados entre a plataforma e uma eventual central de comando, pois não transfere imagens. Outro sistema eficaz consiste em uma cortina de luz como descrito em Fender et al. 2005, capaz de informar a geometria da imagem. Após o reconhecimento da imagem, atuadores mecânicos realizam a remoção de plantas invasoras. O design modular do sistema permite ainda que outros atuadores sejam integrados, como por exemplo, enxada rotativa, pulverizador e laser. Os parâmetros de controle, bem como as informações da área ou equipamento transitam por meio de uma interface usuário/máquina via rede sem fio.

Os componentes utilizados para implementar a plataforma, tais como gerador, motor de acionamento e sistema de direção, são disponíveis comercialmente. O veículo possui quatro rodas motrizes acionadas por meio de motores elétricos. A velocidade de rotação das rodas é medida por meio de encoders incrementais, fixados junto às rodas. A guiagem usa o método Ackerman nas quatro rodas para controle da posição. Esta configuração possibilita agilidade em manobras. O Robô Capinador pode ser visto na Figura 5.

Figura 5. Robô Capinador.

2.3.3. Trator Autônomo

Este veículo (Trator Autônomo - Autonomous tractor) foi desenvolvido inicialmente pelo Centre for Precision Farming da University of Copenhagen Ørsted – Dinamarca. O projeto foi iniciado no ano de 2001 com o intuito de desenvolver robôs para operarem em

ambientes externos e não controlados. Os estudos iniciaram visando a construção um trator que pudesse realizar algumas operações de forma automática. Posteriormente, novas funcionalidades foram inseridas ao protótipo, como implementos automatizados. Segundo os autores (MEJNERTSEN & RESKE-NIELSEN, 2006; MOGENSEN et al., 2007; RESKE-NIELSEN et al., 2006; BLACKMORE et al., 2004a; BLACKMORE et al., 2007; BLACKMORE et al., 2004c; BLACKMORE et al., 2004b; BLACKMORE et al., 2001; BLACKMORE et al., 2002a), é fundamental que o comportamento do conjunto seja seguro, pois trata-se de robôs que irão operar em ambientes ao ar livre.

O estudo incorpora sistemas e métodos que estão próximos da comercialização. Entretanto, tais sistemas necessitam de mais testes, para que sejam completamente aceitos por autoridades públicas, além de serem atraentes para agricultores e outros usuários. Segundo os autores, todo o exposto acima forneceria conhecimento prévio sobre o tema, dando suporte para que no futuro pudesse ser desenvolvido e testado um trator verdadeiramente autônomo.

Estes estudos foram iniciados com um Trator Hako 3000 de 27 HP produzido pela Hako Germany. O veículo possui transmissão continuamente variável (CVT), o que permitiu que muitas das funções de controle já fossem configuradas para interface eletrônica. Uma unidade de controle eletrônico (ECU) foi montada e produziu interface para a maioria dos subsistemas do trator, permitindo controlar as funções básicas do trator. Foi adicionada uma válvula de controle de fluxo, operada pela ECU do trator, para controle do esterçamento das rodas dianteiras. O controle da aceleração e velocidade de deslocamento foi realizado por meio de atuadores lineares elétricos, comandados pela ECU do trator, fixados junto aos controles do CVT e do cabo do acelerador. Um sistema de controle remoto foi desenvolvido, de modo que a direção, a rotação do motor, e o ajuste da CVT pudessem ser controlados a distância.

Outra CPU foi adicionada para sincronizar os sistemas de segurança e lógico. Como medida de segurança, sensores de toque foram posicionados em pontos estratégicos do veículo e desligam todo o equipamento caso acionados. Além disso, um sistema de verificação contínua foi desenvolvido utilizando um *link* sem fio. Este sistema aciona um circuito normalmente desligado, caso o *link* seja interrompido o sistema de segurança é ativado desligando todo o conjunto.

Para interligar os sistemas foi utilizado um controlador GT2000 da GEOTEC que faz a interface dos ECU por uma rede CAN. A verificação da posição do conjunto é feita por um GPS RTK. Nessa fase, o trator é determinístico e as instruções contidas nele são apresentadas sob a forma de um plano de rota previamente inserido no controlador. Após determinada a área a ser trabalhada, o software gera um conjunto de orientações que são usadas para definir a rota do trator. A plataforma desenvolvida pode ser vista na Figura 6.

Figura 6. Trator Autônomo.

2.3.4. Capinador Automático para “Árvores de Natal”

O projeto (Autonomous christmas tree weeder - Capinador Automático para Árvores de Natal) idealizado pela Royal Veterinary and Agricultural University localizada em Taastrup – Dinamarca, teve início em 2002 com a proposta de um veículo autônomo para controle mecânico de ervas daninhas em áreas cultivadas com “árvores de natal” como descrito em BLACKMORE *et al.*, 2002b e HAVE *et al.*, 2005. O ponto de partida foi o conceito de uma máquina capaz de roçar a área em volta de uma árvore, deixando apenas um círculo de 80 cm de diâmetro em volta do tronco. O projeto consiste em adaptar um cortador de grama autopropelido com tamanho e formato adequados para transitar entre fileiras de árvores.

O veículo utilizado foi o Stiga Garden Combi (STIGA, 2010), um cortador de grama comercial. Este possui 4 rodas, com tração nas rodas traseiras e esterçamento nas dianteiras. Opera com um motor a gasolina de 9 kW, 5 marchas à frente, com velocidade máxima de 1,42 m/s, e 1 a ré. A máquina foi modificada para incluir o controle computacional de todas as funções principais. As modificações incluem a substituição do rotor principal por uma pequena unidade de corte com 320 mm de diâmetro, fixada a um braço que pode se prolongar da lateral do veículo para realizar o corte das ervas invasoras na lateral da rua. As interfaces normais foram substituídas por atuadores lineares, que realizam o controle da embreagem, dos freios, das marchas, da direção, da aceleração, do rotor de corte e do braço. A verificação da posição do veículo foi feita por meio de um GPS RTK. Outros sensores como scanner laser, inclinômetro e sensores de toque e ultrassônicos são utilizados para promover a navegação do veículo. Os periféricos foram conectados a um computador industrial embarcado. A comunicação foi feita via rede ethernet sem fio.

As tarefas foram realizadas por meio determinístico, onde a posição de cada árvore e a área a ser trabalhada foram inseridas no controlador de tarefas. Posteriormente, o

software gera um conjunto de orientações que são usadas para definir a rota do trator. O controle de posição do braço é feito em função da posição da árvore durante o deslocamento do veículo, sempre visando que fique apenas um círculo de diâmetro pré-definido em torno do caule da árvore. O sistema robótico pode ser visto na Figura 7.

Figura 7. Capinador Automático para “Árvores de Natal”.

2.3.5. Veículo Autônomo de Apoio para Agricultura

Este veículo está em fase de desenvolvimento desde o ano de 2007 pelo Department of Agriculture, Crop Production, and Agricultural Environment da Universidade de Thessaly, localizada na Grécia. Tal veículo é denominado SAVAGE – *Supportive Autonomous Vehicle for Agriculture* ou Veículo Autônomo de Apoio para a Agricultura (SAVAGE, 2010). O SAVAGE é um veículo autônomo de baixo custo projetado para desempenhar tarefas específicas dentro dos limites de um campo. O objetivo do projeto é desenvolver uma plataforma robusta para uso geral (3 graus de liberdade) baseado em arquitetura aberta, capaz de hospedar subsistemas diferentes a fim de desempenhar diversas tarefas em campo durante o período correspondente a 60% do crescimento de planta. O sistema foi projetado para carregar um adicional máximo de 40 kg de carga sem que haja queda brusca de desempenho. Isto garante que ele será capaz de carregar equipamentos adicionais necessários para as diversas tarefas agrícolas. Esta plataforma pode ser vista na Figura 8.

A construção mecânica do SAVAGE é baseada em um projeto modular, de tal modo que permite a sua implementação com o uso de tecnologias e fabricação convencionais. A estrutura possui baixo peso, o corpo do robô é formado por uma base de aço suportado por quatro módulos de locomoção. Cada módulo de locomoção possui dois motores, que fornecem esterçamento e rotação independente da roda. Adicionalmente, cada módulo de locomoção possui seus módulos eletromecânicos e eletrônicos que são necessários para o

controle da unidade do módulo de locomoção. Toda inteligência de alto nível e unidades de suprimento de energia são hospedadas na parte principal da construção.

O módulo de inteligência, a unidade de controle principal, os módulos de sensoriamento que fornecem habilidades básicas de navegação (GPS RTK, bússola), os conjuntos motores e os circuitos de apoio, além do fornecimento de energia para as unidades fazem parte de um sistema de controle baseado em PC/104 (PC/104, 2010). Futuramente será incorporado o comportamento interativo em ambiente dinâmico, com a exposição de diferentes unidades de sensoriamento e técnicas de fusão de sensores.

Figura 8. Veículo Autônomo de Apoio para Agricultura.

2.3.6. Plataforma Autônoma e Sistema de Informação

A plataforma intitulada “Autonomous Platform and Information System - Plataforma Autônoma e Sistema de Informação” foi projetada no Department of Control and Engineering Design da Technical University of Denmark localizada em Kongens Lyngby - Dinamarca por BAK & JAKOBSEN, 2004; BISGAARD *et al.*, 2004 e MADSEN & JAKOBSEN, 2001. Este projeto é muito parecido com o robô SAVAGE, que foi apresentado anteriormente. O robô agrícola móvel consiste em uma estrutura formada basicamente por um chassi e quatro conjuntos de movimento, compostos cada um por uma roda e um sistema eletromecânico de controle de movimentação. O chassi da plataforma robótica possui dimensão de 1,2 m por 1 m, e foi projetado especificamente para uso agrícola em culturas de baixo porte e em terreno limpo. Cada um de seus quatro conjuntos de movimento inclui um motor elétrico de propulsão, sendo que a eletrônica de controle de cada módulo também faz parte do conjunto. Para a realização de manobras, é utilizado um motor de direção montado no topo do conjunto, criando um mecanismo com dois graus de liberdade. A arquitetura eletrônica de controle do robô é baseada em um computador comercial embarcável que controla o posicionamento do servo (motor de direção) e fornece controle do torque para o motor de

movimentação. A eletrônica do motor de movimentação permite o controle de velocidade e torque com realimentação, enquanto o sistema de direcionamento que utiliza servo fornece realimentação do ângulo de direção, o qual é obtido através de um encoder montado em seu eixo. A plataforma robótica é apresentada na Figura 9.

O robô apresenta arquitetura eletrônica baseada em um computador embarcado PC/104 (PC/104, 2010) que é responsável pela função de controle em tempo real do veículo. O sistema computacional foi implementado em um sistema operacional Linux. O sistema de controle em tempo real foi desenvolvido com auxílio da ferramenta MathWorks real-time workshop, que permite a geração da estrutura de controle em linguagem C personalizáveis a partir dos modelos de simulação. Isso permite que programas sejam construídos de forma automática e posteriormente executados na plataforma. O sistema de comunicação entre o robô e a estação de controle é feito via rede sem fio utilizando o protocolo de comunicação TCP/IP. Sensores como GPS, giroscópio, bússola magnética, são conectadas ao computador embarcado por meio de interfaces seriais ponto-a-ponto padrão RS232. Os sistemas eletrônicos dos conjuntos de movimento são ligados ao computador embarcado por meio da interface de comunicação CAN 2.0. Outros dispositivos podem ser conectados por meio de uma rede TCP/IP, ou alternativamente por meio de uma segunda rede CAN que está disponível no computador embarcado.

Figura 9. Plataforma Autônoma e Sistema de Informação.

2.3.7. Hortibot

Este projeto foi desenvolvido no Danish Institute of Agricultural Sciences no Department of Agricultural Engineering da AARHUS University localizada em Horsens – Dinamarca e concebido por JØRGENSEN et al., 2006; JØRGENSEN et al., 2007; SØRENSEN et al., 2006; NØRREMARK et al., 2006 e SØRENSEN et al., 2007.

Assim como o projeto Autonomous Christmas Tree Weeder, que foi apresentado anteriormente, este consiste em identificar, entre as diversas opções existentes no mercado, uma plataforma destinada ao corte de grama e capina que pudesse ser adaptada para operar de forma autônoma. O modelo Spider ILD01 (SPIDER, 2010) produzido pela Dvořák Machine Division foi o que apresentou as melhores características. Este consiste em um cortador projetado para operar em terrenos inclinados e acidentados, com declives de até 40 graus. O sistema de tração é composto por um motor hidráulico fixado em cada uma das quatro rodas e o sistema de guiagem por um motor elétrico em cada roda. Os parâmetros de funcionamento do motor, velocidade de deslocamento e ângulo das rodas são mensurados por sensores que estão ligados ao módulo de controle. A operação do veículo é feita remotamente por um operador.

As principais alterações foram realizadas no módulo de controle. A comunicação entre as unidades foi baseada em uma rede proprietária CAN de alta velocidade. Um módulo de controle comum com base em um microprocessador de 16 bit Atmel AVR (ATMEL, 2010) foi desenvolvido para gerenciar o sistema de tração e guiagem. O controle das tarefas principais, tais como a estimativa de posição, o caminho a seguir, a movimentação de carga, emergência, entre outras, é feito por um computador incorporado com base na arquitetura industrial PC/104 padrão (PC/104, 2010). Este possui um processador Intel x86 300 MHz, módulo de rede CAN, interface serial e um módulo Ethernet. O disco rígido normal foi substituído por um cartão Compact Flash, a fim de evitar problemas causados pelas vibrações e variações de temperatura. O módulo de visão é da Eco-Dan S/A, empresa localizada na Dinamarca. É um sistema de visão estéreo que capta cor e informação 3D do cenário. Um processador de sinal digital (DPS) analisa os dados e transmite para a rede CAN as informações relevantes da cena. O sistema desenvolvido é apresentado na Figura 10.

Figura 10. The Hortibot.

2.3.8. Robô Capinador

O projeto (Weeding robot from the University of Wageningen - Robô Capinador) foi desenvolvido pelo Agrotechnology and Food Science Systems and Control Group - University of Wageningen – Netherlands e está descrito em BAKKER *et al.*, 2007; BAKKER, 2009; BAKKER *et al.*, 2010; BAKKER *et al.*, 2006. Este projeto tem o layout estrutural similar ao projeto SAVAGE e ao Autonomous Platform and Information System, que foram apresentados anteriormente. Este robô possui uma estrutura formada basicamente por um chassi e quatro conjuntos de movimento, compostos cada um por uma roda e um sistema eletromecânico de controle de movimentação. O chassi do veículo possui 1,5 m de largura e 2,5 m de comprimento, com aproximadamente 0,5 m de vão livre, e o peso total está em torno de 1.250 kg. Foi projetado para realizar o controle de plantas invasoras em culturas de hortaliças, embora a estrutura permita que outras funcionalidades sejam adicionadas.

Este veículo utiliza como fonte de alimentação um motor diesel de 31,3 kW, que transfere energia para uma bomba hidráulica. Uma válvula com oito canais é responsável pelo controle das funções de locomoção do veículo. Cada um de seus quatro conjuntos de movimento inclui um motor hidráulico radial responsável pela propulsão e outro motor hidráulico radial é responsável pelo esterçamento da roda. A velocidade máxima atingida com o sistema tracionado pelas quatro rodas é de 1,8 m/s. É possível direcionar o fluxo de óleo de forma que somente duas rodas tracionem, desta forma o veículo pode atingir a velocidade de 3,6 m/s. A verificação da velocidade de rotação é feita por dois sensores magnetoresistivos montados com seus sinais defasados em 90°. Assim é possível verificar a velocidade e direção de movimento de uma roda dentada que geram 100 pulsos por revolução, que esta fixada junto ao motor.

O sistema de guiagem permite esterçamento de 0° a 360° e a verificação da posição é feita por um sensor de ângulo analógico com acurácia de 1°. Os sensores são conectados a quatro micro controladores que transmitem os dados via rede CAN que usa o protocolo ISO 11783 (ISOBUS). Um computador embarcado operando com sistema operacional em tempo real (National Instruments PXI system) realiza o processamento e o controle das funções de locomoção do robô. Um sistema radio modem, usado para o controle manual do robô, assim como um GPS RTK estão conectados ao PXI via RS232. A interface de operação do robô, que roda no PXI, e outras informações sobre parâmetros do veículo podem ser vistas em um laptop por meio de uma conexão sem fio Ethernet. A plataforma robótica desenvolvida pode ser vista na Figura 11.

Figura 11. Robô Capinador.

2.3.9. Halmstad

O projeto desenvolvido na Halmstad University localizada em Halmstad - Suécia por ÅSTRAND & BAERVELDT, 2002 visa a construção de um robô agrícola móvel para controle de ervas invasoras. O veículo foi projetado para operar em culturas de beterraba e outras culturas manejadas com distância de fileiras de semeadura em torno de 50 cm. Possui largura de 70 cm e comprimento de 120 cm. O sistema de guiagem é composto por servo motor elétrico que posiciona as rodas dianteiras na configuração Ackerman. O controle é feito por um potenciômetro ligado à barra de direção e um encoder ligado ao motor. O sistema de tração é composto por dois motores elétricos, equipados com freios elétricos e encoders, que tracionam as rodas traseiras. A alimentação durante testes de laboratório é feita por baterias e para ensaios em ambientes abertos, por meio de um gerador movido à gasolina. O sistema pode ser visto na Figura 12.

O robô utiliza dois sistemas de visão, sendo o primeiro em escala de cinza, capaz de reconhecer a estrutura da fileira de plantas da cultura analisada. Com isso é possível, por meio de técnicas de processamento de imagens definir a trajetória da plataforma, e na sequencia guiar o robô ao longo das fileiras de cultivo. O segundo sistema é colorido sendo capaz de identificar a cultura principal entre as plantas invasoras, também por meio de técnicas de processamento de imagens. Este sistema de visão colorido gera informações para outro sistema, que, por sua vez, contém um atuador mecânico. O atuador consiste em um disco de corte que gira perpendicularmente em relação à fileira de plantas, cortando e removendo as plantas invasoras de dentro da fileira de cultivo. Um cilindro pneumático promove o posicionamento do atuador.

Cada um destes sistemas tem um PC industrial embarcado para captura e processamento das imagens. Um terceiro computador trabalha com um sistema operacional em tempo real, e controla todos os sistemas e ações do robô. O PC está equipado com dois

cartões IO para sinais digitais e analógicos de entrada e saída, bem como um cartão de interface IO para os codificadores dos motores. O robô também é equipado com dois botões de emergência e um joystick para operação manual. A comunicação entre o computador principal e os sub-sistemas de visão é feita por meio de uma interface serial.

Figura 12. Halmstad.

2.3.10. SOLERO e SHRIMP

Ambos os projetos foram desenvolvidos no Eidgenössische Technische Hochschule (Swiss Federal Institute of Technology) localizado em Zurique – Suíça. Inicialmente, em 2004, SIEGWART & NOURBAKHS, 2004 desenvolveram a plataforma denominada SHRIMP. Com o intuito de dar continuidade ao projeto, em 2005, iniciou-se o desenvolvimento de uma plataforma em maior escala denominada SOLERO (LAMON & SIEGWART, 2005 e LAMON & SIEGWART, 2007) As plataformas possuem seis rodas ligadas por um sistema de barras que propiciam grande capacidade de superar obstáculos. O projeto SOLERO aperfeiçoou a capacidade de vencer obstáculos por meio de melhorias no sistema de suspensão mecânica passiva. O veículo possui uma roda em um garfo na frente, uma roda acoplada na parte traseira do corpo principal e dois *bogies* (estrutura que contém as rodas) em cada lado. A arquitetura paralela dos *bogies* e do garfo suspenso por molas fornece ampla área de vão livre, enquanto coloca todas as rodas em contato com o chão em qualquer momento. Isto assegura excelente capacidade de escalada sobre obstáculos até duas vezes maiores que o diâmetro de sua roda, além de excelente adaptação para todos os tipos de terrenos. O direcionamento do veículo é realizado pela sincronização da rotação das rodas da frente e de trás e pela diferença de velocidades das rodas dos *bogies* promovendo escorregamento lateral. A habilidade do SOLERO de se mover suavemente em meio a obstáculos agudos em terrenos acidentados apresenta muitas vantagens. Em particular, ele permite escorregamento limitado das rodas e redução

de vibração. Esta plataforma também foi equipada com sensores e maior poder computacional em relação à plataforma desenvolvida anteriormente.

A taxa de ruído no sinal dos sensores a bordo do veículo e a precisão da odometria são significativamente melhorados em comparação com as estruturas rígidas, tais como os veículos de quatro rodas de direção. Imagens menos borradas podem ser adquiridas e as técnicas de integração da Unidade de Medida Inercial (*Inertial Measurement Unit – IMU*) podem ser aplicadas para melhorar o rastreamento da posição em terrenos acidentados. Os robôs são apresentados na Figura 13, sendo que a direita é apresentado o SHRIMP e a esquerda o SOLERO.

Figura 13. SOLERO e SHRIMP.

2.3.11. Aurora

O veículo agrícola autônomo apresentado em MANDOW *et al.*, 1996; GÓMEZ-DE-GABRIEL *et al.*, 1996; MANDOW *et al.*, 1995c, OLLERO *et al.*, 1995, MANDOW *et al.*, 1995a, MANDOW *et al.*, 1995b foi projetado no Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática da Universidad de Málaga localizado em Málaga – Espanha, e foi denominado AURORA. A plataforma foi desenvolvida para navegação autônoma e teleoperada em ambiente agrícola, tendo como objetivo executar operações de forma automática dentro de estufas, principalmente pulverização. Embora a operação típica para este sistema seja a pulverização química, sua flexibilidade permite a adaptação para outras operações e aplicações, tais como monitoramento de estufas de transporte ou inspeção da produção.

O veículo consiste em uma estrutura com quatro rodas e oito lados, com o formato similar a um losango, com 80 cm em largura e 140 cm em comprimento. Uma roda está posicionada na frente do robô e outra atrás, de forma que ambas percorram a mesma linha. Cada uma possui um motor elétrico trifásico AC, que é responsável pelo esterçamento. Duas rodas, paralelas entre si, posicionadas em lados opostos do veículo, completam o

conjunto. Cada uma possui um motor elétrico trifásico AC responsável pela propulsão. A guiagem é feita esterçando as rodas dianteira e traseira e variando a rotação das rodas laterais. O controle da velocidade do motor é feito por um controlador de frequência. Em cada motor foi fixado um encoder incremental que fornece informações usadas no controle do veículo. No caso dos motores de propulsão, o encoder tem a função de mensurar a velocidade e estimar a distância percorrida pelo veículo, e nos motores de guiagem, controlar e medir o ângulo de esterçamento.

O sistema de alimentação é composto por um gerador AC de 2600 W de potência movido por um motor a gasolina. Para ensaios em laboratório, o veículo pode ser alimentado direto pela rede de distribuição elétrica. O veículo possui uma arquitetura eletrônica concentrada, ou seja, todos os dispositivos (monitor, *joystick*, teclado, modem) estão conectados diretamente a uma central de processamento de dados. Para controle do posicionamento do robô foram usados diversos sensores ultrassônicos, posicionados em pontos estratégicos da estrutura. Uma vista da plataforma operando dentre de uma estufa pode ser visto na Figura 14.

Figura 14. Aurora

2.3.12. Robô Autônomo de Seis Rodas

Concebido no Center for Self-Organizing and Intelligent Systems da Utah State University, localizada em Logan – Utah – EUA, o projeto apresentado por MOORE *et al.*, 1999; MOORE & FLANN, 2000 e denominado “A Six-Wheeled Omnidirectional Autonomous Mobile Robot – Robô Autônomo de Seis Rodas” consiste em um veículo autônomo com seis rodas, em que cada roda possui controle de velocidade e de direção obtidos independentemente através de processadores dedicados. Cada roda possui motor de direção e de movimentação. A plataforma robótica obtida pela conexão das seis rodas com um chassi é chamada de omnidirecional porque o veículo resultante pode seguir um caminho com orientação e movimento independentes em X e Y . Ele difere de veículo tradicional Ackerman, onde a orientação é restrita pela direção de viagem.

Entretanto, deve ser notado que o veículo robótico utilizado não é verdadeiramente omnidirecional. O veículo é, de fato, não-holonômico porque leva um tempo finito para virar a roda para um novo ângulo de direção. Certamente este tempo apresenta um acoplamento no movimento de $X - Y$ do veículo. No entanto, é usado o termo omnidirecional porque os motores de direção possuem uma taxa de virada ou esterçamento muito rápida em relação à dinâmica do próprio veículo, resultando no que é efetivamente a capacidade omnidirecional. Destaca-se que neste projeto de robô foi utilizado um projeto particular de cada uma de suas seis rodas chamadas de *smart wheels* ou rodas inteligentes. As *smart wheels* possuem anel de deslizamento que permite rotação infinita de cada roda em relação ao eixo vertical. Este mecanismo permite que dados e alimentação passem pela roda para o chassi sem conexão por fio, mas sim pelo anel de contato deslizante.

A plataforma autônoma apresentada em MOORE & FLANN, 2000 possui uma arquitetura eletrônica baseada em três computadores Pentium com sistema operacional Linux e interligados por uma rede local (LAN) padrão TCP/IP embarcada no veículo. Os computadores se comunicam com vários sensores tais como GPS e giroscópio, e com outros dispositivos de diversas formas: rede CAN, interface RS 232 e barramento PCI (*Peripheral Component Interconnect* - Interconector de Componentes Periféricos). Cada nó de roda inclui um microcontrolador com interface para vários sensores, realimentação de malha com os *encoders* absolutos e incrementais, e uma controladora de motor baseada em PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por largura de Impulsos) que está ligada em um barramento de 48 V. Uma vista geral da plataforma é apresentada na Figura 15

Figura 15. Robô Autônomo de Seis Rodas.

2.3.13. Transplantador Automático de Arroz

O veículo “Autonomous Rice Transplanting - Transportador Automatico de Arroz” foi desenvolvido no Department of Farm Mechanization and Engineering, National Agricultural Research Center em Tsukuba, Ibaraki - Japão por NAGASAKA *et al.*, 2004 e NAGASAKA *et al.*, 2009; NAGASAKA, 2008; NAGASAKA *et al.*, 2007; NAGASAKA *et al.*, 1999; NAGASAKA *et al.*, 2002. O projeto consiste em adaptar um transplantador de arroz fabricado pela ISEKI & CO, empresa situada no Japão (ISEKI, 2010) para operar de forma autônoma. Atuadores foram inseridos para controlar o direcionamento, o acelerador, a embreagem e o freio. O ângulo de esterçamento das rodas foi feito por um motor DC de 80 W e a verificação da posição por meio de um encoder absoluto. O acionamento dos pedais de acelerador, freio e embreagem foram realizados por atuadores lineares elétricos e a medida da posição por sensores de proximidade magnética. A estrutura proposta pode ser visualizada na Figura 16.

O sistema de navegação emprega um GPS RTK e um giroscópio de fibra óptica – *Fiber Optic Gyroscope* (FOG) que estão conectados ao sistema de controle. O sistema de controle consiste em um computador embarcado do tipo PC-104, com uma unidade central de processamento 486 de 66 MHz, operando com sistema operacional PC-DOS 2000. O algoritmo de controle foi desenvolvido em linguagem C. O computador recebe os dados de posicionamento do veículo, calcula os parâmetros de controle e os envia para um controlador do tipo PLC que comanda os atuadores.

Figura 16. Transplantador Automático de Arroz.

2.3.14. Guiagem Automática

O projeto é desenvolvido pelo grupo de pesquisa em veículos autônomos agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade de Illinois nos Estados Unidos. REID *et al.*, 2000 utilizam máquinas agrícolas comerciais, como tratores, adaptadas para serem veículos autônomos. Para tal adaptação, fez-se necessário a introdução de diversos dispositivos eletrônicos. Foi utilizado um computador central responsável por controlar o veículo. Junto ao computador central estão acoplados diversos dispositivos como GPS, sistema de visão (*machine vision*), atuadores das rodas (*actuator*), válvula de controle de esterçamento (*steering valve*), os quais serão responsáveis pela percepção e atuação do sistema. O sistema de controle é capaz de reconhecer o ambiente a sua volta e tomar decisões. O sistema também permite que sejam adicionadas missões que vão desde a simples navegação até a execução de operações agrícolas. Uma exemplificação dessa aplicação pode ser observada na Figura 17. Outros exemplos de adaptação de máquinas agrícolas comerciais em veículos autônomos podem ser encontrados em NOGUCHI *et al.*, 2002; KISE *et al.*, 2002; INOUE *et al.*, 1997; BELL, 2000.

Figura 17. Guiagem Automática.

2.3.15. AgRover

O projeto está em fase de desenvolvimento pelo grupo de pesquisa em sistemas autônomos e de visão para a área agrícola, pertencente ao Department of Agricultural and Biosystems Engineering da Iowa State University, nos Estados Unidos, sob coordenação do professor Lie Tang. O projeto teve início no ano de 2004 e prevê a construção de um veículo autônomo para operar no ambiente agrícola. A plataforma possui formato retangular com massa de aproximadamente 230 kg munida de quatro rodas esterçáveis e tração independente nas quatro rodas. Para cada roda é utilizado um motor elétrico de 250 W com sistema de redução, freio estacionário e encoder, o qual é responsável pela propulsão do veículo. O sistema de esterçamento conta com um motor de 150 W com redução e encoder. O sistema elétrico é composto por controladoras de potência que regulam a velocidade de rotação dos motores, um computador industrial que lê a informação gerada pelos sensores, a processa e envia os sinais de controle. O sistema possui ainda dois sistema de GPS-RTK, sendo um posicionado na parte dianteira da plataforma e o segundo na parte traseira. A alimentação é feita por meio de seis baterias de 12V com 60Ah cada.

A plataforma inicialmente possuía um sistema de suspensão e compensação que movimentava a altura das rodas com o intuito de manter a plataforma sempre nivelada, independentemente do tipo do terreno. Esse sistema apresentava quatro atuadores do tipo cilindro pneumático ligados de forma independente a um bloco de controle e alimentados por um compressor de ar. Por meio de um conjunto de inclinômetros, verificava-se os ângulos de rolagem e arfagem da plataforma e por meio dos cilindros pneumáticos tentava-se nivelar a estrutura. Entretanto, o controle do sistema apresentou diversos problemas e por isto foi descartado

O sistema de controle atual é do tipo teleoperado. Um computador com a rotina de controle se comunica via rede sem fio até o computador instalado na plataforma. O alcance do sistema é baixo, não ultrapassando 20 metros. Os esforços atuais visam o controle do sistema de rodas e o desenvolvimento de rotinas para navegação assistida por GPS. Os principais problemas encontrados atualmente estão relacionados ao controle das rodas, já que devido à baixa potência dos motores adotados, a resposta do sistema é lenta. Além disso, não existe uma rotina para controle síncrono do movimento de esterçamento o que dificulta a navegação, mesmo em baixas velocidades e em terrenos nivelados. A seguir, na Figura 18 é mostrado a plataforma em operação.

Figura 18. AgRover.

2.3.16. Gantry

O projeto está em fase de melhorias pelo grupo de pesquisa do laboratório de sensoriamento remoto agrícola pertencente ao Agricultural and Biological Engineering Department da University of Illinois at Urbana-Champaign, nos Estados Unidos, coordenado pelo professor Lei Tian. O projeto consiste na construção de uma estrutura elevada capaz de se locomover no ambiente agrícola e coletar informações sobre a cultura. A estrutura possui formato de pórtico com 3 metros de altura e 3 metros de largura e 3,5 metros de comprimento, pesando aproximadamente 1.200 kg. A plataforma não apresenta sistema de suspensão, entretanto, possui um sistema articulado entre as rodas dianteiras e traseiras. Esse sistema permite que o eixo dianteiro se movimente independentemente do restante da estrutura o que garante que, em situações onde o terreno não está nivelado, as quatro rodas estejam em contato com o solo.

O sistema de esterçamento e propulsão é independente nas quatro rodas. Um motor de passo de alto torque ligado a uma caixa de redução é responsável pelo esterçamento da roda, um sensor do tipo potenciométrico é posicionado junto a estrutura do sistema de esterçamento e registra a orientação da roda. O sistema de propulsão conta com um motor DC de 750W ligado a um sistema de transmissão para cada roda, um encoder fixado junto ao eixo do motor retorna as informações referente ao movimento da roda. Os motores são ligados a controladoras de potência (uma para cada motor), que por sua vez estão ligadas a um microcontrolador. Cada motor possui ainda sensores de temperatura e sensores que medem a tensão elétrica, além disso, um sensor que mede a orientação em X e Y também é posicionado em cada um dos quatro módulos roda. Todos esses sensores também estão ligados ao microcontrolador.

Cada microcontrolador possui um módulo de comunicação sem fio que executa o tráfego de informações via TCP até um roteador instalado na parte superior da estrutura.

Essa informação é retransmitida até um computador que contém a rotina de controle, que foi implementada em ambiente *LabView*, sendo que a navegação é do tipo teleoperada. Outros sensores como scanner laser (LIDAR), câmeras multiespectrais, sensores NDVI, sistema inercial também fazem parte da estrutura, entretanto não estão relacionados com o sistema de navegação ou controle. Esses sensores são focados na coleta de dados agrícolas, sua operação é feita mediante um computador conectado diretamente aos sensores. A alimentação de todo o conjunto é feita por meio de um gerador a gasolina posicionado na parte superior da estrutura. A Figura 19 apresenta a plataforma desenvolvida.

Os trabalhos atuais estão divididos em duas frentes. A primeira relacionada a coleta de dados e a tentativa de correlaciona-los a parâmetros agrícolas no intuito de detectar variabilidade espacial e determinar formas de manejo. A segunda visa melhorias no sistema eletro-mecânico da plataforma. Assim como no projeto AgRover desenvolvido na Iowa State University, problemas relacionados ao controle de esterçamento e propulsão são presentes. Devido à massa da estrutura, os motores adotados tanto para propulsão quanto esterçamento, não atendem aos requisitos mínimos. Devido o sistema de comunicação entre os módulos roda e o computador com a rotina de controle ser independente e usando rede sem fio, é comum a perda de informações e erros nessa operação. A estrutura mecânica em si também apresenta pontos frágeis o que resulta em grandes deformações estruturais durante o movimento da plataforma.

Figura 19. Gantry.

2.3.17. Escola de Engenharia de São Carlos

Em 2001, a Embrapa Instrumentação Agropecuária desenvolveu uma plataforma para auxiliar a pesquisa em campo, que é mostrada na Figura 20. Essa plataforma foi nomeada SkinnyBoy (garoto magro), devia ao seu formato estreito capaz de se locomover entre as fileiras de cultivo. Durante o projeto desta plataforma, idealizou-se uma estrutura

capaz de transportar um microcomputador portátil, baterias, coletor de dados e sensores de refletância para medir níveis de nitrogênio em vários estágios da cultura de milho. Durante o uso da plataforma móvel, observou-se a necessidade de um redimensionamento tanto da estrutura como da potência. Embora apresentasse algumas limitações, a plataforma móvel desenvolvida mostrou-se possuidora de uma potencialidade de contribuição inédita para a aquisição de grandes quantidades de dados em diferentes práticas agrícolas, principalmente no que concerne à Agricultura de Precisão.

Figura 20. Garoto Magro (SkinnyBoy).

Este trabalho ofereceu suporte a um projeto maior e, em 2003, a Embrapa Instrumentação Agropecuária e o Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo iniciaram um projeto cooperativo. Este compreendia a construção de uma plataforma robótica, com intuito de viabilizar o desenvolvimento de tecnologias de navegação autônoma e a aquisição de dados em ambiente agrícola. O projeto foi intitulado Veículo Agrícola Autônomo - VAA: uma plataforma para desenvolvimento de tecnologias de navegação autônoma e para aquisição de dados em Agricultura de Precisão (FAPESP 03/06582-0). Este projeto visava a criação de competência nacional e interdisciplinar em robótica agrícola e de integração entre instituições de pesquisa, baseado no desenvolvimento de um robô agrícola móvel, promovendo e fomentando o desenvolvimento da tecnologia no país no tema amplo que é a automação e mecanização agrícola. A Figura 21 mostra a plataforma desenvolvida.

Figura 21. Veículo Agrícola Autônomo (VAA).

O robô agrícola móvel mostrou contribuição inédita e grande potencial de utilização para aquisição de dados e para o desenvolvimento de tecnologias de robótica e navegação em ambientes agrícolas. No entanto, foram verificados problemas, tais como a baixa potência dos motores de tração do sistema de navegação e a necessidade de adaptações na estrutura mecânica do robô agrícola, além da baixa autonomia relacionada ao tipo de baterias utilizadas como forma de alimentação. Em virtude desse potencial e das dificuldades observadas, houve motivação para que a Embrapa Instrumentação e a Escola de Engenharia mantivessem a cooperação e iniciassem dois projetos. O primeiro projeto, iniciado no ano de 2007, é intitulado Desenvolvimento de melhorias para a estrutura mecânica e para sistema de navegação de um Robô Agrícola Móvel (RAM) para a aquisição de dados em Agricultura de Precisão (MCT/CNPq 15/2007 – Universal). O segundo projeto, iniciado no ano de 2008, é intitulado Robô Agrícola Móvel: Implementação de sistema de tração (Embrapa Macroprograma 3 2008-2010). O resultado da modificações podem ser vistas na Figura 22.

Figura 22. Robô Agrícola Móvel (RAM).

O aperfeiçoamento da estrutura mecânica proporcionou melhora na robustez do robô, permitindo a utilização de novos equipamentos e sensores propostos. A inserção de motores de guiagem de maior torque, bem como o novo sistema de controle dos motores, proporcionaram ao sistema de navegação maior confiabilidade e precisão, contribuindo com o deslocamento eficiente do robô durante a aquisição em massa dos dados em campo. O novo sistema de tração, por sua vez, propiciou a movimentação de toda a estrutura e do peso extra, suprimindo a necessidade de força necessária para atuação em culturas nacionais.

Visando a continuidade dos estudos em robôs agrícolas realizados pela Embrapa Instrumentação Agropecuária e pela Escola de Engenharia de São Carlos, a pesquisa iniciou uma nova programação pelo projeto intitulado “Desenvolvimento de uma plataforma robótica modular e multifuncional para aquisição de dados em agricultura de precisão” (FINEP/CT-AGRO - Agricultura de Precisão 01/2008). A proposta deste projeto visou desenvolver uma plataforma robótica modular capaz de se locomover em ambientes típicos da área agrícola, com a finalidade de aquisição de dados e pesquisa de novas tecnologias para o sensoriamento remoto. As principais características desta plataforma são a robustez, a mobilidade, o baixo peso, a elevada capacidade operacional e autonomia condizentes com as necessidades agrícolas. A plataforma robótica base apresenta uma característica multifuncional, o que permite o acoplamento de módulos de aquisição de dados em campo para estudo da variabilidade espacial por meio de sensores e equipamentos considerados portáteis. Também potencializa as características específicas do meio agrícola para atuação em culturas perenes, semi-perenes e anuais. A plataforma desenvolvida é mostrada na Figura 23.

Figura 23. Agricultural Robot (AGRIBOT).

A plataforma proposta é composta de dois subsistemas principais, a plataforma robótica base e os módulos complementares. A Plataforma robótica base é um subsistema constituído por uma estrutura com sistemas mecânicos e eletrônicos, capaz de se

locomover com eficiência em ambientes agrícolas adversos. Essa etapa do projeto tem como cooperador a empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A, que forneceu a estrutura e os componentes mecânicos necessários para o seu funcionamento.

Os módulos complementares da plataforma robótica base são capazes de receber subsistemas, com diversas funções. Foram utilizadas metodologias de desenvolvimento que representam o estado da arte nas respectivas áreas para a construção dos módulos e subsistemas. Cada módulo é responsável pela realização de tarefas distintas, conforme a necessidade do cliente, flexibilizando as áreas de aplicação do conjunto. Os módulos propostos são:

Plataforma robótica base: Constitui de um veículo de quatro rodas autopropelido com chassi em formato pórtico. O veículo utiliza para geração de energia motriz um motor diesel de 80 CV, sistema de transmissão hidrostático nas quatro rodas e sistema de esterçamento nas quatro rodas acionado por pistões hidráulicos. O sistema de esterçamento possibilita uma movimentação omnidirecional. O conjunto conta ainda com sistema de suspensão independente, do tipo amortecedor pneumático e sistema de freio de estacionamento.

Localização e Navegação Autônoma: Visa propiciar a habilidade de navegação autônoma para a plataforma robótica base por meio da utilização de sistemas de GPS, sensores inerciais e sensores de escaneamento a laser de ambientes. O módulo de localização constitui-se de um conjunto de softwares que utilizará dados oriundos de sensores proprioceptivos (encoders das rodas, giroscópio de fibra óptica, etc.) e exteroceptivos (sensor laser, GPS, etc.) para determinar a localização do veículo na sua área de trabalho. Para tal, serão implementados filtros probabilísticos que realizarão a fusão sensorial e retornarão uma estimativa ótima da posição do veículo. Da mesma forma, o módulo de navegação autônoma constitui-se de um conjunto de softwares que, baseado na localização do veículo, em um mapa georreferenciado da sua área de trabalho e em dados de sensores, escolherá a melhor trajetória para executar a rota pré-estabelecida. Pretende-se utilizar uma estrutura com um navegador global (baseado em mapas topológicos da área de trabalho) e um navegador local (baseado em mapas de células / grids).

Visão Computacional: Consiste no sistema para captura e análise de imagens de cenas agrícolas relacionadas ao percurso efetuado pela plataforma robótica. Tais imagens poderão ser utilizadas para fins de navegação e de obtenção de informações sobre as culturas. Esses módulos estão intimamente ligados ao sistema de controle de navegação da plataforma robótica base. Esse sistema será implementado com controladores utilizados com sensores e atuadores e computadores industriais para processamento geral de algoritmos de controle de navegação, algoritmos de coleta de dados e rotinas de transmissão de dados e comunicação sem fio e distribuído por meio de rede CAN.

Comunicação Sem Fio: Desenvolvimento de um sistema de comunicação sem fio (rádio modem ou wi-fi) para teleoperação e troca de informações entre a plataforma robótica e uma estação de operação. Essa estação de operação será móvel e funcionará alocada em uma carreta, acoplada a um veículo. Esse veículo auxiliará no transporte de equipamento para as áreas de campo onde serão realizados os experimentos.

Sensoriamento de parâmetros agrícolas: Desenvolvimento de um sistema para sensoriamento do ambiente a partir de diversos sensores correlacionados com variáveis da área agrícola. Como exemplos serão utilizados sensores ativos de reflectância para correlações com clorofila e biomassa de culturas e sensores de ultrassom e capacitivos para correlações com crescimento e detecção de falhas em culturas. Apesar de muitos instrumentos e sensores levados no campo serem portáteis, a ação de entrar em culturas com todos os instrumentos em funcionamento é penosa. Além desses fatores, somadas idas e vindas, a distância percorrida durante o processo é muito elevada. Espera-se que a plataforma robótica facilite as operações de aquisição de dados em campo e permita ao interessado a aquisição de módulos com tecnologias específicas para seu tipo de cultura, diminuindo os altos custos de investimentos em grandes máquinas agrícolas e sistemas de monitoramento.

Braço Robótico: desenvolvimento de um braço robótico articulado e portátil para movimentação, posicionamento e suporte de possíveis tarefas a serem realizadas, tais como interação com o ambiente, intervenções e coletas de amostras. Será adotada uma abordagem de desenvolvimento do conjunto baseada em técnicas de Engenharia de Sistemas onde a estrutura mecânica, os componentes eletro-eletrônicos e o software de programação são implementados simultaneamente e em paralelo. Toda a estrutura de computação se baseará em software livre e aberto. A estrutura de hardware computacional a ser adotada primará pelo uso de componentes industriais. Propõem-se uma configuração geométrica de robô do tipo SCARA com uma extremidade alongada para garantir rigidez à estrutura e ao mesmo tempo proporcionar boas velocidades de operação em velocidades de até 2 m/s para o posicionamento da extremidade. A estrutura mecânica deve ser otimizada para reduzir o peso, bem como otimizar o tamanho dos acionadores necessários.

Plataforma Estabilizada: construção de uma plataforma estabilizada, imune a vibrações, oscilações e alterações devidas a movimentos da plataforma robótica, que será utilizada para acoplamento dos módulos desenvolvidos. Para reduzir a influência de perturbações, a plataforma deverá ser montada em isoladores vibracionais que consistem de suportes flexíveis em paralelo com dissipadores de energia. Isso deverá garantir atenuação da amplitude dos deslocamentos devidos à fundação, principalmente os de alta frequência. Quanto às variações do terreno de grandes amplitudes, essas poderão mudar a

orientação dos sistemas embarcados de modo a prejudicar os sistemas de visão e transmissão de dados por satélite.

A seguir é apresentada uma tabela com o resumo dos projetos de robôs presentes na literatura.

Tabela 2. Resumo dos projetos de robôs agrícolas no mundo

Nome do robô Autor / Trabalhos	País	Instituição	Ano
1. Autonomous Crop Treatment Vehicle HAGUE et al., 2000 e HAGUE & TILLET, 1996	Reino Unido	Silsoe Research Institute / Tillett e Haia Technology	1993
2. The weedy robot RUCKELSHAUSEN et al., 2006	Osnabrueck - Alemanha	Faculty of Engineering and Computer Science da University of Applied Sciences	2006
3. Autonomous tractor Copenhagen University MEJNERTSEN & RESKE-NIELSEN, 2006; MOGENSEN et al., 2007; RESKE-NIELSEN et al., 2006; BLACKMORE <i>et al.</i> , 2004a; BLACKMORE et al., 2007; BLACKMORE <i>et al.</i> , 2004c; BLACKMORE <i>et al.</i> , 2004b; BLACKMORE et al., 2001; BLACKMORE <i>et al.</i> , 2002a; http://www.cpf.life.ku.dk/research/safeandreliable/publications.aspx	Orsted - Dinamarca	Technical University of Denmark	2006
4. Autonomous christmas tree weeder BLACKMORE <i>et al.</i> , 2002b; HAVE <i>et al.</i> , 2005	Taastrup - Dinamarca	Royal Veterinary and Agricultural University	2005
5. SAVAGE SAVAGE, 2010	Thessaly, Grécia	Department of Agriculture, Crop Production, and Agricultural Environment. Greece.	2007
6. Autonomous Platform and Information system MADSEN & JAKOBSEN, 2001 BAK & JAKOBSEN, 2004 BISGAARD et al., 2004	Kongens Lyngby - Dinamarca	Department of Control and Engineering design Technical University of Denmark	2004

Tabela 2. Resumo dos projetos de robôs agrícolas no mundo (Continuação)

Nome do robô Autor / Trabalhos	País	Instituição	Ano
7. The Hortibot JØRGENSEN et al., 2006; SØRENSEN et al., 2007; JØRGENSEN et al., 2007; SØRENSEN et al., 2006; NØRREMARK et al., 2006	Horsens - Dinamarca	AARHUS University -Danish Institute of Agricultural Sciences	2006
8. Weeding robot from the University of Wageningen BAKKER et al., 2007; BAKKER, 2009; BAKKER et al., 2010; BAKKER et al., 2006	Wageningen - Netherlands	Agrotechnology and food science systems and control group - University of Wageningen	2009
9. Halmstad ÅSTRAND & BAERVELDT, 2002;	Finlandia	Halmstad University, Halmstad, Sweden	2002
10. SOLERO e SHRIMP LAMON & SIEGWART, 2005 e SIEGWART & NOURBAKHS, 2004	Zürich - Suíça	Eidgenössische Technische Hochschule	2005
11. AURORA MANDOW et al., 1996; GÓMEZ-DE-GABRIEL et al., 1996; MANDOW et al., 1995c, OLLERO et al., 1995, MANDOW et al., 1995a, MANDOW et al., 1995b. http://www.ual.es/personal/rgonzalez/english/publications.htm	Málaga - Espanha	Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática da Universidad de Málaga	1996
12. Six-Wheeled Omnidirectional MOORE & FLANN, 2000; MOORE & FLANN, 2000	Logan - Utah - USA	Center for Self-Organizing and Intelligent Systems, Utah State University,	2000
13. Autonomous Rice Transplanting NAGASAKA et al., 2004 e NAGASAKA et al., 2009; NAGASAKA, 2008; NAGASAKA et al., 2007; NAGASAKA et al., 1999; NAGASAKA et al., 2002.	Tsukuba, Ibaraki - Japan	Department of Farm Mechanization and Engineering, National Agricultural Research Center,	2004

Tabela 2. Resumo dos projetos de robôs agrícolas no mundo (Continuação)

Nome do robô Autor / Trabalhos	País	Instituição	Ano
14. Autonomous guidance REID et al., 2000	Illinois - USA	College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences	2000
15. AgRover	Iowa - USA	Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa State University	2004
16. Gantry	Illinois - USA	Agricultural and Biological Engineering Department, University of Illinois at Urbana-Champaign	2006
17. VAA, RAM e Agribot FREITAS <i>et al.</i> , 2006; GODOY, 2007; SOUZA, 2007; FREITAS, 2008; GODOY <i>et al.</i> , 2009; TABILE <i>et al.</i> , 2010a; SCORZONI <i>et al.</i> , 2010; TABILE <i>et al.</i> , 2010b; TABILE <i>et al.</i> , 2011; TANGERINO <i>et al.</i> , 2011a; TANGERINO <i>et al.</i> , 2011b; TANGERINO <i>et al.</i> , 2011c; GODOY <i>et al.</i> , 2012; TABILE <i>et al.</i> , 2012	São Paulo - Brasil	Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo	2001

3. CONCEPÇÃO DA PLATAFORMA ROBÓTICA

3.1. Levantamento das necessidades do projeto

Durante o desenvolvimento de projetos multidisciplinares onde cada tarefa é realizada por um profissional específico é comum o surgimento de restrições provenientes de estágios anteriores do processo de criação. Estas são ocasionadas por má organização de tarefas interdisciplinares em projetos complexos. A abordagem proposta visa a resolução destes problemas, fornecendo uma orientação para a concepção e desenvolvimento interdisciplinar de sistemas complexos com estruturas funcionais.

O processo de projeto proposto é baseado na análise funcional e técnicas de decomposição, as quais constituem o quadro principal do projeto. Além disso, o projeto proposto também integra princípios de projeto mecatrônicos, técnicas de projeto concorrentes, simulação por *hardware-in-the-loop* e técnicas de projeto modular dentro do processo de desenvolvimento.

Um esquema de um processo de desenvolvimento é esboçado na Figura 24. O processo inicia do nível mais abstrato e vai até o teste do protótipo do sistema, incluindo os testes necessários para inspecionar o desempenho dos módulos, sub-sistemas e o sistema como um todo. O processo se inicia com a classificação dos objetos e a determinação das características principais do dispositivo. Os resultados são então utilizados na identificação de necessidades e de configurações dos requisitos funcionais e não-funcionais, proporcionando assim, restrições de projeto e os critérios. Seguindo isso, o estágio de *decomposição funcional* é capaz de reunir esses resultados amplos e decompô-los em funções mais simples.

Figura 24. Fluxograma do processo de desenvolvimento de um robô móvel.

A etapa de *decomposição funcional* permite a construção de um esboço de como será o robô móvel, descrevendo as conexões e interações das principais funções do sistema. Visto que parte do princípio de desenvolvimento de sistemas concorrentes, o sistema proposto é analisado a fim de investigar as interações e inter-relações de causa e efeito entre os blocos funcionais que compõem o sistema. Tendo em mente as interações e inter-relações dos blocos funcionais, a lista é produzida para descrever os meios pelos quais cada função pode ser alcançada. Esta lista é usada posteriormente para a determinação de meios alternativos para cada função principal e suas sub-funções, no que tange aos requisitos funcionais, não-funcionais e outros critérios, como proposto. Existe também uma disposição para realimentação, caso isso seja considerado necessário para reformular a decomposição funcional.

Os principais requisitos funcionais estão listados na Tabela 3, e os detalhes mostrados ilustram os resultados da decomposição da análise funcional. A tarefa de decomposição é obtida pela quebra de uma função conhecida em sub-funções, sendo que a integração de cada sub-função gera a função principal. É importante notar que qualquer erro cometido na fase de decomposição funcional, como deixar de inserir uma sub-função,

resultaria em problemas de interface e compatibilidade durante o desenvolvimento do diagrama geral do sistema de blocos.

Tabela 3. Lista dos requisitos funcionais e não funcionais necessários para o projeto.

Funções principais	Decomposição funcional	
	Requisitos funcionais	Requisitos não funcionais
Mobilidade	Alimentacao do sistema	Eficiente e silencioso
	Sistema de locomoção	Bom contato com o solo
	Geração de movimento	Atuação precisa
	Mecanismo de transmissão	Chassi resistente
	Caixa de transmissão	Controle de movimento simples
	Manobrabilidade	Fácil de manobrar
Navegação	Sensoriamento da navegação	Adaptável a mudanças
	Sensoriamento de obstáculos	Estrutura de hardware modular
	Sensoriamento de emergências	Arquitetura flexível
	Sensoriamento de manobras	Acurácia temporal dos sensores
	Interface com o usuário	Controle de movimento preciso
	Sensor de direção e interface	Ativação rápida do sistema
	Saída de dados pré-processados	Hardware de controle modular
Autonomia	Sincronização do controle	
	Adaptativo a ambientes dinâmicos	Auto gerencia de recursos
	Sistema de supervisão geral	Sistema de controle estável
	Cronograma de atividades	Ampla gama de recursos sensoriais
	Sistema de controle de parâmetros	Sincronia temporal
	Seleção do modo de operação	Projeto de controle hierárquico

Mais detalhes sobre a decomposição funcional, formas de identificação de funções principais e a realização de funções base podem ser encontrados em YAVUZ, 1999. A menor quantidade de funções básicas encontradas para a navegação é devido à disponibilidade de meios tecnológicos para realizar essas funções. Portanto, o número de funções de base não é uma indicação direta da simplicidade, mas sim uma indicação da disponibilidade de meios complexos, que cumpram a sub-tarefa identificada ou o sub-requisitos da função.

Um estudo dos parâmetros de projeto e das necessidades do cliente para o projeto de um robô agrícola foi desenvolvido por SØRENSEN *et al.*, 2006; SØRENSEN *et al.*, 2007; SØRENSEN *et al.*, 2008; SØRENSEN *et al.*, 2010. Os autores simulam a aplicação da ferramenta QFD ao projeto de um robô agrícola móvel. A aplicação seguiu o modelo apresentado por CHAN & WU, 2005. Ao longo das publicações dos estudos, novas comparações e conclusões foram apresentadas. As possíveis necessidades dos clientes foram identificadas utilizando-se diversas fontes de informação, tais como revisões de

literatura, pesquisas atuais na área de robótica e a triagem de produtos existentes. Estas fontes possibilitaram a consolidação da exigência de identificação preliminar.

Para o presente trabalho foi utilizada a metodologia descrita acima, com algumas adaptações no sentido de adequar os dados à realidade a qual foi conduzida esse trabalho. Durante esta etapa, foram elencados trinta e cinco requisitos dos clientes, sendo que cada um teve um peso relativo associado. Os requisitos do cliente foram distribuídos em seis categorias principais, chamadas de requisitos genéricos, sendo eles: capacidade de trabalho; funcionamento; danos; economia; meio ambiente; projeto. As categorias principais e seus respectivos requisitos do cliente são apresentados na Tabela 4 e Figura 25.

Tabela 4. Requisitos dos clientes.

Categoria Principal		Requisitos dos clientes
(1)	Capacidade de Trabalho	(1) Eficiente, (2) Trabalhar sem nenhum tipo de supervisão, (3) Reduzir a quantidade de homem por hora, (4) Fácil de montar um módulo externo, (5) Fácil de transportar, (6) Somente pequenas manutenções, (7) Fácil de iniciar um trabalho, (8) Operar sem pausas, (9) Confiável
(2)	Funcionamento	(10) Fácil de operar, (11) Fácil manutenção, (12) Passível de Upgrades, (13) Flexível, (14) Carregar módulo externo, (15) Fácil treinamento do operador, (16) Operar em solo macio, (17) Aquisição de dados automaticamente, (18) Operações em todas as etapas da cultura, (19) Grande poder de manobra
(3)	Danos	(20) Evitar danos as pessoas, animais, obstáculos e etc., (21) Mínimo estrago no ambiente da cultura, (22) Mínimo estrago na cultura
(4)	Economia	(23) Lucrativo, (24) Baixo preço de aquisição, (25) Baixo custo operacional, (26) Rápida depreciação
(5)	Meio Ambiente	(27) Baixo consumo de energia, (28) Baixo ruído, (29) Reduzir trabalho repetitivo, (30) Utilizar energia renovável
(6)	Projeto	(31) Ajustável ao tamanho da fileira, (32) Aparência atrativa, (33) Valor afetivo, (34) Leve, (35) Pequeno

Figura 25. Requisitos dos clientes e sua importância.

Trinta e um parâmetros de projeto foram identificados como tendo potencial para cumprir uma ou, de preferência, vários dos requisitos do cliente (Tabela 5 e Figura 26). No primeiro momento, a quantidade de parâmetros de projeto parece ser muito alta, entretanto não é possível eliminar algum parâmetro sem que isso acarrete o não cumprimento de algum requisito do cliente. Os trinta e um parâmetros técnicos do projeto foram colocados na matriz do QFD, confrontados com os trinta e cinco requisitos dos clientes (com base nas regras do QFD) e em seguida cada um teve sua respectiva importância relativa no projeto calculada.

Tabela 5. Parâmetros de projeto.

Categoria Principal		Parâmetros de projeto
(1)	Capacidade de Trabalho	(1) Semiautônomo; (2) Controlável por módulos externos; (3) Operar sob ausência de iluminação; (4) Tamanho; (5) Opcional para modo de operação tripulado; (6) Configurável por operador; (7) Marcha para transporte; (8) Configurável pelo usuário; (9) Estabilização automática
(2)	Funcionamento	(10) Suscetível a receber ferramentas modulares; (11) Sistema de posicionamento local; (12) Sistema de navegação por satélite; (13) Largura ajustável; (14) Distância sobre terra; (15) Controle remoto; (16) Comprimento ajustável; (17) Software de padrão aberto; (18) Esterçamento infinito das rodas
(3)	Danos	(19) Área de pressão da roda; (20) Vigilância remota; (21) Necessidade de supervisão; (22) Sistema externo de segurança; (23) Sistema interno de segurança
(4)	Economia	(24) Manutenção diária não necessária; (25) Fácil revisão e paradas periódicas; (26) Utilizar peças produzidas em larga escala (27) Utilizar implementos produzidos em larga escala
(5)	Meio Ambiente	(28) Eletro-guiado; (29) Eco-eficiente
(6)	Projeto.	(30) Sistema de terceiro ponto; (31) Aparência visual

Figura 26. Parâmetros de projeto e sua importância relativa.

3.2. Alternativas técnicas do projeto

A geração de meios e alternativas é um processo em que uma série de métodos ou tecnologias são identificados para alcançar uma função específica. O processo é iniciado considerando-se as funções para as quais as alternativas são geradas. Para fornecer os fundamentos para avaliar a forma que cada função pode ser aplicada, uma lista de alternativas é composta, utilizando-se os meios tecnológicos disponíveis.

São apresentados na Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, as funções principais, suas sub-funções, meios relacionados e algumas alternativas disponíveis. As informações apresentadas são baseadas nos trabalhos de YAVUZ & BRADSHAW, 2002; YAVUZ, 2007; BISGAARD *et al.*, 2004; BAKKER *et al.*, 2006; JØRGENSEN *et al.*, 2007; SØRENSEN *et al.*, 2008; BAKKER, 2009; SØRENSEN *et al.*, 2010; MADSEN & JAKOBSEN, 2001. Como pode ser visto a partir desses três tabelas, para uma função específica pode haver mais de um meio, e para cada meio pode haver mais de uma alternativa, o que proporciona diversas

configurações, formas, tamanhos e tipos para avaliação. Portanto, há centenas de milhares de combinações diferentes para os componentes do sistema que compõem um robô. Na verdade, este é o lugar onde a técnica de projeto conceitual comprova a sua utilidade, fornecendo soluções diversas para qualquer problema de projeto. Cada solução ou conjunto de configurações fornece uma solução que é adequada para uma aplicação particular com requisitos específicos. Espera-se que a solução selecionada entregue um sistema de alto desempenho que atenda aos requisitos do projeto. Para superar a complexidade da avaliação das soluções de projeto, são utilizados requisitos não funcionais para eliminar as alternativas, visando a redução do número de possíveis soluções de projeto para um nível administrável.

Tabela 6. Função mobilidade e suas sub-funções relacionadas com as alternativas técnicas disponíveis.

Função - Mobilidade	
Sub-função / Componente	Alternativa
Aplicação	Sensoriamento; Tracionar; Operacional
Local de atuação	Invariante; Anual; Perene; Semi-perene; Indoor; Outdoor
Modo operacional	Autônomo; Tele operado
Ambiente de navegação	Aéreo; Terrestre; Aquático
Realização de manobras	Frequentemente; Esporadicamente; Não realiza
Complexidade das manobras	Complexas; Medianas; Simples
Restrição ao movimento	Omnidirecional; RG inferior a 1 metro; RG superior a 1 metro
Área de operação	Pequena (até 1 ha); Média (1 a 10 ha); Grande (acima de 10 ha)
Velocidade em operação	Pequena (até 1 km/h); Média (1 a 10 km/h); Grande (acima de 10 km/h)
Velocidade em transporte	Pequena (até 1 km/h); Média (1 a 10 km/h); Grande (acima de 10 km/h)
Autonomia	Pequena (até 1 hora); Média (1 a 10 horas); Grande (acima de 10 horas)
Atuadores necessários para realizar tarefa	Laminas de corte; Brocas; Sensores; Jatos
Capacidade máxima de carga	Pequena (até 10 kg); Média (10 a 150 kg); Grande (acima de 150 kg)
Formato da estrutura	Pórtico; Retangular; Baixo; Estreito
Dimensões	Vão livre (altura do chassi ao solo); Largura; Comprimento
Dimensões reguláveis da estrutura	Vão livre (altura do chassi ao solo); Largura; Comprimento
Demanda energética necessária para garantir autonomia prevista*	Pequena (até 0,5 kW/h); Média (0,5 a 15 kW/h); Grande (acima de 15 kW/h) *contabilizar energia gasta no transporte
Fonte de energia	Gasolina/Álcool; Diesel; Querosene; Solução química, Meio Ambiente
Conversor de energia	Baterias; Combustão interna; Turbina; Paineis fotovoltaicos
Sistema de locomoção	Rodado (Três, Quatro ou Seis rodas) Esteira (Duas ou Quatro esteiras) Perna (Quatro ou Seis pernas) Misto (2 Rodas e 2 esteiras; 2 Patins e esteiras) Ar (Bolsa de ar; pás rotativas)
Atuadores do sistema de locomoção	Elétrico (Motor DC; Motor AC; Motor de passo; Atuador linear) Hidráulico (Motor; Pistão) Pneumático (Motor; Pistão) Ligação por embreagem

Sistema de transmissão	Caixa de engrenagens (mecânica, automática) Correia e polia; Direta (gerador de movimento ligado direto ao elemento de locomoção)
Sistema de tração	Roda (Uma; Duas; Quarto FWD, RWD, All-WD) Esteira (Duas, Quatro) Pernas (Movimento síncrono) Ar (Jato propulsão)
Sistema de direção	Sistema com rodas (Velocidade diferencial; Uma, Duas ou Quatro rodas direcionais; Direção articulada; Roda suéca; FWS, RWS, All-WS) Esteiras (Velocidade diferencial; Direção articulada) Misto (Rodas castor; Patins direcionais;) Pernas (Movimento síncrono) Ar (Jato propulsão)
Atuadores do sistema de direção	Elétrico (Motor DC; Motor AC; Motor de passo; Atuador linear) Hidráulico (Motor; Pistão) Pneumático (Motor; Pistão)
Sistema de suspensão	Ausente; Eixo rígido; Independente
Atuadores do sistema de suspensão	Feixe de molas; Mola helicoidal; Ar comprimido; Amortecedor de borracha
Sistema de suspensão ativa	Elétrico; Pneumático; Ausente
Material estrutural	Aço estrutural; Alumínio estrutural; Polímeros; Compósito (Reforço: vidro, carbono, nylon, aramida)
Material de acabamento	Aço estrutural; Alumínio estrutural; Polímeros; Compósito (Reforço: vidro, carbono, nylon, aramida)

Tabela 7. Função navegação e suas sub-funções relacionadas com as alternativas técnicas disponíveis

Função - Navegação	
Sub-função / Componente	Alternativa
Sistema de posicionamento (sensores)	Ultrasônico; GPS; Rádio frequência; Visão; Navegação por interpolação; Odometria; Sistemas mistos (GPS e navegação por interpolação; Navegação por interpolação e visão)
Sistema de orientação	Compasso digital; GPS; Giroscópio; Estimção da posição e orientação (Sistema de softwares; Sistemas de hardware; Sistemas híbridos)
Deteção de obstáculo	Curto Alcance (Sensor de toque (whiskers); Micro chaves (switches) Infravermelho; Infravermelho passivo (Passive Infrared sensor)) Médio alcance (Infravermelho; Ultrasônico) Alto alcance (Telémetro laser (laser range-finder)) Posicionamento de plantas (GPS; Visão; Navegação por interpolação (dead reckoning); Navegação por interpolação e GPS)
Navegação no campo	GPS; GPS e navegação por interpolação ; Visão; Visão e navegação por interpolação; Sensor de toque e navegação por interpolação; Ultrasônico e navegação por interpolação; Óptico e navegação por interpolação; Toque e GPS; GPS e ultrasônico; GPS e óptico ; GPS e visão; GPS visão e navegação por interpolação
Sistema de manobra	Sensor de rotação (Compasso digital; GPS; Giroscópio) Sensor de movimento linear (Compasso digital; GPS; Giroscópio)
Sensor de movimento, leitura e interface	Sensor de direção ; Sensor de interface ; Sensor de leitura (Ambos: Hardware; Software; Híbrido)
Sincronização de movimento e controle	Leitura dos parâmetros de velocidade; Leitura dos parâmetros de direção; Ambiente de controle e captação de amostras; Geração do sinal de ativação; Execução e tempo dos sinais
Interface usuário/máquina	Interface de entrada do usuário (Controle por radio frequência; Controle por infravermelho; Controle por cabo; Teclado alfanumérico;

	SMS; Pda; Pc; Wap; webpage) Interface de resposta do robô (Display LCD; Monitor PC; Alto-falante (speaker); SMS; Pda; Pc; Wap; webpage)
Sensor de saída de dados pré-processados	Checagem de alcance; Filtro de ruído; Captação de amostras
Deteção de situações de perigo	Frente; Atrás; Lado; Solo; Frente atrás e solo; Frente atrás lateral e solo
Sensores de emergência	Deteção de colisão (Sensor de toque (whiskers); Micro chaves (switches)) Deteção de objeto vivo (Passive Infrared sensor)

Tabela 8. Função autonomia e suas sub-funções relacionadas com as alternativas técnicas disponíveis.

Função - Autonomia	
Sub-função / Componente	Alternativa
Adaptação a ambientes dinâmicos	
Entrada de Informações antigas	
Entrada de informações atuais	
Ação de determinação	
Supervisão de todo o sistema	
Manipulação de emergência	
Sensor validação entrada	
Calendário de atividades	Software
Controlador de parâmetros do sistema	Hardware
Seleção do modo operação e execução	Híbrido
Deteção do modo de operação	
Ativação do modo de operação	
Processamento dos sinais dos sensores	
Determinação da ação a ser tomada	
Execução da ação escolhida	
Entrada de dados em modo teleguiado	
Saída de dados processados	

A seguir é apresentada uma descrição dos parâmetros de projeto adotados para a plataforma robótica que foi desenvolvida. Optou-se por discutir os parâmetros de projeto ligados à estrutura mecânica da plataforma robótica móvel em tópicos a fim de facilitar o entendimento. Em cada tópico são discutidas algumas das principais opções existentes, conforme descritos na Tabela 6 e na Figura 24, na sequência o detalhamento dos componentes adotados e suas especificações técnicas. Os tópicos selecionados foram: dimensões, estrutura, sistema de propulsão, sistema de guiagem, sistema de suspensão, sistema de transmissão e fonte de alimentação.

3.3. Escolhas técnicas

O robô agrícola móvel foi concebido para ser usado como uma plataforma experimental para o desenvolvimento de controle, navegação e tecnologias de aquisição de dados para a área agrícola. A principal aplicação do robô é realizar sensoriamento remoto em grandes áreas, de parâmetros agrônômicos dos tipos mais importantes de cultura brasileiras. Ele não requer ações que demandam alta potência, como em operações agrícolas, mas apenas se mova eficientemente neste ambiente.

O projeto da Plataforma Robótica Base foi desenvolvido inteiramente em ambiente virtual. Para isto foi utilizado o software Pro-Engineer e SolidWorks, ambas ferramentas de criação baseada em componentes 3D. Com isso é possível verificar a interferência entre componentes durante o seu funcionamento e caso necessário alterações no projeto podem ser feitas, facilitando assim o processo de desenvolvimento. A estrutura mecânica foi projetada pelo estudo das condições de trabalho requeridas no campo e as características desejadas do projeto. A Figura 27 mostra uma vista isométrica da plataforma robótica com todos os componentes mecânicos que a compõem. Nos tópicos seguintes, após o detalhamento de cada sub-sistema, modelos tridimensionais detalhados são apresentados.

Figura 27. Vista isométrica da plataforma robótica.

Para a Figura 27 as partes indicadas representam: 01 – motor diesel e sistema de bombas hidráulicas; 02 – assoalho; 03 – módulo roda traseiro; 04 – chassi secundário; 05 – chassi principal; 06 – sistema de propulsão; 07 – sistema de suspensão; 08 – módulo roda dianteiro; 09 – sistema de esterçamento.

3.3.1. Dimensões e estrutura

Definiu-se que a estrutura teria formato retangular, onde o lado de maior comprimento fosse paralelo às fileiras de cultivo. O sistema de tração foi acomodado de forma a se deslocar no espaço entre fileiras de cultivo. Esta configuração oferece uma grande estabilidade e permite que o sistema de tração dianteiro e traseiro percorra o mesmo percurso, o que diminui a resistência a rolagem.

Como o robô agrícola móvel é projetado para operar nas principais culturas da agricultura brasileira, durante quase todo o ciclo de crescimento e de pós-colheita, ele exige versatilidade da estrutura visando atender todas as situações. Estabeleceu-se que a estrutura seria em formato pórtico com 1,80 m de distância entre o solo e a base do chassi. Devido à elevada altura do robô agrícola móvel, a distância entre eixos deve ser definida de tal forma que permita que a estrutura vença rampas comumente encontradas em ambientes agrícolas. A curta distância entre eixos melhora a manobrabilidade do veículo, mas também o torna mais difícil de ser controlado. Como o objetivo é construir um veículo flexível, a distância entre eixo foi escolhida de forma a garantir melhor manobrabilidade

Para que fosse possível operar em fileiras de cultivo com diferentes dimensões foi escolhido um chassi onde a bitola poderia ser ajustada. O valor mínimo que se pode alcançar é de 2,25m e a abertura máxima vai até 2,40 m . Para conseguir isso, o sistema foi projetado em módulos independentes: chassi principal e os módulos roda. Com as configurações escolhidas a plataforma possui estabilidade lateral de 33° e frontal de 40°. Entretanto esse valores podem ser alterados adicionando lastro líquido junto as rodas. As dimensões do projeto do robô agrícola móvel são mostradas na Figura 28.

Figura 28. Dimensões do veículo.

O chassi principal é formado por longarinas retas de perfil "U" confeccionadas em aço SAE1045, as uniões são feitas por rebites e parafusos. Junto ao chassi principal, são

fixados o motor que irá alimentar os sistemas de esterçamento e propulsão, reservatórios de óleo hidráulico e de combustível. Acima do chassi principal existe uma segunda armação confeccionada em alumínio estrutural denominada chassi secundário. Este tem a função de base para a fixação do piso da plataforma, que é fabricado em alumínio. Nas extremidades laterais são utilizadas longarinas também em liga de alumínio que tem a função de dar suporte ao chassi secundário.

A Figura 29 mostra o chassi principal (posicionado à esquerda) e o chassi secundário (posicionado à direita). O perfil “U” indicado pelo número 01 e fabricado em alumínio e auxilia no suporte do chassi secundário. Vale salientar que esse não tem função estrutural. Na Figura 29 as partes indicadas representam: 01 – suporte chassi secundário; 02 e 05 – ponto onde está localizado o sistema de regulagem da bitola; 03 – encaixe do módulo roda; 04 – suporte para o motor Diesel; 06 – fixação por rebites; 07 – chassi secundário.

Figura 29. Chassi principal e secundário.

A regulagem da bitola é realizada por meio de um sistema pinhão/cremalheira montado na parte interna do chassi principal. O módulo roda esquerdo e direito são conectados a esse sistema o qual é acionado manualmente. Existe um sistema para o eixo dianteiro e outro para o traseiro e são operados independentemente. A Figura 30 à esquerda mostra o sistema de regulagem juntamente com os dois módulos roda do lado direito o detalhe do sistema de regulagem. Na Figura 30 as partes indicadas representam: 01 e 05 – pinos de engate no módulo roda; 02 – cremalheira; 03 – pinhão; 04 – ponto de torque.

Figura 30. Sistema de regulação da bitola.

A Figura 31 apresenta os principais componentes estruturais do módulo roda. Este é composto por pneu agrícola com dimensões 9,5"X24", modelo SuperQuarteadora fabricado pela *Goodyear Inc.*, aro em aço carbono com dimensões 9,5"X24", motor hidráulico da propulsão, sistema de suspensão por colchão de ar e sistema de esterçamento, que tem como atuador um cilindro hidráulico ligado a uma cremalheira que movimenta uma roda dentada. O sistema de esterçamento permite que a roda seja orientada de 133° a -133° em relação a origem do sistema. Este valor é suficiente para que o centro de giro do robô seja posicionado junto ao seu centro de gravidade, o que possibilita que o robô gire em torno do seu próprio eixo.

Figura 31. Módulo roda: esquerda – vista isométrica; direita vista frontal.

Na Figura 31 as partes indicadas representam: 01 – rotor para acoplamento do circuito hidráulico; 02 – pinhão; 03 – cilindro hidráulico de esterçamento; 04 – potenciômetro

linear; 05 – amortecedor pneumático; 06 – pneu; 07 – motor hidráulico de propulsão; 08 – aro; 09 – apoio do módulo roda no chassi principal; 10 – cremalheira.

3.3.2. Fonte de alimentação

Devido ao elevado conteúdo energético presente nos combustíveis líquidos, como gasolina, álcool e diesel, ainda os torna uma fonte de energia muito prática. A praticidade é vista principalmente em aplicações que consomem grande quantidade de energia, como as agrícolas. Estas, em algumas situações são realizadas em ambientes desprovidos de infraestrutura que permitam o uso de outra fonte de alimentação. A conversão da energia química proveniente da combustão para energia mecânica, pode ser feita de forma fácil utilizando um motor à combustão ou uma turbina. Um motor a diesel é o mecanismo mais comum usado na agricultura. Sua principal característica é o alto torque gerado mesmo em baixas rotações. Alternativas ecologicamente corretas como a adoção de baterias ou energia solar não forneceriam a quantidade de energia suficiente para garantir a autonomia desejada para o robô.

O sistema de alimentação é composto por um motor de ciclo Diesel fabricado pela *Cummins Inc* modelo QSB 3.3. O modelo está de acordo com a norma norte americana *EPA - Tier 4 Interim* e a norma europeia *EU - Stage IIIB* que regulamentam os níveis de emissão de poluentes para máquinas e equipamentos fora de estrada. Possui quatro cilindros dispostos em linha, cilindrada de 3,3 litros cúbicos, turbo-alimentado e com sistema de intercooler o que desenvolve 56 kW (75 HP) e torque de 371 Nm.

O motor é controlado por uma unidade de controle eletrônico que é responsável por controlar todas as variáveis referentes ao funcionamento do motor e fornecer ao usuário informações referentes a operação do motor. Este módulo foi denominado módulo de controle motor Diesel (MCM). A troca de informações entre o operador e o módulo é feita por meio do protocolo padrão de comunicação digital serial baseado na CAN SAE J1939 (CAN 2.0B), com taxa máxima de transmissão de 250 kbits/seg. Como parte do protocolo de funcionamento uma série de mensagens devem ser enviadas de forma temporizada para garantir o funcionamento do motor. Tal ação atua como fator de segurança caso algum erro de comunicação ocorra entre a unidade de controle eletrônico e o sistema que está gerenciando a operação do motor.

3.3.3. Sistema de transmissão

O movimento do motor pode ser transferido para as rodas, esteiras ou qualquer que seja o tipo de atuador por meio de uma transmissão mecânica, como é utilizado na maioria

dos veículos. Esta é feita por meio da seleção de engrenagens em uma caixa de transmissão, esse movimento é então transmitido para os atuadores responsáveis por gerar o movimento. Entretanto esse modelo é difícil de ser controlado o que o torna uma má escolha para um robô. Existem outras opções que podem atender de melhor forma as necessidades do projeto como a adoção de uma Transmissão Continuamente Variável (*Continuously Variable Transmission – CVT*). Outro sistema que tem sido usado com grande frequência em diversas áreas de aplicação, inclusive em sistemas de grande porte, como a agrícola, civil e mineração são os sistemas hidrostáticos. O sistema é composto por uma bomba hidráulica, uma válvula controladora de fluxo e um atuador, que pode ser linear ou rotativo.

Para o robô agrícola móvel, foi adotado um sistema de transmissão hidrostático, onde um motor hidráulico é fixado em cada uma das rodas do robô. O sistema de direção também utiliza a força gerada pelo sistema hidráulico para ser movimentado. Outra vantagem do sistema é a menor dificuldade para se obter uma fonte extra de potência para algum atuador que não foi previsto inicialmente. A operação dos atuadores é feita eletronicamente o que facilita o sistema de controle.

O sistema eletro-hidráulico da plataforma robótica é composto por três sistemas independentes. O primeiro é responsável pela propulsão da plataforma o segundo promove o esterçamento do rodado e o terceiro é um sistema de reserva que está disponível para aplicações futuras. O esquemático do circuito eletro-hidráulico é mostrado na Figura 32. As linhas contínuas indicam a passagem de fluido hidráulico, linhas tracejadas indicam o tráfego de mensagens ou sinais elétricos entre controladoras, atuadores e sensores.

Figura 32. Circuito eletro-hidráulico da plataforma.

Figura 33. Vista geral dos principais componentes da plataforma.

Para a Figura 33 as partes indicadas representam: 01 – radiadores; 02 – motor Diesel; 03 – tanque de combustível; 04 – chassi secundário; 05 – rotor para acoplamento do

circuito hidráulico; 06 – módulo roda; 07 – motor hidráulico de propulsão; 08 – sistema de regulação da bitola; 09 – bombas hidráulicas; 10 – escada; 11 – reservatório de fluido hidráulico; 12 – conjunto de baterias.

3.3.4. Sistema de propulsão

Os sistemas de tração mais comumente encontrados são rodas e esteiras. O sistema de esteira tem melhor sistema de distribuição de carga sobre o solo, reduzindo significativamente a compactação e os distúrbios no solo, maior capacidade de tração especialmente em terra solta. Esse sistema é comumente utilizado em grandes equipamentos ou aqueles que exigem alto desempenho, entretanto tem alto custo de fabricação e manutenção.

Para o robô agrícola móvel, essas propriedades não são muito importantes, mas precisão na direção, baixo consumo de energia e baixo custo de fabricação e manutenção são desejáveis. Sistema com rodas são baratos e, em função da baixa necessidade de tração e carga a ser distribuída, satisfaz as necessidades deste projeto. Por estas e outras razões, foi adotado um sistema de quatro rodas, e para aumentar a capacidade de tração do veículo em condições adversas, foi adotado um sistema de tração independente em cada roda atuantes de forma integral.

Como dito anteriormente, o sistema de propulsão é do tipo transmissão hidrostática e composto por duas bombas variáveis de pistões axiais (*swashplate*) com controle proporcional eletrônico por solenóide, fixadas diretamente ao motor diesel, fabricadas pela *Bosch Rexroth AG*. Cada bomba possui pressão nominal de 30000 kPa (300 bar) e vazão máxima de 28 cm³ por revolução, rotação máxima na vazão máxima 4000 RPM. Como a bomba está ligada diretamente ao motor diesel, e a máxima rotação do motor é 2500 RPM essa passa a ser a máxima rotação aplicada na bomba, o que totaliza uma vazão máxima de 70 l/min por bomba. Cada bomba hidráulica funciona em circuito fechado e é responsável por alimentar dois motores hidráulicos que estão fixados junto à roda da plataforma e o sistema de freio estacionário. No total são instalados quatro motores hidráulicos, também fabricados pela *Bosch Rexroth AG*. Como mostrado na Figura 45, a bomba 1A aciona o motor 2 (traseiro esquerdo) e o motor 4 (dianteiro direito), já a bomba 1B aciona o motor 1 (dianteiro esquerdo) e o motor 3 (traseiro direito). A bomba 1B ainda é responsável por alimentar o sistema de freio das rodas. A vazão variável é conseguida por meio da inclinação do platô oscilante que altera o curso dos pistões axiais, e desta forma varia a vazão de acionamento dos motores hidráulicos, por conseguinte altera a velocidade das rodas. A inclinação do platô é realizada por meio de uma haste acionada por um atuador

hidráulico. O atuador hidráulico, por sua vez, é acionado por uma servo válvula que é controlada eletronicamente por um sinal PWM.

Em aplicações móveis, principalmente na agrícola, é comum que os veículos sejam sujeitos a distintas requisições de velocidade e torque de acordo com o tipo de tarefa a ser realizada. Para atender de forma mais eficiente essas situações é possível alternar o modo de operação do motor selecionando entre um modo onde forneça baixo torque e alta velocidade ou outro que forneça alto torque e baixa rotação. Isto é conseguido por meio da operação de uma válvula integrada, que direciona o fluido hidráulico para apenas metade do motor, enquanto continuamente recircula o fluido na outra metade. Esse modo de deslocamento reduz o fluxo de fluido hidráulico necessário para que a plataforma opere em determinada velocidade resultando em potencial melhoria de eficiência e consequentemente redução do custo operacional. Nesse caso, a velocidade máxima do motor permanece inalterada, estando limitada pelas suas características construtivas.

Os motores utilizados no sistema de transmissão hidrostática são do tipo pistões radiais com dois modos de operação. Estes possuem uma vazão volumétrica nominal de 470 cm^3 por revolução e rotação máxima de 465 RPM. O torque nominal é obtido com um diferencial de pressão de 25000 kPa (250 bar) atingindo 1680 Nm, o torque máximo é de 3030 Nm. Os dois motores hidráulicos posicionados nas rodas traseiras (motor 2 e motor 3) são dotados de freio estático com torque de 2200 Nm, salienta-se que esses são usados somente como freio de estacionamento. O freio é do tipo normalmente fechado sendo liberado por meio de um atuador hidráulico. Este atuador é comandado por um bloco de controle hidráulico fabricado pela *Bosch Rexroth AG*. Os outros dois motores possuem encoders para aferir a velocidade de rotação.

O sistema de controle dos motores é realizado por uma unidade de controle eletrônico (ECU - electronic control unit) fabricada pela *Bosch Rexroth AG* e foi denominado módulo de controle de propulsão (MCP). Por questões de segurança e a fim de evitar ações judiciais que envolvam o eventual mau funcionamento do sistema de propulsão implementado a companhia *Bosch Rexroth AG* somente forneceu bombas e motores com o sistema de controle proprietário incluso. Este é responsável pelo acionamento do platô oscilante da bomba hidráulica e o monitoramento dos parâmetros de pressão e volume de fluido hidráulico deslocado para o motor. A troca de informações entre o operador e este módulo pode ser realizada por meio do protocolo padrão de comunicação digital serial baseado na ISO 11898 (CAN 2.0B), identificador de 29 bits, com máxima taxa de transmissão de 250 kbits/seg. Os dados de entrada do sistema são sentido de deslocamento e velocidade do motor, status do freio estático, os dados de saída são velocidade dos motores, alarmes de falhas da transmissão.

3.3.5. Sistema de guiagem

Entre os sistemas de direção encontrados, existem direção diferencial, direção articulada e direção por esterçamento. Direção diferencial funciona pela diferença entre a velocidade de rotação das rodas ou esteiras de tração, do lado esquerdo e direito. Frequentemente é utilizado por veículos que devem ser muito manobráveis, permitindo que girem no próprio eixo. A transmissão é de simples fabricação, devido às rodas do mesmo lado girarem na mesma velocidade e a posição e orientação das rodas serem fixas. As desvantagens desse sistema é que o veículo gira em torno de um eixo vertical com as rodas deslizando lateralmente, o que significa gasto elevado de energia.

O princípio de direção articulada é alterar o ângulo entre o eixo dianteiro e traseiro do veículo. Este é um sistema pelo qual um veículo de tração nas quatro rodas é dividido em duas metades, dianteira e traseira, que são conectadas por uma articulação vertical. As metades dianteira e traseira são conectadas com um ou mais cilindros hidráulicos que mudam o ângulo entre as metades, incluindo os eixos e rodas dianteiras e traseiras, assim esterçando o veículo. Uma vantagem deste sistema é a simplicidade de construção.

O esterçamento de roda ou sistema de Ackerman é o mais usado por veículos rodoviários. Essa metodologia descreve a relação entre os ângulos de dentro e fora da roda numa curva. Entretanto, esse critério é muito difícil de implementar mecanicamente, devido o modelo ser não-linear. Por essa razão, na maioria dos veículos, ângulos de esterçamento são aproximados para pequenos ângulos de esterçamento, entretanto, divergências não necessariamente significam que a geometria de esterçamento não está adequada para condições reais de direção. Em função da escolha da configuração estrutural, da possibilidade de ajustar a bitola, escolheu-se um sistema que pudesse ser independente para cada roda, de fácil construção e precisão de esterçamento. A Figura 34 apresenta o modelo do sistema de esterçamento.

Figura 34. Sistema de esterçamento: esquerda – vista isométrica; direita vista superior.

Na Figura 34 as partes indicadas representam: 01 – cremalheira; 02 – pinhão; 03 – cilindro hidráulico; 04 – potenciômetro linear; 05 – rolamento de encosto; 06 – estrutura externa do sistema de suspensão; 07 – estrutura externa do sistema de esterçamento; 08 – apoio do módulo roda no chassi principal; 09 – rolamento de apoio da cremalheira (2 por módulo); 10 – estrutura interna do sistema de esterçamento.

O sistema hidráulico de esterçamento é composto por uma bomba de engrenagens fabricadas pela *Bosch Rexroth AG*, com pressão nominal de 25000 kPa (250 bar) e vazão máxima de 11 cm³ por revolução, rotação máxima 3500 RPM. Da mesma forma que no sistema de propulsão, a máxima rotação disponível para a bomba é de 2500 RPM, gerando uma vazão máxima de 27,5 l/min. A bomba está fixada diretamente após as bombas do sistema de propulsão. A bomba alimenta quatro cilindros hidráulicos de dupla ação dimensionados especificamente para esta aplicação, que são controlados por um bloco de controle hidráulico. Este é fabricado pela *Hydraulic Designers Ltda* e possui quatro válvulas proporcionais com oito vias (2 para cada cilindro) acionadas por solenóide, além de controle de pressão e alívio. De acordo com a velocidade e direção que se deseja movimentar o cilindro o bloco de comando direciona o fluxo de fluido hidráulico para contrair ou expandir o cilindro.

Cada cilindro hidráulico está conectado diretamente a um sistema pinhão/cremalheira, como pode ser visto na Figura 34. Ao movimentar o cilindro, este transmite a força para a cremalheira, que por sua vez rotaciona o pinhão, convertendo movimento linear em radial. O pinhão é fixado no eixo que articula o rodado. Em função dos parâmetros construtivos, é permitindo que o rodado esterce, a partir do ponto em que se encontra alinhada com o eixo longitudinal da plataforma, 133° no sentido horário e 133° no

sentindo anti-horário, totalizando 266°. A leitura da posição de cada cilindro é feita por um potenciômetro linear fabricado pela *Gefran S.p.A.* posicionado paralelamente ao cilindro hidráulico, sendo o valor lido convertido para uma escala angular.

O sistema de controle dos cilindros hidráulicos é feito por meio de uma unidade de controle eletrônico (ECU - *electronic control unit*) fabricado pela *Sauer-Danfoss Hidráulica Mobil Ltda*, e foi denominado módulo de controle de guiagem (MCG). O módulo de controle de guiagem atua com um sinal elétrico nos quatro solenóides do bloco de controle hidráulico fabricado pela *Hydraulic Designers Ltda* que, por sua vez, comandam a atuação das válvulas proporcionais. Cada uma das quatro válvulas possui duas vias que estão relacionadas com a direção do movimento da roda. A operação de abertura da válvula libera o fluido hidráulico que executa o movimento linear do cilindro hidráulico. O módulo também lê os valores dos potenciômetros lineares instalados junto aos cilindros hidráulicos. Os dados de entrada do sistema são a abertura da válvula de acionamento do cilindro hidráulico de cada rodado, por meio de um sinal PWM (0 a 100%), que resulta na velocidade de deslocamento do cilindro hidráulico. Os dados de saída são os valores analógicos lidos dos potenciômetros lineares. A troca de informações entre o operador e este módulo pode ser realizada por meio do protocolo padrão de comunicação digital serial agrícola baseado na ISO 11898 CAN 2.0B (identificador de 29 bits), com máxima taxa de transmissão de 250 kbits/seg, e por meio do protocolo CAN SAE J1939 (CAN 2.0B), com taxa máxima de transmissão de 250 kbits/seg.

Como o módulo de controle de guiagem permite que os dados de entrada e saída sejam transmitidos simultaneamente em dois protocolos de comunicação, o CAN ISO 11898 e o CAN SAE J1939, optou-se por conectar junto a este módulo, as mensagens oriundas dos módulos de controle de propulsão (*Bosch Rexroth AG*) e módulos de controle do motor Diesel (*Cummins Inc.*). Desta forma, todas as mensagens de controle da plataforma robótica podem ser acessadas de um único ponto, o que facilita a comunicação com o sistema de controle de navegação.

3.3.6. Sistema reserva

Está disponível um sistema hidráulico de reserva que é composto por uma bomba de engrenagens fabricadas pela *Bosch Rexroth AG*, com pressão nominal de 25000 kPa (250 bar) e vazão máxima de 11 cm³ por revolução e rotação máxima 3500 RPM. Da mesma forma que no sistema de propulsão, a máxima rotação disponível para a bomba é de 2500 RPM, gerando uma vazão máxima de 27,5 l/min. A bomba alimenta um bloco de controle hidráulico fabricado pela *Hydraulic Designers Ltda* com uma válvula proporcional e duas vias acionadas por solenóide. Esse circuito pode ser usado futuramente para suprir diversos

componentes extras que venham a ser inseridos na plataforma. Não existe um módulo de controle disponibilizado exclusivamente para este sistema, entretanto pode se usar a unidade de controle eletrônico do módulo de controle de guiagem, uma vez que esta apresenta canais disponíveis.

A plataforma robótica ainda conta com um conjunto de baterias ligadas em série que fornecem suprimento elétrico para os sistemas de controle, os computadores, os sensores e demais componentes que compõem a estrutura. O sistema foi projetado para suprir eventuais componentes extras que possam ser adicionados à plataforma. Esse sistema conta atualmente com três baterias de 12 Volts e 170 Ah ligadas em paralelo o que resulta em uma disponibilidade de 510 Ah.

3.3.7. Sistema de suspensão

O sistema de suspensão é do tipo pneumático e individual para cada módulo roda e opera com pressão de aproximadamente 250 kPa (35 psi) com curso útil de 0,2 metros. O sistema de suspensão é projetado para absorver vibrações provenientes da rolagem em terrenos acidentados, sendo sua principal função compensar a diferença de altura entre as rodas, visando manter sempre as quatro rodas em contato com o solo. Embora o sistema seja do tipo passivo caso ocorra a necessidade, é possível adaptar um sistema ativo por meio de válvulas de controle de pressão e uma fonte de ar comprimido.

Figura 35. Sistema de suspensão.

Na Figura 35, os componentes indicados representam: 01 – haste de suporte do amortecedor; 02 – ponto de fixação da estrutura interna do sistema de esterçamento; 03 –

apoios de borracha para o fim de curso; 04 – apoio do motor hidráulico de propulsão; 05 - estrutura externa do sistema de suspensão; 06 - estrutura interna do sistema de suspensão; 07 – amortecedor pneumático; 08 – apoio superior do amortecedor; 09 – válvula do amortecedor.

Abaixo são listados os principais componentes utilizados no projeto.

Motor de combustão interna

Motor Diesel fabricado pela Cummins modelo QSB 3.3 de 80 HP, injeção eletrônica, com intercoller.

Sistema hidráulico

Bombas hidráulicas:

Bomba hidráulica para o sistema de propulsão fornecida pela *Bosch Rexroth GP*

código: A10VG28EP3D1/10RNSC10X045SP-S

código: A10VG28EP3D1/10R

Bomba hidráulica para o sistema de esterçamento fornecida pela *Bosch Rexroth GP*

código: AZPFF-11-008/005RRR2020MB

Bomba hidráulica para o sistema de reserva fornecida pela *Bosch Rexroth GP*

código: AZPFF-11-008/005RRR2020MB

Motores hidráulicos:

dois de código: MCR5F470F180Z 3x AO M2WL12S/P1F2 (freio)

dois de código: MCR5F470F180Z 3x B2 M2WL12S/F2 (encoder)

Cilindros Hidráulicos

Cilindros Hidráulicos para o sistema de esterçamento fornecido pela *Hidrover Oleodinâmica Ltda*

código CH07-32-20-335

Comandos Hidráulicos:

Bloco de comando fornecido pela *Hydraulic Designers* para o sistema de esterçamento com quatro válvulas proporcionais com compensador de pressão e alívio.

Bloco de comando auxiliar fornecido pela *Hydraulic Designers* para a bomba de 5cc/rot, acionamento elétrico e alívio.

Bloco de comando fornecido pela *Bosch Rexroth Ga* para liberação do freio de estacionamento

código OFB18206CC0002

Controladoras e Sensores

Unidade de Controle Eletrônico

Controlador Eletrônico do sistema de propulsão fornecido pela Bosch Rexroth

código: RC4-4.

Controlador Eletrônico do sistema de esterçamento fornecido pela *Sauer-Danfoss Hidráulica Mobil Ltda*

código: MC050-010-00000

Potenciômetro linear do sistema de esterçamento fornecido pela *Gefran S.p.A.*

código: PC-F-0360E

Rodado

Rodas 9,5"X24"

Pneus 9,5"X24", Modelo SuperQuarteadora da Goodyear.

Suspensão: Air Spring da Goodyear, Modelo: 1R9-003

Alimentação elétrica

Sistema de alimentação Elétrica 12 Volts, três baterias ligadas em paralelo de 170 Ah

Tanques

Tanque hidráulico de 150 l (de aço fabricação Jacto)

Tanque Diesel de 140 l, Modelo TC140 fornecido pela *Unipac SA.*

código: 553263

3.4. Modelo CAE

A análise por meio de software CAE utiliza técnicas computacionais para calcular a operacionalização e a funcionalidade do produto, além de parâmetros da manufatura muito complexos para métodos clássicos (REGH, 1994). Entre os sistemas CAE atualmente disponíveis, os mais utilizados são os baseados em Método dos Elementos Finitos. Esse método de baseia na divisão do corpo a ser analisado em vários elementos, e por meio da resolução de um sistema de equações dos n elementos finitos em que o corpo foi dividido e suas condições de contorno, encontrar uma aproximação adequada para as tensões e deformações sofridas pelo corpo. Para a análise estrutural da Plataforma Robótica Base foi utilizado o software Ansys Workbench. Esta ferramenta trabalha de forma integrada com ferramentas CAD como o próprio Pro-Engineer o que proporciona agilidade à análise.

Os itens analisados foram o chassi superior e o módulo roda. A eleição do chassi superior para análise se deve ao fato de este ser a sustentação de quase todos os componentes do robô como motores, tanque de combustível, baterias, computador de bordo, dentre outros mais leves. O módulo roda é responsável por sustentar todo o peso da estrutura e recebe todos os impactos provenientes das irregularidades do terreno. Durante a análise de esforços na estrutura, componentes que não exibissem função estrutural foram removidos e substituídos por vetores com características similares aos componentes removidos. Tal fato ocorre visto a grande capacidade de processamento exigida para

análises deste tipo, caso os componentes não fossem removidos a análise seria impossível com os recursos disponíveis.

As propriedades do material que foram utilizados na análise de elementos finitos foram obtidas junto ao fabricante, onde: Módulo de Young: 2×10^5 MPa; Razão Poisson: 0,3 Densidade: $7,85 \times 10^6$ kg mm⁻³ Tensão de Escoamento e Compressão: 250 MPa Tensão Última: 460 MPa.

A primeira análise simula uma condição onde o chassi superior recebe esforços de torção. Situações de torção são muito comuns em veículos de uso *off-road*, em geral a travessia de obstáculos ocasionam esse tipo de esforço. Para isso foi considerado que em cada extremidade haveria um torque de $T_1 = 10 \times 10^4$ N.m na direção do eixo Y, porém ambas com sentidos opostos, torcendo assim a estrutura, como observado na Figura 36.

Figura 36. Chassi superior com esforços de torção.

A análise apresentada na Figura 37 mostra a deformação total da estrutura em função das cargas aplicadas no Chassi superior, na condição descrita na Figura 36. Obteve-se o valor máximo de 17,64 mm, o que está dentro dos parâmetros de projeto adotados.

Figura 37. Análise da deformação total do chassi superior sob esforços de torção.

Na Figura 38, à esquerda, é representada a deformação elástica total equivalente e à direita, a distribuição das tensões equivalentes da estrutura. Os valores encontrados para ambos os casos são baixos, ocorreram alguns locais de acúmulo de tensões, entretanto estes se encontravam dentro dos limites do material adotado.

Figura 38. Esquerda: análise da deformação elástica equivalente; Direita: Análise da tensão equivalente (Von-Mises).

A segunda análise verificada foi em condições de cargas nas extremidades onde se localizam os quatro conjuntos-roda do robô. Essa análise simula a condição de rampa e inclinação lateral da estrutura, onde uma das rodas não se encontra apoiada no solo. Para isso, considerou-se que a estrutura é fixa na sua parte central, como mostram os suportes fixos na Figura 39 abaixo. Já nas extremidades, encontram-se cargas de valores $F_1=13260$ N, $F_2=4410$ N, $F_3=5000$ N e $F_4=473$ N que atuam de forma a simular uma condição extrema de rampa e impacto da estrutura.

Figura 39. Chassi superior em condição de rampa e inclinação lateral sem apoio de uma roda.

A análise apresentada na Figura 40 mostra deformação total da estrutura em função das cargas aplicadas no Chassi superior na condição descrita na Figura 39. A deformação máxima encontrada para a estrutura foi de 10,12 mm, e se encontra no ponto de maior aplicação de carga.

Figura 40. Deformação total da estrutura do chassi superior em condição de rampa e inclinação lateral sem apoio de uma roda.

A Figura 41, à esquerda, mostra a análise da deformação elástica equivalente. Verificou-se valores pouco significantes de deformação, o que era esperado, devido a robustez da Plataforma Robótica Móvel construída. Porém, em ambas as análises pode-se verificar que os pontos de máxima deformação e deformação elástica equivalente são os pontos na extremidade do chassi, o que pode ser um importante ponto de partida para algum reforço que porventura venha a ser realizado. A Figura 41 à direita, representa a tensão equivalente encontrada no robô. Pode-se verificar que os valores máximos encontram-se no ponto de extremidade do chassi.

Figura 41. Esquerda: análise da deformação elástica equivalente; Direita: Análise da tensão equivalente (Von-Mises).

A terceira análise foi realizada no módulo roda, no qual tentou-se simular a condição de impacto com o solo e possíveis forças laterais na roda. Para isso, considerou-se que o módulo roda estava fixo na tubulação superior que faz a ligação do módulo roda com o chassi superior, como mostra o suporte fixo A na Figura 42. Foram consideradas três cargas atuantes representadas por forças. A primeira está na direção do Eixo-X, com sentido positivo e tem módulo $F_1=17700$ N apresentada como Força B. A segunda força está na direção do Eixo-Y com sentido positivo e tem módulo $F_2=17700$ N apresentada como Força C. Essas forças representam uma única força que foi decomposta em X e Y de $F=25000$ N que estaria inclinada em 45° e representaria o impacto do rodado com algum obstáculo. A terceira força considerada é no Eixo-Z, com sentido negativo ao sistema de coordenadas adotado, com módulo $F_3=10000$ N, descrita como Força D e representa qualquer tipo de força aplicada que poderia provocar a flexão do módulo roda.

Figura 42. Conjunto roda e as cargas aplicadas.

A Figura 43 apresenta a deformação total da estrutura. Pode-se observar que houve deformação na extremidade onde a carga foi aplicada e também no conjunto de amortecedor que o conjunto-roda possui. Porém, devido aos baixos valores de deformação (máximo de 3,77 cm) não há grandes preocupações com essas deformações encontradas.

Figura 43. Deformação total do conjunto roda.

A Figura 44 a esquerda mostra a deformação elástica equivalente onde também foram verificados valores dentro dos limites estabelecidos. Observa-se que os pontos de

maiores tensões equivalentes se concentram basicamente na estrutura inferior, no amortecedor e na tubulação superior. A Figura 44 a direita, mostra a tensão equivalente distribuída no módulo roda do robô agrícola.

Figura 44. Esquerda: análise da deformação elástica equivalente; Direita: Análise da tensão equivalente (Von-Mises).

4. MODELOS MATEMÁTICOS

4.1. Conceitos iniciais

A cinemática e a dinâmica veicular se referem à posição, velocidade e aceleração de um meio de transporte em todos os graus de liberdade possíveis em função das entradas do sistema. No sentido mais amplo, um veículo pode incluir navios, aviões, comboios de via férrea, veículos de esteiras e veículos com rodados (GILLESPIE, 1992). Um veículo terrestre pode ser ainda classificado como *on-road* ou *off-road*, baseado no principal ambiente de atuação, embora os princípios fundamentais da dinâmica veicular de ambos sejam semelhantes.

De acordo com KARKEE, 2009 em geral, o termo veículo *off-road* pode incluir todos os tipos de veículos terrestres que operam principalmente em superfícies de terra não pavimentadas, tais como relva de campo de golfe, minas, florestas, um canteiro de obras, ou ainda um campo agrícola. Em algumas literaturas, o termo veículo *off-road* é usado para representar um conjunto relativamente restrito de veículos de lazer, como buggies, quadriciclos ou caminhonetes com tração nas quatro rodas. Outros veículos, como tratores agrícolas, carregadoras e escavadoras, que não cumprem as normas da via pública, e operam principalmente em superfícies de terra são denominados como veículos *off-highway*. No entanto, outras referências utilizam o termo veículo *off-road* para indicar, além dos veículos de lazer, os veículos utilizados na construção, agricultura, mineração e florestal (SCHONBERG *et al.*, 1996; GRANOT, 2002; GUO & ZHANG, 2002). A última definição foi a utilizada neste trabalho.

Acerca da conformação do veículo, um importante parâmetro para a manobrabilidade são os ângulos de esterçamento das rodas. Em típicos veículos *two-wheel steering* (2WS) e *four-wheel steering* (4WS), a orientação das rodas é feita por sistemas mecânicos articulados. A conformação mecânica desses sistemas resulta em baixa manobrabilidade, devido os ângulos de esterçamento estarem limitados a pequenas áreas de ação. A existência de ângulos de esterçamento grandes possibilita que seja alcançado um raio de giro (RG) pequeno. Na prática isto significa que, quanto menor o RG, menor será a translação do veículo em relação a sua mudança de direção. O ideal é que o RG possa chegar a zero, fazendo com que o veículo alterasse somente sua orientação, sem que houvesse translação, ou seja, girar sobre o próprio eixo.

A fim de atender às necessidades expostas acima, outra opção adotada são os sistemas de guiagem modulares e independentes para cada roda, sendo o sistema de acionamento feito por motores elétricos ou hidráulicos. Esta estrutura é chamada de four-

wheel independent steering (4WIS). Desde que as rodas tenham a capacidade de giro ilimitado e independente dos demais conjuntos, a manobrabilidade do veículo pode ser definida como omnidirecional. Isto se deve pela possibilidade que o veículo tem em girar sobre qualquer centro instantâneo de rotação (ICR), inclusive sobre o próprio eixo, permitindo que o deslocamento seja realizado em qualquer direção e orientação. Essa é uma característica muito valorizada para casos em que o veículo precise realizar alguma manobra onde há pouco espaço, ou para agilizar determinado processo.

Por outro lado, a remoção da ligação mecânica entre as rodas induz a outro problema. Em veículos terrestres, é crucial que as rodas mantenham-se alinhadas de tal forma que haja somente rolagem, para a segurança do veículo e economia de energia. Caso haja deslizamento lateral da roda, isto pode induzir uma resultante indesejada na força lateral que age sobre as mesmas, o que irá aumentar a resistência mecânica ao rolamento e ocasionar aumento no consumo energético, além de redução da estabilidade do veículo. A fim de minimizar o deslizamento da roda, os ângulos de esterçamento devem obedecer rigorosamente a restrição imposta pelo modelo cinemático, a qual ocorre em função da geometria do veículo e da posição do centro instantâneo de rotação.

A proposta inicial do robô agrícola móvel demandava distintas formas de interação com o sistema de guiagem. Os meios existentes para operar um veículo são: autônomo, teleoperado ou com o operador embarcado. No caso da teleoperação, ou com o operador embarcado, é necessário que o sistema de entradas seja o mais lógico possível. Neste sentido, espera-se que o processo de guiagem do veículo omnidirecional seja quase automático, assim como é o processo de guiagem de veículos convencionais. Para conduzir um veículo omnidirecional, a interface de direção convencional não é adequada. No sistema convencional, a única entrada do sistema é o esterçamento do volante, que pode ser entendido como o raio de giro instantâneo do veículo. Em um sistema omnidirecional, espera-se que estejam disponíveis vários modos de direção ao operador, como por exemplo, realizar uma curva com raio zero, movimentação lateral ou soluções híbridas estes por sua vez, requerem múltiplas entradas no sistema.

Um veículo é composto por milhares de componentes, e em uma análise mais simplificada, é possível se admitir que a maioria desses componentes se comportam como um único elemento. Para estudos de aceleração ou esterçamento uma única massa relativa localizada no centro de gravidade do veículo (CG) é suficiente. Somente em caso de análises mais detalhadas é necessário separar os rodados do restante do veículo. Nesse caso, o corpo do veículo é denominado de massa amortecida e os rodados são denominados de massa não amortecida.

4.2. Sistema cinemático

O modelo cinemático de um veículo, juntamente com o modelo dinâmico, desempenha um papel importante no projeto e simulação do sistema de controle. Basicamente, o modelo cinemático relaciona a velocidade e orientação das rodas (entradas) com a velocidade e orientação e posição do robô (saídas). O modelo dinâmico relaciona o posicionamento da plataforma em relação ao ambiente (entradas) com as forças atuantes na plataforma durante o deslocamento e o torque necessários para realizar o movimento desejado (saídas).

O objetivo do modelo cinemático é deduzir um conjunto de equações que seja capaz de representar o posicionamento do robô em relação ao sistema de coordenadas inercial. Para o desenvolvimento do modelo cinemático, as seguintes suposições são consideradas:

- A orientação de cada roda (ângulo de esterçamento) é perpendicular ao centro geométrico da plataforma como mostrado na Figura 47.
- Não há escorregamento lateral nem longitudinal em nenhuma das rodas.

As entradas do sistema cinemático são:

- Posição e orientação inicial do centro de massa da plataforma (CM) em relação ao referencial inercial $CM^I = (X_{CM}^I, Y_{CM}^I, Z_{CM}^I, \phi^I, \theta^I, \psi^I)$
- Raio de giro do centro de massa (TR_{CM}),
- Ângulo de deslocamento do raio de giro em relação ao referencial local (β)
- Velocidade escalar da plataforma (v)
- Geometria da plataforma.

As saídas do sistema são:

Posição e orientação final do CM da plataforma em relação ao referencial inercial

$$CM^{I'} = (X_{CM}^{I'}, Y_{CM}^{I'}, Z_{CM}^{I'}, \phi^{I'}, \theta^{I'}, \psi^{I'})$$

Ângulos de esterçamento das rodas (δ_i).

Rotação das rodas (Rot_{w_i}).

Velocidade angular (ω_{CM}^P)

A seguir, é feito o detalhamento das etapas que envolvem o desenvolvimento do modelo cinemático.

1. Definir a posição do CM da plataforma

2. Definir os sistemas de coordenadas local e global
3. Criar a matriz de rotação
4. Usar o sistema de referência local para calcular:
 - a. a posição do centro instantâneo de rotação (ICR).
 - b. a velocidade angular, o deslocamento angular, o deslocamento e a velocidade em X e Y, posição e orientação final do CM.
5. Calcular a posição inicial das rodas, o raio de giro de cada roda, o RPM e ângulo de esterçamento.
6. Usar a matriz de rotação para encontrar a posição real da plataforma no sistema de coordenadas inercial, de acordo com os ângulos ϕ θ ψ .

4.2.1. Sistema de coordenadas

Para o desenvolvimento do modelo cinemático, dois sistemas de coordenadas de referência são definidos, baseados na norma técnica *Standard J670e* (SAE, 1976) da *Society of Automotive Engineer*. Consistem em um sistema de coordenadas local e outro de coordenadas inercial, também chamado de sistema de coordenadas global. Estes sistemas de coordenadas são úteis na definição das forças, acelerações e das velocidades do veículo.

O Sistema de coordenadas local, definido por $\{P\} = \{x, y, z\}$, é um sistema de eixos ortogonais orientados segundo a regra da mão direita com origem fixada junto centro de gravidade (CG) do corpo. Estando o veículo em movimento constante em linha reta em uma estrada horizontal, o *eixo*– x é horizontal apontando para frente, ao longo do plano longitudinal de simetria, o *eixo*– y é lateral emergindo do lado esquerdo do veículo, e o *eixo*– z vertical, apontando em direção oposta ao solo.

O sistema de coordenadas inercial, definido por $\{I\} = \{X, Y, Z\}$, também é um sistema de eixos ortogonais orientados segundo a regra da mão direita, entretanto, com a origem fixada na terra, onde o *eixo*– X e o *eixo*– Y estão em um plano horizontal, e o *eixo*– Z é direcionado para baixo. Geralmente, a origem deste sistema é o ponto que coincide com o início das manobras, ou ainda, pode-se definir um ponto arbitrário no mundo como origem, selecionando o Norte Geográfico como a direção positiva do *eixo*– X e o Leste Geográfico como direção positiva do *eixo*– Y .

A Figura 45 apresenta os sistemas de coordenadas inercial e local, além do posicionamento das variáveis referentes a geometria da plataforma com relação ao seu centro de massa (CM). Por definição, todos os parâmetros analisados nesse trabalho

recebem a indicação na qual o sistema de coordenadas é referenciado por meio de um expoente, sendo $()^I$ representando o sistema inercial e $()^P$ representando o sistema local.

Figura 45. Sistema de coordenadas inercial e local (esquerda) e declaração das variáveis da geometria do robô (direita).

4.2.2. Posição do centro de gravidade (CG)

A posição do CG de um veículo tem grande influência nas características de desempenho, condições operacionais e estabilidade, e sua posição é altamente dependente da posição dos passageiros ou da carga (CANALE, 1989). Canale (1991) desenvolveu uma técnica denominada “passeio do centro de gravidade”, que consiste na determinação de todas as posições possíveis e admissíveis do centro de gravidade de um veículo. Isto permite um estudo mais detalhado no comportamento dinâmico do veículo. Entretanto, no caso da plataforma robótica a variação da massa depende basicamente do nível do tanque de combustível e de sensores que serão embarcados. Estes itens não interferem significativamente na estrutura por isso sua influência foi negligenciada.

Para determinar a massa e a localização do CG foram utilizadas 4 balanças posicionadas nas quatro rodas da plataforma robótica. A primeira análise, feita com o robô posicionado em nível, teve como objetivo determinar a posição do CG em relação ao eixo $-x$ e ao eixo $-y$. Uma segunda análise foi realizada com o robô inclinado, esta serviu para definir a posição do CG em relação ao eixo $-z$. A inclinação do robô foi conseguida inflando os amortecedores pneumáticos traseiros, obtendo-se a posição máxima do seu curso e esvaziando os amortecedores pneumáticos dianteiros, obtendo-se a posição mínima do seu curso. Com isto foi possível obter uma variação na altura entre o eixo traseiro e o dianteiro de 0,15 m (Δh). Para ambas as análises foram realizadas 4 medições e calculada a média. Durante o ensaio o robô estava com todos os fluidos e com o tanque de

combustível pela metade e a bitola dianteira e traseira regulada em 2,4 m. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos na medição.

Tabela 9. Massa sob os rodados.

	Rodados (kg)				Total
	W_1	W_2	W_3	W_4	
Plano	691	713	760	611	2.774
Inclinado	702	706	690	686	2.784
Média					2.779

A fim de encontrar o CG da plataforma robótica, massas equivalentes foram calculadas para todos os quatro lados. A proporção entre as massas dá a posição do CG, como mostrado na Figura 46. As equações de 1 a 3 descrevem a relação entre as massas e as dimensões da plataforma robótica.

$$y = \frac{W_3 + W_4}{W_1 + W_2} \cdot 2,4 / \left(1 + \frac{W_3 + W_4}{W_1 + W_2} \right) = 1,19 \text{ m} \quad 1$$

$$x = \frac{W_2 + W_3}{W_1 + W_4} \cdot 3,0 / \left(1 + \frac{W_2 + W_3}{W_1 + W_4} \right) = 1,60 \text{ m} \quad 2$$

$$h_{CM} = \frac{\left[(W_{1(inc)} + W_{4(inc)}) \cdot \cos(2,4 / \Delta h) - (W_1 + W_4) \right] \cdot 2,4}{(W_2 + W_3) \cdot \sin(3,0 / \Delta h)} = 1,47 \text{ m} \quad 3$$

Figura 46. Distribuição de massa da plataforma robótica em plano (esquerda) e inclinada (direita).

Segundo REIMPELL *et al.*, 2001 e GILLESPIE, 1992, em geral, é desejável que o CG de um veículo seja o mais baixo possível. Isto colabora para um melhor desempenho do veículo quando este está sujeito a esforços dinâmicos, bem como para o aumento da

estabilidade. Estruturas em pórtico, como o caso da plataforma robótica e algumas máquinas agrícolas, tendem a ter um CG elevado, devido a sua configuração. Uma alternativa para reduzir a altura do CG é acrescentar lastro, podendo ser sólido ou líquido, em pontos estratégicos da estrutura. No caso da plataforma robótica, a melhor opção é o uso de lastro líquido dentro do pneu, que além de reduzir a altura do CG, ainda reduz um eventual movimento oscilatório, similar a uma combinação de movimentos de salto e inclinação longitudinal (WILEY & TURNER, 2008).

4.2.3. Matriz de rotação

A orientação angular do sistema de coordenadas local em relação ao sistema de coordenadas inercial é definida pelos ângulos de Euler. Estes descrevem a orientação de um corpo rígido em um espaço euclidiano tridimensional. Para dar ao corpo uma orientação específica, ele deve ser submetido a uma sequência de 3 rotações. Na representação de rotação por ângulos de Euler, considera-se que a matriz de rotação é formada pelo produto entre três matrizes de rotação independentes para cada um dos eixos de um sistema cartesiano tridimensional.

Considerando-se que as matrizes associadas a cada um dos eixos sejam dadas por $\mathfrak{R}(x, \phi)$, $\mathfrak{R}(y, \theta)$, $\mathfrak{R}(z, \psi)$, os ângulos ϕ , θ , ψ , associados respectivamente aos eixos x, y e z, são os ângulos de Euler. Adotando um sistema de referência e um sentido para a contagem dos ângulos, que para esse caso utilizou-se um sistema dextrogiro para todos os eixos, pode-se obter as matrizes de rotação $\mathfrak{R}(x, \phi)$, $\mathfrak{R}(y, \theta)$, $\mathfrak{R}(z, \psi)$, que são dadas por:

Rotação em rolagem: Rotação dos eixos x, y e z em torno do eixo-x por um ângulo ϕ ($-\pi \leq \phi \leq \pi$) resultando nos eixos x, y' e z'.

$$\mathfrak{R}(x, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad 4$$

Rotação em arfagem: Rotação dos eixos x, y' e z' em torno do eixo-y por um ângulo θ ($-\pi \leq \theta \leq \pi$) resultando nos eixos x', y' e z''.

$$\mathfrak{R}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad 5$$

Rotação em guinada: Rotação dos eixos x', y' e z'' em torno do eixo-z por um ângulo ψ ($-\pi \leq \psi \leq \pi$) resultando nos eixos x'', y'' e z''.

$$\mathfrak{R}(z, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 6$$

Como o produto de matrizes é não comutativo, a ordem das rotações intermediárias, no caso de rotações sucessivas, afeta a matriz resultante. Assim, assumindo uma rotação inicial dada por $\mathfrak{R}(x, \phi)$, uma secundária por $\mathfrak{R}(y, \theta)$ e uma rotação final dada por $\mathfrak{R}(z, \psi)$ a matriz de rotação resultante pode ser escrita pela equação 7.

$$\mathfrak{R}_I^P = \mathfrak{R}(z, \psi) \cdot \mathfrak{R}(y, \theta) \cdot \mathfrak{R}(x, \phi) \quad 7$$

Desenvolvendo-se a equação, obtém-se a equação 8.

$$\mathfrak{R}_I^P = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \cos \psi & \sin \phi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi - \cos \phi \cdot \sin \psi & \cos \phi \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta + \sin \psi \cdot \sin \phi \\ \cos \theta \cdot \sin \psi & \sin \phi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \phi \cdot \cos \psi & \cos \phi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi - \sin \phi \cdot \cos \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \cdot \sin \phi & \cos \theta \cdot \cos \phi \end{bmatrix} \quad 8$$

Por meio da matriz de rotação encontrada é possível converter um ponto do sistema de coordenadas local para o global por meio da equação 9.

$$\begin{bmatrix} X^P & Y^P & Z^P \end{bmatrix}^T \cdot \mathfrak{R}_I^P = \begin{bmatrix} X^I & Y^I & Z^I \end{bmatrix}^T \quad 9$$

4.2.4. Ângulo de esterçamento das rodas

Em um modelo cinemático, assume-se que os pneus direcionais do veículo estão viajando na mesma direção que a direção de guinada do veículo. Com este pressuposto, as respostas do sistema não terão estados de aceleração e a fidelidade de comportamentos transitórios será comprometida. Além disso, as respostas de um veículo a uma entrada de direção são determinadas apenas pelos parâmetros geométricos. A Figura 47 ilustra o posicionamento das variáveis referente ao modelo cinemático do robô. A Figura 48 mostra o comportamento da plataforma em função do ângulo β adotado.

Figura 47. Declaração das variáveis do modelo cinemático.

Figura 48. Comportamento da plataforma em função do ângulo adotado.

Inicialmente, o modelo cinemático foi desenvolvido considerando os vetores expressos no sistema de referência local. Posteriormente, por meio da matriz de rotação, o resultado será expresso no sistema de referência inercial. Por definição, a posição e a orientação do centro de massa da plataforma no sistema local são nulas, pois coincidem com a origem do sistema de coordenadas, como pode ser visto na Figura 47. Com base no raio de giro desejado (TR_{CM}) e na posição do centro instantâneo de rotação, que é definida

pelo ângulo β , é possível obter a posição do centro instantâneo de rotação $ICR^P = [X_{ICR}^P, Y_{ICR}^P, 0]^T$, como apresentado nas equações 10 e 11.

$$X_{ICR}^P = TR_{CM} \cdot \cos(\beta + \pi/2) \quad 10$$

$$Y_{ICR}^P = TR_{CM} \cdot \sin(\beta + \pi/2) \quad 11$$

O próximo passo é determinar a posição de cada roda. Esta informação é importante para determinar o ângulo de esterçamento e a rotação do motor de propulsão. A posição é definida pela matriz $W_i^P = [X_{W_i}^P, Y_{W_i}^P, 0]^T$, sendo $i = (1, 2, 3, 4)$ representando a posição dos rodados no chassi nomeadas no sentido anti-horário iniciando pelo rodado dianteiro esquerdo e calculada pelas equações 12 a 15:

$$W_1^P = (X_{W_1}^P = L_F, Y_{W_1}^P = W_{FL}) \quad 12$$

$$W_2^P = (X_{W_2}^P = -L_B, Y_{W_2}^P = W_{BL}) \quad 13$$

$$W_3^P = (X_{W_3}^P = -L_F, Y_{W_3}^P = -W_{BR}) \quad 14$$

$$W_4^P = (X_{W_4}^P = L_F, Y_{W_4}^P = -W_{FR}) \quad 15$$

Dada a posição das rodas é possível calcular k_i (Figura 47) por meio da equação 16

$$k_i = \sqrt{(X_{W_i}^P)^2 + (Y_{W_i}^P)^2} \quad 16$$

Com a posição das rodas e do centro instantâneo de rotação determina-se qual o ângulo de esterçamento para cada uma das rodas, ainda utilizando o sistema de referência local. Para isto, se criam dois vetores para cada roda, os quais serviram de referência para a obtenção do ângulo de esterçamento, como demonstrado na Figura 49. O primeiro vetor $\vec{m}$ tem origem junto a roda que se deseja encontrar o ângulo de esterçamento, esta é definida pelo ponto $W_i^P = [X_{W_i}^P, Y_{W_i}^P, 0]^T$ e termina junto a posição atual do ICR, que é definida pelo ponto $ICR^P = [X_{ICR}^P, Y_{ICR}^P, 0]^T$. O segundo vetor $\vec{n}$ inicia no mesmo ponto do vetor $\vec{m}$, e termina no ponto que define a posição da roda que se encontra no mesmo lado da estrutura $W_j^P = [X_{W_j}^P, Y_{W_j}^P, 0]^T$. Caso a bitola dianteira e traseira sejam iguais o vetor $\vec{n}$ será paralelo a lateral da plataforma robótica. Caso contrário, uma equação, que será apresentada a seguir, será utilizada para corrigir o ângulo de esterçamento. O cálculo do ângulo formado entre os vetores $\vec{m}$ e $\vec{n}$ é feito por meio de uma das propriedades do produto interno, que define:

Para a roda W_1 define-se os seguintes vetores: o vetor $\vec{A}$ é definido pelo par ordenado $\vec{A} = (X_{ICR}^P - X_{W_1}^P, (Y_{ICR}^P - Y_{W_1}^P))$ e o vetor $\vec{B}$ é definido pelo par ordenado $\vec{B} = (X_{W_2}^P - X_{W_1}^P, (Y_{W_2}^P - Y_{W_1}^P))$. Desta forma a norma de $\vec{A}$ é definida como $\|\vec{A}\|$ e calculado segundo a equação 19. Da mesma forma a norma de $\vec{B}$ é definida como $\|\vec{B}\|$ e calculado equação 20.

$$\|\vec{A}\| = \sqrt{(X_{ICR}^P - X_{W_1}^P)^2 + (Y_{ICR}^P - Y_{W_1}^P)^2} \quad 19$$

$$\|\vec{B}\| = \sqrt{(X_{W_2}^P - X_{W_1}^P)^2 + (Y_{W_2}^P - Y_{W_1}^P)^2} \quad 20$$

Aplicando o produto vetorial entre $\vec{A}$ e $\vec{B}$ obtemos:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = [(X_{ICR}^P - X_{W_1}^P) \cdot (X_{W_2}^P - X_{W_1}^P)] + [(Y_{W_2}^P - Y_{W_1}^P) \cdot (Y_{ICR}^P - Y_{W_1}^P)] \quad 21$$

O próximo passo é montar a matriz com os pontos que definem $\vec{A}$ e $\vec{B}$, para posteriormente orientar o ângulo entre esses vetores.

$$M_1 = \begin{bmatrix} (X_{ICR}^P - X_{W_1}^P) & (Y_{ICR}^P - Y_{W_1}^P) \\ (X_{W_2}^P - X_{W_1}^P) & (Y_{W_2}^P - Y_{W_1}^P) \end{bmatrix} \quad 22$$

De forma similar realiza-se o processo para as outras rodas, assim para a roda W_2 tem-se o vetor $\vec{C}$ definido por $\vec{C} = (X_{ICR}^P - X_{W_2}^P, (Y_{ICR}^P - Y_{W_2}^P))$ e o vetor $\vec{D}$ definido por $\vec{D} = (X_{W_1}^P - X_{W_2}^P, (Y_{W_1}^P - Y_{W_2}^P))$. A norma de $\vec{C}$ é definida como $\|\vec{C}\|$ (equação 23) e a norma de $\vec{D}$ é definida como $\|\vec{D}\|$ (equação 24). Observa-se que $\|\vec{D}\|$ é igual a $\|\vec{B}\|$.

$$\|\vec{C}\| = \sqrt{(X_{ICR}^P - X_{W_2}^P)^2 + (Y_{ICR}^P - Y_{W_2}^P)^2} \quad 23$$

$$\|\vec{D}\| = \sqrt{(X_{W_1}^P - X_{W_2}^P)^2 + (Y_{W_1}^P - Y_{W_2}^P)^2} \quad 24$$

Aplicando o produto vetorial entre $\vec{C}$ e $\vec{D}$ obtemos:

$$\vec{C} \cdot \vec{D} = [(X_{ICR}^P - X_{W_2}^P) \cdot (X_{W_1}^P - X_{W_2}^P)] + [(Y_{W_1}^P - Y_{W_2}^P) \cdot (Y_{ICR}^P - Y_{W_2}^P)] \quad 25$$

A matriz com os pontos dos vetores $\vec{C}$ e $\vec{D}$ é definida como:

$$M_2 = \begin{bmatrix} (X_{ICR}^P - X_{W_2}^P) & (Y_{ICR}^P - Y_{W_2}^P) \\ (X_{W_1}^P - X_{W_2}^P) & (Y_{W_1}^P - Y_{W_2}^P) \end{bmatrix} \quad 26$$

Para a roda W_3 tem-se o vetor $\vec{E}$ definido por $\vec{E} = (X_{ICR}^P - X_{W_3}^P), (Y_{ICR}^P - Y_{W_3}^P)$ e o vetor $\vec{F}$ definido por $\vec{F} = (X_{W_4}^P - X_{W_3}^P), (Y_{W_4}^P - Y_{W_3}^P)$. A norma de $\vec{E}$ é definida como $\|\vec{E}\|$ (equação 27) e a norma de $\vec{F}$ é definida como $\|\vec{F}\|$ (equação 28).

$$\|\vec{E}\| = \sqrt{(X_{ICR}^P - X_{W_3}^P)^2 + (Y_{ICR}^P - Y_{W_3}^P)^2} \quad 27$$

$$\|\vec{F}\| = \sqrt{(X_{W_4}^P - X_{W_3}^P)^2 + (Y_{W_4}^P - Y_{W_3}^P)^2} \quad 28$$

Aplicando o produto vetorial entre $\vec{E}$ e $\vec{F}$ obtemos:

$$\vec{E} \cdot \vec{F} = [(X_{ICR}^P - X_{W_3}^P) \cdot (X_{W_4}^P - X_{W_3}^P)] + [(Y_{W_4}^P - Y_{W_3}^P) \cdot (Y_{ICR}^P - Y_{W_3}^P)] \quad 29$$

A matriz com os pontos dos vetores $\vec{E}$ e $\vec{F}$ é definida como:

$$M_3 = \begin{bmatrix} (X_{ICR}^P - X_{W_3}^P) & (Y_{ICR}^P - Y_{W_3}^P) \\ (X_{W_4}^P - X_{W_3}^P) & (Y_{W_4}^P - Y_{W_3}^P) \end{bmatrix} \quad 30$$

Para a roda W_4 tem-se o vetor $\vec{G}$ definido por $\vec{G} = (X_{ICR}^P - X_{W_4}^P), (Y_{ICR}^P - Y_{W_4}^P)$ e o vetor $\vec{H}$ definido por $\vec{H} = (X_{W_3}^P - X_{W_4}^P), (Y_{W_3}^P - Y_{W_4}^P)$. A norma de $\vec{G}$ é definida como $\|\vec{G}\|$ (equação 31) e a norma de $\vec{H}$ é definida como $\|\vec{H}\|$ (equação 32). Observa-se que $\|\vec{G}\|$ é igual a $\|\vec{H}\|$.

$$\|\vec{G}\| = \sqrt{(X_{ICR}^P - X_{W_4}^P)^2 + (Y_{ICR}^P - Y_{W_4}^P)^2} \quad 31$$

$$\|\vec{H}\| = \sqrt{(X_{W_3}^P - X_{W_4}^P)^2 + (Y_{W_3}^P - Y_{W_4}^P)^2} \quad 32$$

Aplicando o produto vetorial entre $\vec{G}$ e $\vec{H}$ obtemos:

$$\vec{G} \cdot \vec{H} = [(X_{ICR}^P - X_{W_4}^P) \cdot (X_{W_3}^P - X_{W_4}^P)] + [(Y_{W_3}^P - Y_{W_4}^P) \cdot (Y_{ICR}^P - Y_{W_4}^P)] \quad 33$$

A matriz com os pontos dos vetores $\vec{G}$ e $\vec{H}$ é definida como:

$$M_4 = \begin{bmatrix} (X_{ICR}^P - X_{W_4}^P) & (Y_{ICR}^P - Y_{W_4}^P) \\ (X_{W_3}^P - X_{W_4}^P) & (Y_{W_3}^P - Y_{W_4}^P) \end{bmatrix} \quad 34$$

Com as informações coletadas, é possível montar as equações para obtenção dos ângulos entre os vetores, como mostrado nas equações 35 a 38.

$$\gamma_{W_1} = \arccos \left(\frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{\|\vec{A}\| \cdot \|\vec{B}\|} \right) \cdot \frac{|\det[M_1]|}{\det[M_1]} \quad 35$$

$$\gamma_{W_2} = \arccos \left(\frac{\vec{C} \cdot \vec{D}}{\|\vec{C}\| \cdot \|\vec{D}\|} \right) \cdot \frac{|\det[M_2]|}{\det[M_2]} \quad 36$$

$$\gamma_{W_3} = \arccos \left(\frac{\vec{E} \cdot \vec{F}}{\|\vec{E}\| \cdot \|\vec{F}\|} \right) \cdot \frac{|\det[M_3]|}{\det[M_3]} \quad 37$$

$$\gamma_{W_4} = \arccos \left(\frac{\vec{G} \cdot \vec{H}}{\|\vec{G}\| \cdot \|\vec{H}\|} \right) \cdot \frac{|\det[M_4]|}{\det[M_4]} \quad 38$$

O próximo passo é converter o ângulo entre os vetores para o ângulo de esterçamento. Para isto são feitas algumas notações lógicas que adequam os valores. Este não é o valor final do ângulo de esterçamento, ainda é necessário corrigi-lo caso haja diferença entre a bitola dianteira e traseira.

Para a roda W_1 tem-se:

$$\text{if } (TR_{CM} \geq 0 \text{ and } -\pi \leq \gamma_{W_1} \leq -\pi/2) \rightarrow \sigma_1 = \gamma_{W_1} + 3\pi/2 \quad 39$$

$$\text{if } (TR_{CM} \geq 0 \text{ and } -\pi/2 < \gamma_{W_1} \leq \pi) \rightarrow \sigma_1 = \gamma_{W_1} - \pi/2 \quad 40$$

$$\text{if } (TR_{CM} < 0 \text{ and } -\pi \leq \gamma_{W_1} \leq 0) \rightarrow \sigma_1 = \gamma_{W_1} + \pi/2 \quad 41$$

Para a roda W_2 tem-se:

$$\text{if } (TR_{CM} \geq 0 \text{ and } -\pi \leq \gamma_{W_2} \leq \pi/2) \rightarrow \sigma_2 = \gamma_{W_2} + \pi/2 \quad 42$$

$$\text{if } (TR_{CM} \geq 0 \text{ and } \pi/2 < \gamma_{W_2} \leq \pi) \rightarrow \sigma_2 = \gamma_{W_2} - 3\pi/2 \quad 43$$

$$\text{if } (TR_{CM} < 0 \text{ and } -\pi \leq \gamma_{W_2} \leq 0) \rightarrow \sigma_2 = \gamma_{W_2} - \pi/2 \quad 44$$

Para a roda W_3 tem-se:

$$\text{if } (TR_{CM} \geq 0 \text{ and } -\pi \leq \gamma_{W_3} \leq -\pi/2) \rightarrow \sigma_3 = \gamma_{W_3} + 3\pi/2 \quad 45$$

$$\text{if } (TR_{CM} \geq 0 \text{ and } -\pi/2 < \gamma_{W_3} \leq \pi) \rightarrow \sigma_3 = \gamma_{W_3} - \pi/2 \quad 46$$

$$\text{if}(TR_{CM} < 0 \text{ and } -\pi \leq \gamma_{W_3} \leq 0) \rightarrow \sigma_3 = \gamma_{W_3} + \pi/2 \quad 47$$

Para a roda W_4 tem-se:

$$\text{if}(TR_{CM} \geq 0 \text{ and } -\pi \leq \gamma_{W_4} \leq \pi/2) \rightarrow \sigma_4 = \gamma_{W_4} + \pi/2 \quad 48$$

$$\text{if}(TR_{CM} \geq 0 \text{ and } \pi/2 < \gamma_{W_4} \leq \pi) \rightarrow \sigma_4 = \gamma_{W_4} - 3\pi/2 \quad 49$$

$$\text{if}(TR_{CM} < 0 \text{ and } \pi \leq \gamma_{W_4} \leq 0) \rightarrow \sigma_4 = \gamma_{W_4} - \pi/2 \quad 50$$

A equação 51 apresenta o cálculo do erro em função da diferença de bitola dianteira e traseira. Caso as bitolas sejam iguais, o erro é nulo.

$$\gamma_{error} = \left| \arctan \left(\frac{W_{FL} - W_{BL}}{L} \right) \right| \quad 51$$

Finalmente, por meio das equações 52 e 53 obtém-se o ângulo de esterçamento.

$$\text{if}(Wf \geq Wb) \rightarrow \delta_1 = \sigma_1 - \gamma_{error}; \delta_2 = \sigma_2 - \gamma_{error}; \delta_3 = \sigma_3 + \gamma_{error}; \delta_4 = \sigma_4 + \gamma_{error} \quad 52$$

$$\text{if}(Wf < Wb) \rightarrow \delta_1 = \sigma_1 + \gamma_{error}; \delta_2 = \sigma_2 + \gamma_{error}; \delta_3 = \sigma_3 - \gamma_{error}; \delta_4 = \sigma_4 - \gamma_{error} \quad 53$$

Deve se atentar para o fato de que as equações 52 e 53 fornecem um valor entre -180° e 180° , entretanto o sistema de esterçamento possui restrições físicas que o impedem de rotacionar mais que 133° em cada direção. Desta forma, é necessário criar um sistema de equações que restrinja os movimentos da roda. Devido a essa restrição, ocorre o aparecimento de zonas mortas, onde não é possível posicionar o ICR.

Figura 50. Zona morta do sistema de esterçamento.

4.2.5. Correção dos ângulos das rodas

Durante o movimento das rodas é possível que algum problema ou obstáculo impeça a correta movimentação de um dos rodados do sistema. Isso pode ocorrer devido a sobrecarga do sistema hidráulico de esterçamento, falha no sistema de controle de

esterçamento, presença de acidentes no terreno como buracos, tocos de arvores, rochas, desníveis acentuados, etc. Caso haja algum desses imprevistos, será impossível para a roda que apresentar esse problema atingir a orientação determinada pelo usuário. Nesse caso, o sistema deve reconhecer essa falha e, baseado na orientação que o rodado defeituoso adquiriu, recalcular a orientação das demais rodas para atender o requisito de paralelismo entre a orientação da roda e o sentido de movimento da plataforma. Isso evita o arrasto das rodas e consequentemente o aumento das tensões atuantes na estrutura da plataforma. Para resolver isso, recalcula-se a posição do centro instantâneo de rotação, agora em função do ângulo da roda. A nova posição do ICR é dada por:

Figura 51. Reta entre a roda e o ICR.

Sabendo que a equação geral da reta é definida como:

$$y_i = a_i \cdot x_i + b_i \quad 54$$

Assim a equação da reta que passa pelo ponto que define a posição da roda W_i e do ICR é definida por

$$y_i - Y_{W_i}^P = a \cdot (x_i - X_{W_i}^P) \quad 55$$

$$y_i = a \cdot x_i - a \cdot X_{W_i}^P + Y_{W_i}^P \quad 56$$

$$y_i = \tan(\pi/2 - \delta_i) \cdot x_i - \tan(\pi/2 - \delta_i) \cdot X_{W_i}^P + Y_{W_i}^P \quad 57$$

Analogamente a equação 57, a equação da reta que passa pelo ponto que define a posição do CG e do ICR é dada por:

$$y_i = \tan(\beta + \pi/2) \cdot x_i - \tan(\beta + \pi/2) \cdot X_{ICR}^P + Y_{ICR}^P \quad 58$$

Uma vez que o ICR encontra-se na origem do sistema de coordenadas local tem-se:

$$y_i = \tan(\beta + \pi/2) \cdot x_i \quad 59$$

A intersecção entre a reta definida pela equação 58 e a equação 59 é dada pela igualdade entre as duas equações, assim tem-se:

$$\tan(\pi/2 - \delta_i) \cdot x_i - \tan(\pi/2 - \delta_i) \cdot X_{W_i}^P + Y_{W_i}^P = \tan(\beta + \pi/2) \cdot x_i \quad 60$$

$$-\tan(\beta + \pi/2) \cdot x_i + \tan(\delta_i + \pi/2) \cdot x_i = \tan(\delta_i + \pi/2) \cdot X_{W_i}^P - Y_{W_i}^P \quad 61$$

$$x_i = \frac{\tan(\pi/2 - \delta_i) \cdot X_{W_i}^P - Y_{W_i}^P}{-\tan(\beta + \pi/2) + \tan(\pi/2 - \delta_i)} \quad 62$$

Substituindo a equação 62 na equação 59 tem-se:

$$y_i = \frac{\tan(\beta + \pi/2) \cdot [\tan(\pi/2 - \delta_i) \cdot X_{W_i}^P - Y_{W_i}^P]}{-\tan(\beta + \pi/2) + \tan(\pi/2 - \delta_i)} \quad 63$$

$$x_i = X_{ICR}^P \wedge y_i = Y_{ICR}^P$$

Caso a roda que apresente problema for 1 ou 4 usar + caso seja a 2 ou 3 usar -.

$$X_{ICR}^P = \frac{\tan(\pi/2 - \delta_i) \cdot X_{W_i}^P - Y_{W_i}^P}{-\tan(\beta + \pi/2) + \tan(\pi/2 - \delta_i)} \cdot (\pm 1) \quad 64$$

$$Y_{ICR}^P = \frac{\tan(\beta + \pi/2) \cdot [\tan(\pi/2 - \delta_i) \cdot X_{W_i}^P - Y_{W_i}^P]}{-\tan(\beta + \pi/2) + \tan(\pi/2 - \delta_i)} \cdot (\pm 1) \quad 65$$

O novo raio de giro é definido como:

$$TR_{CM} = \sqrt{(X_{ICR}^P)^2 + (Y_{ICR}^P)^2} \quad 66$$

Com os novos dados efetua-se novamente o cálculo dos ângulos de esterçamento.

4.2.6. Movimento do centro de massa

As tarefas de sensoriamento de parâmetros agrícolas exige que a plataforma robótica atenda a certos requisitos, sendo um deles o controle total da velocidade de deslocamento. Para algumas atividades, é necessário que a plataforma se desloque com velocidade constante, a fim de que os sensores embarcados possam coletar as informações necessárias. Outras situações, como o deslocamento entre áreas e manobras, também exigem uma velocidade específica. Por isto, esse parâmetro é definido pelo usuário, e o sistema de controle somente irá interferir no sentido de reduzir a velocidade, caso essa ultrapasse um limite de segurança estabelecido, a qual será em função da posição do robô em relação ao terreno. Dado o raio de giro e a velocidade escalar desejada, é possível calcular a velocidade angular do centro de massa (ω_{CM}^P) (rad/s) por meio da equação 67.

$$\psi^P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \psi^P}{\Delta t} = \frac{d\psi^P}{dt}$$

$$\omega_{CM}^P = \frac{TR_{CM} \cdot v_{CM}}{TR_{CM}^T \cdot TR_{CM}} \quad (\text{forma vetorial})$$

$$\omega_{CM}^P = \frac{v_{CM}}{TR_{CM}} \quad (\text{forma escalar}) \quad 67$$

Por questão de segurança, um condicionador foi desenvolvido. Esse limita a velocidade angular do centro de massa em 0,314 rad/s ou três rotações por minuto. Esse condicionador garante que em curvas muito fechadas a velocidade seja elevada, conforme a equação 68.

$$\text{if}(\omega_{CM}^P > 0,314) \rightarrow \omega_{CM}^P = 0,314 \quad 68$$

A estimativa da posição da plataforma robótica, após serem informados os dados de entrada, é feita com base em um diferencial de tempo Δt . Esse diferencial é um valor fornecido pelo usuário, e tem a função de regular o intervalo de tempo expresso em segundos, que o sistema de controle irá aguardar antes de realizar o próximo cálculo de estimativa de posição. Esse diferencial é a soma do tempo gasto pelo sistema para realizar todos os cálculos da trajetória, acrescido de um tempo que o sistema fica ocioso. Este recurso é interessante, pois evita que o sistema opere de forma contínua, fornecendo resultados sem relevância. Com base na velocidade angular calculada na equação 67 e o tempo determinado, obtém-se o deslocamento angular do centro de massa (φ) (graus) como descrito na equação 69.

$$\varphi^P = \int \omega_{CM}^P(t) dt \quad 69$$

$$\varphi^P = \omega_{CM}^P \cdot \Delta t \quad 70$$

Somando-se o deslocamento angular com a posição inicial do CM do robô obtém-se a orientação final conforme equação 71.

$$\psi^{I'} = \psi^I + \varphi^P \quad 71$$

Juntando as equações 67, 69 e 71 obtém-se:

$$\psi^{I'} = \psi^I + \frac{v_{CM}}{TR_{CM}} \cdot \Delta t \quad 72$$

Determinada a orientação o próximo passo é determinar o deslocamento do CM após a realização do movimento. Por meio das equações 73 e 74 é possível avaliar o espaço percorrido pelo centro de massa.

$$S_X^P = \left[-\left(TR_{CM} - \cos(\varphi^P) \cdot TR_{CM} \right) \cdot \sin(\beta) \right] + \left[\sin(\varphi^P) \cdot TR_{CM} \cdot \cos(\beta) \right] \quad 73$$

$$S_Y^P = \left[\sin(\varphi^P) \cdot TR_{CM} \cdot \sin(\beta) \right] + \left[\left(TR_{CM} - \cos(\varphi^P) \cdot TR_{CM} \right) \cdot \cos(\beta) \right] \quad 74$$

Desta forma pode se definir o deslocamento na forma matricial como:

$$S^P = \begin{bmatrix} S_X^P & S_Y^P & 0 \end{bmatrix}^T$$

Tendo a posição de cada roda e do ICR por meio do teorema de Pitágoras, é possível determinar o raio da circunferência que representa a trajetória da roda pela equação 75.

$$TR_{W_i} = \sqrt{(Y_{ICR}^P - Y_{W_i}^P)^2 + (X_{ICR}^P - X_{W_i}^P)^2} \quad 75$$

Com base na velocidade angular o CM e o trajeto percorrido pela roda, determina-se a velocidade escalar (m/s) de cada roda pela equação 76. Esta pode ser convertida em RPM por meio da equação 77, sendo que D_w é o diâmetro da roda.

$$v_{W_i} = \left| \left(\omega_{CM}^P \cdot TR_{W_i} \right) \right| \cdot \frac{|v_{CM}|}{v_{CM}} \quad 76$$

$$rot_{W_i} = \frac{v_{W_i}}{\pi \cdot D_w} \cdot 60 \quad 77$$

4.2.7. Transformação do sistema de coordenadas

O próximo passo é transformar as coordenadas do sistema local para o inercial. A posição do centro de massa antes de realizar o movimento CM^I é definida como:

$$CM^I = \begin{bmatrix} X_{CM}^I & Y_{CM}^I & Z_{CM}^I \end{bmatrix}^T$$

Após realizado o movimento

$$CM^{I'} = \begin{bmatrix} X_{CM}^{I'} & Y_{CM}^{I'} & Z_{CM}^{I'} \end{bmatrix}^T$$

Utilizando a matriz de rotação definida pela equação 8 tem-se:

$$CM^{I'} = \begin{bmatrix} X_{CM}^{I'} \\ Y_{CM}^{I'} \\ Z_{CM}^{I'} \end{bmatrix} = \mathfrak{R}_I^P \times \begin{bmatrix} S_X^P \\ S_Y^P \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{CM}^I \\ Y_{CM}^I \\ Z_{CM}^I \end{bmatrix}$$

4.3. Modelagem dinâmica

A fim de representar a interação entre o rodado e o solo um estudo da dinâmica do solo foi realizado. Na sequencia é apresentado a distribuição de massa da plataforma de

acordo com sua posição no terreno, e por fim obtém-se os valores referentes a operação do sistema hidráulico de esterçamento e propulsão.

4.3.1. Forças de resistência ao movimento

Todo veículo automotor é um corpo físico que produz forças internamente, e é capaz de fazê-las interagir com o meio externo, sob o comando de um condutor, gerando acelerações e desacelerações com consequentes deslocamentos. Estudar a origem e os efeitos das forças atuantes no movimento do veículo sobre o pavimento é o objetivo do estudo da dinâmica de veículos. As forças atuam principalmente entre o pneu e o pavimento (VIVEROS, 2010).

Em um sentido amplo, a dinâmica do solo é o estudo do desempenho geral de uma máquina em relação ao seu ambiente operacional, o terreno. Existem dois ramos principais: terreno – veículos e terreno – implementos. O primeiro estuda como veículos se comportam quando operados em solos despreparados. São avaliados parâmetros como desempenho de tração, qualidade da rodagem, direcionamento, travessia de obstáculos, travessia com água, além de outros tópicos relacionados. O segundo ramo da mecânica dos solos, lida com o desempenho de máquinas de preparo do solo, como cultivadores e equipamentos de terraplanagem.

O estudo da mecânica do solo, juntamente com uma abordagem de análise de sistemas dinâmicos, pode desempenhar um papel significativo no desenvolvimento e avaliação de equipamentos *off-road* para determinadas missões e ambientes. Desta forma, o conhecimento da mecânica do solo pode ser aplicado direta ou indiretamente para o desenvolvimento, avaliação e seleção das seguintes opções:

- (a) conceitos do veículo e configurações como forma, tamanho, peso e potência;
- (b) sistema de rolagem ou contato do veículo;
- (c) sistema de direção do veículo;
- (d) sistema de suspensão do veículo;
- (e) sistema de transmissão e distribuição de energia do veículo;
- (f) desempenho, manobrabilidade e qualidade da rodagem do veículo.

O papel da mecânica do solo é ilustrado na Figura 52.

Figura 52. Função da mecânica do solo (adaptado de WONG, 2009).

Há muitos exemplos de sucesso da aplicação de mecânica do solo e metodologia de análise de sistemas para o desenvolvimento e avaliação de veículos *off-road*. Um dos exemplos mais marcantes é o desenvolvimento do Veículo Lunar para os programas Apollo.

4.3.2. Desempenho de veículos *off-road*

O desempenho de um veículo *off-road* se refere à sua capacidade de superar a resistência do rolamento, para desenvolver força de tração, vencer barreiras, ou gerar aceleração. Em função da sua utilização, diferentes critérios são empregados para avaliar o desempenho de vários tipos de veículos *off-road*. Para os tratores e afins, sua função principal é fornecer um projeto adequado para tracionar implementos agrícolas. Ela pode ser caracterizada pela força de tração, potência na barra e eficiência de tração. Para veículos de transporte *off-road*, como caminhões usados na mineração ou indústria madeireira, o tempo para transporte da carga da origem ao destino é de interesse. Pode se caracterizar a produtividade e a eficiência do transporte. Para os veículos militares, a velocidade máxima possível pode ser empregada como um critério importante para avaliar o seu desempenho.

A seguir são apresentadas as equações referentes ao modelo cinemático do robô agrícola móvel. A Figura 53 apresenta as variáveis do sistema inercial que estão atuando sobre a plataforma sendo que, a direita uma vista em situação de rolagem e a esquerda uma vista em situação de arfagem.

A seguir verifica-se como a distribuição de massa é alterada quando a plataforma está sujeita a um ângulo de rolagem (inclinação lateral). Antes disso, é preciso calcular como a força centrípeta atua no corpo separando sua componente horizontal e vertical de acordo com as equações abaixo.

$$Fc = \frac{m \cdot v_{CM}^2}{|Tr_{CM}|} \quad 83$$

$$Fc_h = Fc \cdot \cos \phi \quad 84$$

$$Fc_v = Fc \cdot \sin \phi \quad 85$$

Utilizando a roda 1 como exemplo tem-se a seguinte distribuição.

$$m_{W_1}^{I \rightarrow \phi} = m \cdot \frac{L_B \cdot W_{FR}}{L \cdot W_F} \cdot \cos \phi + \frac{Fc_v}{g} \cdot \frac{L_B \cdot W_{FR}}{L \cdot W_F} + \frac{m \cdot h_{CM} \cdot \sin \phi \cdot L_F}{W_F \cdot L} - m \cdot \frac{L_B \cdot W_{FR}}{L \cdot W_F}$$

Simplificando a equação pode se obter a equação geral

$$m_{W_i}^{I \rightarrow \phi} = m_{W_i}^P \cdot \cos \phi + \frac{Fc_v \cdot m_{W_i}^P}{m \cdot g} \pm \frac{m \cdot h_{CM} \cdot \sin \phi \cdot L_F}{W_F \cdot L} - m_{W_i}^P \quad 86$$

Segundo a equação onde é observado o símbolo $\pm$ assume-se que para as rodas 1 e 2 o sinal utilizado é o de soma, e para as rodas 3 e 4 o sinal utilizado é o de subtração.

É preciso ainda verificar o efeito da componente horizontal da força centrípeta e da aceleração na distribuição da massa na plataforma. Entretanto, essas duas forças se comportam de forma diferente em função da orientação da plataforma em relação a posição do centro instantâneo de giro durante o movimento. Essa orientação é definida pelo ângulo β . Por exemplo, caso o ângulo β assuma o valor $\pi/2$, como mostrado na Figura 48, o raio de giro da plataforma é deslocado para a traseira da plataforma, resultando em uma movimentação lateral, deslocando assim o ponto de ação das componentes dinâmicas. Desta forma, a posição relativa das rodas em relação ao CM com base no ângulo β é dada pelas equações abaixo.

$$X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} = \cos(\arcsin(W_{FL} / k_1) - \beta) \cdot k_1 \quad 87$$

$$X_{W_2}^{I \rightarrow \beta} = -\cos(\arcsin(W_{BL} / k_2) + \beta) \cdot k_2 \quad 88$$

$$X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} = -\cos(\arcsin(W_{BR} / k_3) - \beta) \cdot k_3 \quad 89$$

$$X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} = \cos(\arcsin(W_{FR} / k_4) + \beta) \cdot k_4 \quad 90$$

$$Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} = \sin(\arcsin(W_{FL} / k_1) - \beta) \cdot k_1 \quad 91$$

$$Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta} = \sin(\arcsin(W_{BL} / k_2) + \beta) \cdot k_2 \quad 92$$

$$Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} = -\sin(\arcsin(W_{BR} / k_3) - \beta) \cdot k_3 \quad 93$$

$$Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} = -\sin(\arcsin(W_{FR} / k_4) + \beta) \cdot k_4 \quad 94$$

Figura 54. Posicionamento relativo dos rodados.

A componente referente a força centrífuga componente horizontal $m_{W_1}^{I \rightarrow Fc}$ é definida pelas equações 81 a 106.

Para a roda W_1 tem-se:

$$\text{if } (Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_1}^{I \rightarrow Fc} = \frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 95$$

$$\text{if } (Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} > 0) \rightarrow m_{W_1}^{I \rightarrow Fc} = \frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 96$$

$$\text{if } (Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} < 0 \text{ and } Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_1}^{I \rightarrow Fc} = -\frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 97$$

Para a roda W_2 tem-se:

$$\text{if } (Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_2}^{I \rightarrow Fc} = \frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 98$$

$$\text{if } (Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} > 0) \rightarrow m_{W_2}^{I \rightarrow Fc} = \frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 99$$

$$\text{if } (Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta} < 0 \text{ and } Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_2}^{I \rightarrow Fc} = -\frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 100$$

Para a roda W_3 tem-se:

$$\text{if } (Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_3}^{I \rightarrow Fc} = \frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 101$$

$$\text{if } (Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta} > 0) \rightarrow m_{W_3}^{I \rightarrow Fc} = \frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 102$$

$$\text{if } (Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} < 0 \text{ and } Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_3}^{I \rightarrow Fc} = -\frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_3}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_2}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 103$$

Para a roda W_4 tem-se:

$$\text{if } (Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_4}^{I \rightarrow Fc} = \frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 104$$

$$\text{if } (Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} > 0) \rightarrow m_{W_4}^{I \rightarrow Fc} = \frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 105$$

$$\text{if } (Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} < 0 \text{ and } Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_4}^{I \rightarrow Fc} = -\frac{Fc_h \cdot h_{CM} \cdot Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta}}{Y_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (Y_{W_4}^{I \rightarrow \beta} + Y_{W_1}^{I \rightarrow \beta})} \cdot \frac{TR_{CM}}{|TR_{CM}|} \quad 106$$

A componente referente à aceleração $m_{W_i}^{I \rightarrow ac}$ e definida pelas equações 107 a 132.

Para a roda W_1 tem-se:

$$\text{if } (X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_1}^{I \rightarrow ac} = \frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_1}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_4}^{I \rightarrow \beta})} \quad 107$$

$$\text{if } (X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} > 0) \rightarrow m_{W_1}^{I \rightarrow ac} = \frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_1}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_4}^{I \rightarrow \beta})} \quad 108$$

$$\text{if } (X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} < 0 \text{ and } X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_1}^{I \rightarrow ac} = -\frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_1}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_4}^{I \rightarrow \beta})} \quad 109$$

Para a roda W_2 tem-se:

$$\text{if } (X_{W_2}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_2}^{I \rightarrow ac} = \frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_2}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_2}^{I \rightarrow \beta})} \quad 110$$

$$\text{if } (X_{W_2}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} > 0) \rightarrow m_{W_2}^{I \rightarrow ac} = \frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_2}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_2}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_3}^{I \rightarrow \beta})} \quad 111$$

$$\text{if } (X_{W_2}^{I \rightarrow \beta} < 0 \text{ and } X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_2}^{I \rightarrow ac} = -\frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_2}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_2}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_3}^{I \rightarrow \beta})} \quad 112$$

Para a roda W_3 tem-se:

$$\text{if } (X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } X_{W_2}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_3}^{I \rightarrow ac} = \frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_3}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_4}^{I \rightarrow \beta})} \quad 113$$

$$\text{if } (X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } X_{W_2}^{I \rightarrow \beta} > 0) \rightarrow m_{W_3}^{I \rightarrow ac} = \frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_3}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_2}^{I \rightarrow \beta})} \quad 114$$

$$\text{if } (X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} < 0 \text{ and } X_{W_2}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_3}^{I \rightarrow ac} = -\frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_3}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_3}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_2}^{I \rightarrow \beta})} \quad 115$$

Para a roda W_4 tem-se:

$$\text{if } (X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_4}^{I \rightarrow ac} = \frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_4}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_3}^{I \rightarrow \beta})} \quad 116$$

$$\text{if } (X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} > 0 \text{ and } X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} > 0) \rightarrow m_{W_4}^{I \rightarrow ac} = \frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_4}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_1}^{I \rightarrow \beta})} \quad 117$$

$$\text{if } (X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} < 0 \text{ and } X_{W_1}^{I \rightarrow \beta} < 0) \rightarrow m_{W_4}^{I \rightarrow ac} = -\frac{m \cdot ac \cdot h_{CM} \cdot X_{W_4}^{I \rightarrow \beta}}{g \cdot X_{\max}^{I \rightarrow \beta} \cdot (X_{W_4}^{I \rightarrow \beta} + X_{W_1}^{I \rightarrow \beta})} \quad 118$$

Por fim, a distribuição de massa pode ser obtida pela somatória das equações acima, resultando na equação 133.

$$Fz_{W_i}^P = \left(m_{W_i}^P - \left(m_{W_i}^{I \rightarrow \phi} + m_{W_i}^{I \rightarrow \theta} + m_{W_i}^{I \rightarrow Fc} + m_{W_i}^{I \rightarrow ac} \right) \right) \cdot g \quad 119$$

A somatória das forças em z é dada pela equação:

$$\sum Fz^P = Fz_{W_1}^P + Fz_{W_2}^P + Fz_{W_3}^P + Fz_{W_4}^P \quad 120$$

A somatória das forças em x é dada pela equação:

$$\sum Fx^P = m \cdot Fc + \sum Rr \cdot 10^3 - \cos \beta \cdot \sin \theta \cdot m \cdot g + \sin \beta \cdot \sin \phi \cdot m \cdot g \quad 121$$

A somatória das forças em y é dada pela equação:

$$\sum Fy^P = m \cdot \sin \phi + Fc_h$$

122

4.3.3. Comportamento do solo

O comportamento da grande maioria dos tipos de solos encontrados no ambiente agrícola quando sujeito a determinadas tensões, pode ser expresso como uma curva de tensão-deformação segundo o modelo elastoplástico perfeito (WONG, 2009). A característica desse modelo é que, ao se submeter um material a determinada tensão externa, a σ deste apresenta dois regimes distintos. Inicialmente o regime elástico, caracterizado pelo aumento linear da deformação ε a medida que se aumenta a tensão, após atingir a tensão de escoamento σ_e , qualquer mínimo aumento na tensão faz com que o material passe para o regime plástico onde as deformações permanentes ocorrem sem acréscimo da tensão. A transição do estado de equilíbrio elástico para que o regime plástico representa o fracasso do material do terreno (ORTIGAO, 2007, WONG, 2001).

Figura 55. Comportamento mecânico do solo.

De acordo com a Figura 55 a direita, quando o rodado de um trator se movimenta sobre solo agrícola, esse deforma a camada superficial do solo em função do peso da estrutura mecânica. Além disso, ao realizar um esforço tratório o torque originado das rodas é transferido para o solo acarretando o surgimento de uma nova força. Esta é originada a partir da resistência do solo ao cisalhamento, e é denominada força potencial do solo. Tanto no caso de veículos movidos por esteiras, como por pneus, os espaços entre as garras tornam-se preenchidos com solo, de forma que quando o veículo desenvolve esforço tratório máximo, ocorre o cisalhamento. A resistência ao cisalhamento vai depender principalmente das características do solo. Um dos métodos para definir o ponto de ruptura de solos é baseado na teoria de Mohr-Coulomb mostrada na equação 123 (WONG, 2009):

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \Phi$$

123

Sendo que, c é a coesão do material, σ é a tensão de cisalhamento e Φ é o ângulo de resistência interna.

O critério de tensão de Mohr-Coulomb, também chamada de Teoria do Atrito Interno, é usado para materiais friáveis com propriedades de tração e compressão diferentes. Materiais friáveis não possuem um ponto de escoamento específico e, portanto, não é recomendado usar o limite de escoamento para definir a tensão limite. Os parâmetros descritos na equação 123 podem ser medidos por uma variedade de equipamentos, tais como a triaxial e a caixa de cisalhamento por translação. Estes são comumente usados em estudos envolvendo mecânica dos solos, principalmente nas áreas de engenharia civil. O método para análise é descrito em LAMBE, 1951 apud SILVA *et al.*, 2004. Características de um solo brasileiro podem ser vistos na Tabela 10. Os resultados descrevem as características de um Latossolo Vermelho distrófico ao cisalhamento na camada de 0 - 0,05 m em três tipos de preparo do solo e quatro condições de umidade, sendo que c é a coesão do solo e Φ é o ângulo de resistência interna do solo.

Tabela 10. Parâmetros físicos de solos brasileiros típicos.

Latossolo Vermelho distrófico	Cerrado		Semeadura convencional		Semeadura direta	
Densidade [g/cm ³]	0,96		1,21		1,12	
Porosidade [%]	0,61		0,54		0,56	
Teor de argila [g/kg]	533		460		420	
Matéria orgânica [dag/kg]	8,20		2,93		4,43	
Condutividade hidráulica* [cm ³ /h]	182,9		41,3		46,6	
Umidade [%]	c	Φ	c	Φ	c	Φ
5	119	44,1	102	42,0	148	40,7
16	98	42,6	87	41,0	106	38,7
27	131	35,0	53	36,1	58	33,8
38	103	31,4	46	35,4	28	33,0

*Solo saturado

Fonte: SILVA *et al.*, 2004

De acordo com WONG, 2009, a equação de Mohr-Coulomb pode ser reescrita na forma da para equação 124 para se obter a força potencial do solo máxima.

$$F_{max} = c \cdot A c_i + F_{z_{w_i}}^P \cdot \tan \Phi \quad 124$$

Outro ensaio comumente realizado no intuito de se obter as características físicas do solo para avaliação do desempenho de rodados é o ensaio de penetração de placas. Neste ensaio uma placa, retangular ou circular, é posicionada em contato com o solo e uma força vertical é progressivamente aplicada, resultando na penetração da placa no solo. Com esses dados é possível obter uma curva da força aplicada em relação à deformação no solo.

Os parâmetros das fórmulas correspondentes serão considerados propriedades mecânicas que caracterizam a resistência do solo contra a penetração. Baseando-se em dados experimentais, BEKKER, 1960, apud WONG, 2009, propôs uma equação que expressa a relação existente entre a pressão aplicada na placa e a deformação que o mesmo provoca no solo. Essa equação (apresentada no próximo tópico) pode ser usada para descrever o comportamento a deformação no solo causada pela interação solo-rodado.

O ensaio de penetração de placas, principalmente o realizado na área de engenharia civil, geralmente retorna apenas uma constante de rigidez k . No caso da dinâmica da interação solo-rodado o parâmetro k foi separado em dois componentes, um relativo à coesão do solo, k_c , que está relacionado com a largura da área de carga, e outro relativo ao ângulo de atrito interno do solo, k_ϕ . Esses parâmetros são determinados a partir de ensaios de recalque utilizando, pelo menos, duas placas com dimensões diferentes, conforme descrito por PAVLICS, 1958 apud CASTRO NETO, 2001. Essa diferença no método de ensaio é de fundamental importância para a determinação da resistência teórica ao rolamento.

4.3.4. Interação solo-máquina

A interação entre o rodado de um veículo e o terreno é um problema complexo. As características desta interação são influenciadas por um grande número de parâmetros de projeto e da forma de operação, bem como, pelas características do terreno. Existem dois objetivos principais para o estudo da interação rodado-terreno. O primeiro visa prever o desempenho de um rodado em relação aos seus parâmetros de projeto e as condições do terreno. O outro visa prever as mudanças na condição do terreno causadas pela passagem do rodado.

Ambos objetivos citados acima estão diretamente relacionados com a distribuição das tensões normal e de cisalhamento na interface entre o rodado e o terreno. O estudo destas forças é indispensável para se estipular a mecânica desta interação, resultando na formulação de um modelo matemático para prever a geometria da área de contato e as tensões na interface. Isto fornece a base tecnológica para a predição do desempenho de veículos *off-road* e para a avaliação da compactação do terreno, devido ao tráfego de veículos.

Um pneumático submetido à determinada carga pode se comportar como um corpo rígido ou elástico, dependendo da rigidez estrutural do pneu da pressão de inflação e das condições do terreno. Em BEKKER, 1960 apud WONG, 2009 encontra-se uma equação para prever a pressão crítica acima da qual o pneu passa a se comportar como uma roda

rígida, sendo a equação derivada de análises das forças e momentos que agem no pneu. Entretanto essa equação não representava bem o ponto de transição entre os modos de operação rígido e elástico, por isto WONG, 2001 propôs a equação 125 que representa a esta pressão crítica $P_{gr,i}$ [kPa].

$$P_{gr,i} = \left(\frac{k_c}{b_{ti}} + k_\phi \right)^{\frac{1}{2n+1}} \cdot \left(\frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot Fz_{W_i}^P}{(3-n) \cdot b_{ti} \cdot \sqrt{D_W}} \right)^{\frac{2n}{2n+1}} \quad 125$$

Sendo que k_c , k_ϕ e n são parâmetros relacionados ao ensaio de placa e b_{ti} é a largura do pneu.

Quando o pneu está se comportando com um corpo elástico, ocorre uma deflexão na sua parte inferior. Sob estas circunstâncias, pode-se assumir que a porção inferior do pneu, que está em contato com o terreno, tem um formato plano. Além disto, assume-se que a pressão de contato entre o pneu e o solo é igual a soma da pressão de inflação do pneu P_a mais a resistência a deflexão da sua carcaça P_c . Salienta-se ainda que o desvio da forma do pneu assumido na análise acima é apenas uma aproximação do observado na prática. Na realidade, a parte inferior do pneu não é plana, mas defletida gradualmente. Desta forma, podemos definir pelas equações 126 e 127 a pressão na interface rodado-terreno P_t . É interessante notar que quando a carga sobre o pneu e a sua pressão de inflação estão dentro de um determinado limite, a pressão de contato entre o pneu e o solo é menor que a pressão de inflação.

$$\text{if } (P_a + P_c < P_{gr,i}) \rightarrow P_t = P_a + P_c \quad 126$$

$$\text{if } (P_a + P_c > P_{gr,i}) \rightarrow P_t = P_{gr,i} \quad 127$$

Como descrito anteriormente, BEKKER, 1960 desenvolveu uma equação para determinar a deformação do solo em função de uma carga aplicada $z_{e,i}$. Conhecendo as condições do solo e a pressão de contato, podemos definir quanto é esta deformação do solo [m] pela equação 128.

$$z_{e,i} = \left(\frac{P_t}{(k_c / b_{ti}) + k_\phi} \right)^{\frac{1}{n}} \quad 128$$

Por meio da equação 129 podemos calcular o valor aproximado do comprimento de contato do pneu e o solo $l_{t,i}$ [m].

$$l_{t,i} = \frac{Fz_{W_i}^P \cdot 10^{-3}}{b_{ti} \cdot (p_a + p_c)} \quad 129$$

De forma similar podemos obter uma aproximação da área de contato Ac_i [m²] pela equação 130.

$$Ac_i = \frac{Fz_{w_i}^P \cdot 10^{-3}}{P_t} \quad 130$$

A Figura 56 apresenta um comparativo entre o formato da área de contato entre um pneu agrícola e o solo e a deformação ocorrida em função das diferentes condições físicas do solo.

Figura 56. Área de contato em função do tipo de solo (adaptado WONG, 2009).

A resistência ao rolamento Rc_i [kN] em função da compactação do solo pela passagem do rodado é calculada pela equação 131.

$$Rc_i = b_{ti} \cdot \left(\frac{k_c}{b_{ti}} + k_\phi \right) \cdot \frac{z_{e,i}^{n+1}}{n+1} \quad 131$$

Para um pneu com grande deflexão, além da presença de uma força resistiva e da movimentação ocasionada pela compactação do solo, outra quantidade de energia é dissipada na histerese do material do pneumático causada pela sua deformação durante o rolamento. Isto reflete como uma força resistiva ao movimento do rodado. BEKKER & SEMONIN, 1975 desenvolveram a equação 132 que prevê a força resultante Rf_i [kN] ocasionada pela deformação do pneu.

$$Rf_i = \frac{3,581 \cdot b_{ti} \cdot D_w^2 \cdot (P_i + P_c) \cdot \epsilon_i \cdot [0,0349\alpha_i - \sin(2\alpha_i)]}{\alpha \cdot (D_w - 2\delta t_i)} \quad 132$$

Sendo que

A deformação na altura do pneu δt_i [m] é dada por:

$$\delta t_i = \frac{D_w}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_w}{2}\right)^2 - \left(\frac{l_{t,i}}{2}\right)^2} \quad 133$$

O ângulo de contato α_i [graus] entre o pneu e o solo é dado por:

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{D_w - 2\delta t_i}{D_w}\right) \quad 134$$

Coeficiente do pneu ε_i [adimensional] é dado por:

$$\varepsilon_i = 1 - \exp\left(\frac{-k_e \cdot \delta t_i}{h_b}\right) \quad 135$$

Sendo que o valor k_e esta relacionado com a construção do pneu, para um pneu radial o $k_e = 7$ e para um pneu diagonal $k_e = 15$.

A Figura 57 mostra o comportamento do solo em função da pressão de contato entre o pneu e o solo. A esquerda temos a situação onde não há deformação na carcaça do pneu comportando-se assim como um corpo rígido. A direita ocorre a deformação na carcaça do pneu.

Figura 57. Comportamento do pneu em função da pressão crítica de contato (Adaptado WONG, 2009).

Somando as forças resistentes ao movimento ocasionada pela compactação do solo e pela deflexão do pneu, obtemos a resistência ao rolamento do rodado Rr_i .

$$Rr_i = Rc_i + Rf_i \quad 136$$

A resistência ao rolamento total é dada pela soma da resistência de todas as rodas.

$$\sum Rr = Rc_1 + Rc_2 + Rc_3 + Rc_4 \quad 137$$

Como os rodados agrícolas são compostos por inúmeras garras que, como dito anteriormente, são preenchidas com solo dando suporte para a tração, a capacidade de tração do pneu é relacionada com o os parâmetros de cisalhamento do solo e a

conformação da garra. Desta forma, a capacidade de tração por garra F_b pode ser determinada pela equação 138 sendo que

$$F_b = b \left(\frac{1}{2} \gamma_s \cdot h_b^2 \cdot N_\Phi + 2 \cdot c \cdot h_b \cdot \sqrt{N_\Phi} \right) \quad 138$$

Sendo que γ_s é a densidade do solo [g/cm³], h_b é a altura da garra [m], b é a largura da garra e N_Φ é dado por:

$$N_\Phi = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\Phi}{2} \right) \quad 139$$

A capacidade de tração total do rodado Ct_i é definida pelo número de garras que estão em contato com o solo, que pode ser obtida por meio da equação 140, sendo que S_b é o espaço entre uma garra e outra [m].

$$Ct_i = \frac{l_{t,i} \cdot F_b \cdot 1,5}{S_b} \quad 140$$

Outra força resistente ao movimento é verificada durante o esterçamento do rodado. BASTOW & HOWARD, 1993 desenvolveram a equação 141 que prevê o torque necessário para realizar o esterçamento T_{w_i} [N.m].

$$T_{w_i} = \frac{\mu \cdot (Fz_{w_i}^P)^{1,5}}{3 \cdot \sqrt{P_t}} \quad 141$$

Sendo que μ é o coeficiente de atrito entre o terreno e o pneu.

4.4. Sistema hidráulico

Os valores provenientes do modelo dinâmico e cinemático são utilizados como entrada para o sistema hidráulico. Com esses dados e as características dos atuadores, é possível calcular os parâmetros de funcionamento do sistema hidráulico.

4.4.1. Cilindro hidráulico de esterçamento

Calculado o ângulo de esterçamento para cada roda, a etapa seguinte consiste em converter essa informação de um sistema angular para um sistema linear. Este passo é necessário devido a forma de atuação do sistema de esterçamento. O referido sistema é composto por um cilindro hidráulico ligado a um conjunto pinhão/cremalheira que converte o movimento linear em angular. Ligado ao cilindro encontra-se um potenciômetro linear que fornece o feedback de posição ao sistema de controle. A conversão entre o ângulo de

esterçamento, obtido pelas equações 52 e 53, e a leitura fornecida pelo potenciômetro é dada pela equação 142.

$$\delta_i^{pot} = \delta_i \cdot 103 + 16500 \quad 142$$

Em função dos parâmetros construtivos do sistema de esterçamento, é possível determina o deslocamento (em mm) da haste do pistão por meio da equação 143.

$$\Delta X_{cil,i} = \Delta \delta_i^{pot} \cdot \frac{27400}{desl \text{ cilindro } mm} \quad 143$$

Em função da variação do deslocamento no tempo, obtém-se a velocidade do cilindro (em mm/s) pela equação 144.

$$\Delta \dot{X}_{cil,i} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X_{cil,i}}{\Delta t} = \frac{dX_{cil,i}}{dt} = v_{cil,i} \quad 144$$

que pode ser reescrita como:

$$v_{cil,i} = \frac{\Delta X_{cil,i}}{\Delta t} \quad 145$$

Conhecendo-se as dimensões internas do cilindro hidráulico e com base nos dados obtidos do modelo dinâmico é possível calcular a força necessária e consequentemente a pressão requerida do sistema. Utilizou-se um cilindro hidráulico do tipo dupla ação, sendo que neste caso, em razão da presença da haste, a área exposta a pressão do fluido a frente do êmbolo é menor que na área posterior. Para este caso a área exposta à pressão do fluido durante o movimento de expansão é igual a $A_{cil \rightarrow} = 1256 \text{ mm}^2$ e durante o movimento de retração é igual a $A_{cil \leftarrow} = 766 \text{ mm}^2$. A vazão de fluido hidráulico necessária para movimentar a haste do cilindro é em função do volume de fluido que entra no cilindro por unidade de tempo. Nesse caso temos que o caudal do cilindro é dado por:

$$if (v_{cil,i} > 0) \rightarrow Q_{cil,i} = \frac{A_{cil \rightarrow} \cdot v_{cil,i} \cdot 10^{-7}}{\eta_{vol}} \quad 146$$

$$if (v_{cil,i} < 0) \rightarrow Q_{cil,i} = \frac{A_{cil \leftarrow} \cdot v_{cil,i} \cdot 10^{-7}}{\eta_{vol}} \quad 147$$

Por meio do modelo dinâmico é possível calcular o torque necessário para se esterçar o conjunto roda. Por sua vez, a força exigida do cilindro hidráulico é determinada em função deste torque e da distância perpendicular entre o eixo de rotação e o ponto de transferência de força, que nesse caso é o raio primitivo do pinhão. Sabendo a força e a área envolvidas no movimento da haste, é possível calcular a pressão necessária.

$$if (v_{cil,i} > 0) \rightarrow P_{cil,i} = \frac{T_{w_i}}{A_{cil \rightarrow} \cdot \eta_{mec} \cdot 35,6} \cdot 10^5 \quad 148$$

$$if (v_{cil,i} < 0) \rightarrow P_{cil,i} = \frac{T_{w_i}}{A_{cil,i} \cdot \eta_{mec} \cdot 35,6} \cdot 10^5 \quad 149$$

Desta forma, a pressão exigida da bomba corresponde a maior pressão encontrada nos cálculos e a vazão necessária corresponde a soma de todas as vazões.

$$\sum Q_{cil} = Q_{cil,1} + Q_{cil,2} + Q_{cil,3} + Q_{cil,4} \quad 150$$

A potência exigida do sistema é obtida em função da pressão e da vazão de fluido, conforme a equação 151.

$$Pot_{cil,i} = \frac{P_{cil,i} \cdot Q_{cil,i}}{10^3} \quad 151$$

A potência total é calculada somando-se a potência referente a cada roda.

$$\sum Pot_{cil} = Pot_{cil,1} + Pot_{cil,2} + Pot_{cil,3} + Pot_{cil,4} \quad 152$$

4.4.2. Motor hidráulico de propulsão

O sistema de propulsão consiste em um motor hidráulico do tipo pistão radial acoplado diretamente a roda. O torque necessário é calculado pela equação 153

$$T_{mot,i} = \frac{\sum Fx^P \cdot D_W \cdot Fz_{W_i}^P}{2 \cdot \sum Fz^P} \quad 153$$

O modelo selecionado possui uma vazão volumétrica nominal por revolução de $V_g = 470 \text{ cm}^3/\text{rev}$ assim a vazão instantânea do sistema é dado pela equação 154

$$Q_{mot,i} = \frac{cil \cdot rot_{w_i} \cdot V_g}{10^3 \cdot \eta_{vol}} \quad 154$$

A pressão nominal é calculada pela equação 155

$$P_{mot,i} = \frac{T_{mot,i} \cdot \pi}{V_g \cdot \eta_{mec}} \cdot 2 \cdot 10^5 \quad 155$$

Desta forma a pressão exigida da bomba corresponde a maior pressão encontrada nos cálculos e a vazão necessária corresponde a soma de todas as vazões.

$$\sum Q_{mot} = Q_{mot,1} + Q_{mot,2} + Q_{mot,3} + Q_{mot,4} \quad 156$$

A potência para cada roda é definida como

$$Pot_{mot,i} = \frac{\pi \cdot Rot_{w_i} \cdot T_{mot,i}}{3 \cdot 10^4} \quad 157$$

A potência total é calculada somando-se a potência referente a cada roda.

$$\sum Pot_{mot} = Pot_{mot,1} + Pot_{mot,2} + Pot_{mot,3} + Pot_{mot,4} \quad 158$$

A potência total exigida pelo sistema hidráulico é a soma da potencia do sistema de propulsão mais o de esterçamento dada pela equação 159.

$$\sum Pot = \sum Pot_{mot} + \sum Pot_{cil} \quad 159$$

4.5. Sistema de Controle

Por fim, o sistema de controle foi projetado para atender os requisitos de movimentação da plataforma, sendo que os dados obtidos pelos modelos cinemático e dinâmico serviram de entrada.

4.5.1. Sistema de Controle via Rede (Network Control System - NCS)

As arquiteturas de comunicação e controle tradicionalmente usadas em sistemas industriais são do tipo ponto-a-ponto (*point-to-point protocol*), sendo compostas por cabeamento conectando o computador ou dispositivo central de controle a cada sensor e atuador do sistema. Este tipo de controle é centralizado e, por isto, não atende eficientemente os novos requisitos de desenvolvimento de sistemas de controle como modularidade, controle descentralizado, facilidade de diagnóstico e baixo custo (YANG, 2006). A tendência atual é introduzir arquiteturas de redes baseadas em barramento ou *fieldbus* devido a possível melhoria da eficiência, flexibilidade e confiabilidade do sistema, reduzindo o tempo e os custos de instalação e manutenção (MOYNE & TILBURY, 2007b). Devido a essas vantagens, redes *fieldbus* foram rapidamente absorvidas para satisfazer as necessidades de comunicação entre sistemas e equipamentos aplicados em automação e controle (BAILLIEUL & ANTSAKLIS, 2007a).

Aplicações com sistemas de controle distribuído, baseados em redes *fieldbus*, exibem uma abordagem onde o controlador e a planta ficam fisicamente separados e são conectados por uma rede de comunicação industrial. O sinal de controle é enviado para o atuador através de uma mensagem encaminhada via rede, enquanto o sensor amostra a saída da planta e retorna a informação para o controlador, também transmitindo a informação através da rede. Este tipo de implementação em sistemas industriais, onde as malhas de controle são fechadas sob uma rede de comunicação, como mostrado na Figura 1, são denominadas de Sistema de Controle via Redes (NCS - *Networked Control System*) (YANG, 2006).

Figura 58. Estrutura de um sistema de controle via rede (NCS).

O sistema automatizado é composto por múltiplos subsistemas ou processos. O principal objetivo do controle nessa aplicação é a coordenação e a comunicação desses processos, de forma que atendam a requisitos individuais e conjuntos, garantindo um bom funcionamento e desempenho global do sistema. Em NCS, os dispositivos conectados têm que compartilhar da melhor maneira possível o meio disponível, para a troca de informações e ainda cumprir com requisitos temporais de transmissão de dados. Entretanto, o desempenho e a estabilidade de um NCS sempre são afetados pela rede de comunicação e de fatores degenerativos, tais como a amostragem dos sinais e os atrasos de comunicação (*delay*) entre os sensores, atuadores e controladores do sistema (BAILLIEUL & ANTSAKLIS, 2007a). Esses atrasos são resultados do compartilhamento do meio de comunicação com outras malhas de controle e também do tempo de processamento requerido para codificação dos sinais e computação dos dados (LIAN *et al.*, 2002).

De acordo com a área de aplicação da NCS diferentes características são priorizadas, sendo que no automotivo (GAID *et al.*, 2006), é a transmissão de mensagens em tempo real. Geralmente nos NCS, as tarefas de processamento, troca de informações e controle são distribuídas entre várias unidades de controle eletrônico (ECU), dedicadas ao controle de uma parte do processo. Para que a troca de informações entre essas ECU ocorra de maneira eficiente, um grande número de protocolos de comunicação tem sido desenvolvido e aplicado (MOYNE & TILBURY, 2007a), como o Profibus, CAN e Foundation Fieldbus.

4.5.2. Protocolo Control Area Network (CAN)

Entre os protocolos de comunicação serial digital disponíveis para NCS uma das soluções mais difundidas em diferentes áreas é o CAN. O protocolo CAN foi desenvolvido na década de 1980 por Robert Bosch Gmb para promover a interconexão de dispositivos de controle em automóveis (BOSCH, 2010). Em virtude de suas características positivas, em poucos anos esta tecnologia migrou para outras áreas (FARSI *et al.*, 1999) se tornando um

dos protocolos de comunicação mais aplicados em sistemas de controle distribuído, sendo utilizado em áreas como robótica, automação da manufatura, controle de processos e eletrônica embarcada (OTHMAN *et al.*, 2006).

Entre os fatores que norteiam a grande utilização do CAN estão seu baixo custo de desenvolvimento, vasta disponibilidade de dispositivos (microcontroladores, DSPs) com controladores CAN embarcados e outras características interessantes, como o acesso priorizado à rede de comunicação, o robusto método de controle de erros e arbitragem não destrutiva, a possibilidade de configurações de taxas de comunicação de poucos Kb/s até 1 Mb/s, a comunicação de dados utilizando dois fios, o que reduz o custo e complexidade e promove proteção às interferências eletromagnéticas e a utilização de um método de arbitragem de acesso ao barramento que evita colisões. Todas essas distinções determinam sua grande aceitação no meio industrial e acadêmico (SOUZA, 2002; GODOY, 2011)

Atualmente existem três tipos principais de redes CAN em uso. As diferenças entre elas são principalmente a taxa de transferência de dados no barramento e o tamanho do campo de identificação. Existem ainda variações nos padrões como a DeviceNet, CANOpen e J1939 que são baseadas na norma ISO 11898 (CIA, 2010). A Tabela 11 apresenta os principais tipos de redes CAN e suas características.

Tabela 11. Principais tipos de redes CAN.

Nomenclatura	Padrão	Taxa transf máxima	Identificador
CAN low speed	ISO 11519	125 kbps	11 bits
CAN 2.0A	ISO 11898:1993	1 Mbps	11 bits
CAN 2.0B	ISO 11898:1995	1 Mbps	29 bits

Devido ao crescente aumento da utilização de tecnologias de automação e computação em sistemas agrícolas, a troca de informações necessária entre os dispositivos utilizados nessas aplicações pode originar um sistema centralizado bastante complexo. Dentre esses sistemas, as aplicações que mais consomem recursos são as máquinas e implementos, veículos autônomos, robôs móveis e o gerenciamento de estufas e criadouros. Assim, o desenvolvimento de um sistema de controle distribuído constitui uma solução, senão necessária, muito bem vinda, para que esta grande quantidade de dispositivos inteligentes possa ser interconectada e compartilhar, da melhor maneira possível, os dados disponíveis.

Na área agrícola o protocolo CAN possui um padrão específico denominado ISO 11783 - *Tractors and machinery for agriculture and forestry – Serial control and communications data network*, também chamado de ISOBUS. Este é um padrão de comunicação baseado no CAN 2.0B, desenvolvido para a interconexão de sistemas

eletrônicos em máquinas e implementos agrícolas. O comitê da ISO responsável por essa norma é o TC23/SC19/WG1 e está com os trabalhos em fase de conclusão. Muitas especificações deste padrão foram baseadas na norma DIN 9684 e na norma SAE J1939, como a velocidade de transmissão do barramento de 250 kbits/s.

Em aplicações relacionadas com o CAN e com a ISO 11783, o sistema eletrônico que promove a interconexão de um dispositivo ao barramento é denominado *Electronic Control Unit* (ECU) ou Unidade Eletrônica de Controle. Uma única ECU pode ser responsável pela conexão de um ou mais dispositivos a um barramento. Também um dispositivo pode ser conectado a um barramento por uma ou mais ECU. O conjunto formado por ECU e dispositivo constitui um nó CAN. Em uma rede baseada na norma ISO 11783 toda troca de informações entre as ECU ou nós CAN do sistema é realizada por mensagens com formato definido (GODOY, 2011). A Figura 59 exemplifica a aplicação do padrão ISO em uma rede embarcada em um trator e implemento.

Figura 59. Rede ISO 11783 em Máquina e Implemento (Adaptado de SOUZA, 2002).

4.5.3. Sistema de controle propulsão

Como dito anteriormente o sistema de controle dos motores hidráulicos de propulsão são proprietários da *Bosch Rexroth AG*. O processo de início da operação da plataforma deve seguir uma sequencia pré-definida. A primeira etapa é alimentar os módulos de controle de propulsão e esterçamento e do motor Diesel. A partir do momento que o módulo de controle de propulsão é iniciado uma verificação no status das bombas hidráulicas de propulsão e do sistema de freios é feita. A segunda etapa consiste em enviar os comandos para ligar o motor Diesel. Com o motor em funcionamento é possível liberar o sistema de freios e acionar os motores de propulsão. Salienta-se que os motores de propulsão somente são acionados se for detectado que o sistema de freios foi liberado.

A variação da velocidade dos motores de propulsão é feita pela mudança da posição do platô oscilante da bomba hidráulica, o qual por sua vez, é feito por meio de um servo-atuador comandado por um sinal PWM. O deslocamento do platô oscilante da posição neutra (posição vertical) para um determinado ângulo inicia o fluxo de fluido hidráulico pelo sistema. Retornando o platô oscilante para a posição neutra o fluxo de fluido hidráulico é interrompido, cessando o movimento dos atuadores.

4.5.4. Sistema de controle esterçamento

O uso de quatro rodas esterçáveis habilita o deslocamento lateral do veículo e facilita a realização de manobras. O esterçamento em todas as rodas também minimiza o escorregamento lateral causando menos danos a cultura. Diversos trabalhos (BAK & JAKOBSEN, 2004; WANG *et al.*, 2011; SANTANA *et al.*, 2006) destacam o uso de robôs com esterçamento independente em todas as rodas e o desenvolvimento de soluções de controle.

Existem alguns problemas relacionados com o sistema de esterçamento das rodas que trazem desafios para o desenvolvimento do sistema de controle. Entre estes se verifica o atraso do sistema hidráulico, a não linearidade dos atuadores e a inercia do sistema de esterçamento devido ao atrito em diferentes terrenos.

O primeiro problema origina-se devido o atraso no sistema hidráulico. Diferente de atuadores pneumáticos e elétricos, que fornecem uma rápida resposta durante o processo de controle, o sistema hidráulico usado na plataforma tem um tempo de resposta lenta e alta inercia. Estas características influenciam o desempenho do sistema e consequentemente a escolha do método de controle e seu desenvolvimento.

As não linearidade nos atuadores é outro grande problema. O solenóide que abre as válvulas responsáveis por alimentar os cilindros hidráulicos do sistema de esterçamento opera por meio de um sinal PWM. Entretanto existe uma zona e um limite de saturação em cada cilindro, que respectivamente significa que o cilindro não inicia a operação até um sinal de controle de aproximadamente 30% do valor de PWM e o movimento satura a aproximadamente 90% do valor de PWM. Outro problema relacionado com os atuadores de esterçamento é a diferença entre as áreas internas do cilindro destinadas ao fluido hidráulico pressurizado, responsável por movimentar a haste. Desta forma a pressão e o volume de fluido pressurizado são diferentes entre o movimento de expansão e retorno. Este fato deve ser considerado pelo sistema de controle porque, o mesmo sinal PWM irá prover mais força em um sentido de deslocamento que no outro. Esta ultima questão impede o uso de um controle único (usualmente PID) para cada rodado da plataforma bem como a ação de controle deve ser diferente para cada direção do movimento.

O terceiro problema está relacionado à inércia do sistema de esterçamento devido o atrito entre o pneu e os diferentes tipo de terreno como asfalto, grama, solo. O valor mínimo necessário para iniciar o movimento de esterçamento não é constante e depende da inércia, da distribuição de massa do robô, que por sua vez, varia de acordo com os ângulos de arfagem e rolagem. Além disso, existe a diferença entre o atrito estático (quando a plataforma está parada) e o dinâmico (plataforma em movimento) proveniente do contato entre o pneu e a superfície o terreno.

Os problemas citados acima são requisitos que devem ser considerados durante o desenvolvimento do sistema de controle e que, de alguma forma limitam a escolha da estratégia do sistema de controle. Além disto, é desejável que ao se projetar um sistema de controle, seja possível utilizar uma arquitetura flexível e um algoritmo simples com o intuito de serem facilmente implementados e consumam o mínimo possível de recursos computacionais.

4.5.4.1. Descrição do sistema de controle esterçamento

Visando lidar com os requisitos de navegação da plataforma robótica e os problemas no sistema de controle apresentados anteriormente, uma rede de controle do sistema (NCS - networked control system) baseada em CAN foi desenvolvida. As redes de controle podem fornecer flexibilidade, eficiência e confiabilidade do sistema de controle distribuído por meio da inteligência distribuída (GUPTA & CHOW, 2010). Em adição a isto, os conceitos da teoria de controle de manipuladores (FARKHATDINOV & RYU, 2007) foram usados como base para o desenvolvimento da estratégia do sistema de controle de esterçamento. Esta escolha foi guiada pelo fato que a teoria pode ser uma simples solução para lidar com os problemas verificados no sistema de controle.

Em uma NCS o controlador, o sensor e a planta estão fisicamente separados entre si e conectados por meio de uma rede de comunicação de dados como a CAN. O sinal de controle é enviado ao controlador por uma mensagem transmitida por meio da rede, enquanto o sensor amostra a saída da planta e retorna as informações para o controlador transmitindo também a mensagem através da rede. A arquitetura de controle desenvolvida para a plataforma robótica é mostrada na Figura 60.

Figura 60. Circuito eletro-hidráulico da plataforma.

Um computador industrial com arquitetura baseada em PC foi instalado na plataforma robótica. Esse tem a função de realizar os cálculos de trajetória e informar aos módulos de controle, que por sua vez acionam os atuadores da plataforma, as entradas necessárias para seu funcionamento, além de retornar ao usuário o status da operação. A rotina de controle de navegação foi desenvolvido em ambiente *LabView*, software comercial fabricado pela *National Instruments Corporation*. A comunicação entre o PC e os módulos de controle da plataforma robótica é feita pela interface do módulo de controle de guiagem (MCG) via rede CAN ISO 11898, visto que esse, como dito anteriormente, está conectado aos demais módulos.

De acordo com a Figura 60, os parâmetros de entrada do sistema de esterçamento são enviados ao modelo cinemático da plataforma. Estes parâmetros podem ser informados pelo usuário, por meio de um sistema teleoperado, ou pelo sistema de navegação autônomo embarcado. Entre as saídas do modelo cinemático estão os requisitos de orientação das quatro rodas da plataforma.

O NCR é responsável pelo recebimento das mensagens CAN do MCG com as informações do sensor de esterçamento (potenciômetro linear) para cada módulo roda, por computar o algoritmo do sistema de controle, e enviar, via CAN, as mensagens para o MCG com os valores do sinal PWM das válvulas dos atuadores hidráulicos. Para cada uma das quatro rodas da plataforma o MCG envia dados dos sensores de esterçamento a uma taxa de amostragem de 100ms. Para cada roda, foi montado um sistema de controle em malha fechada. No entanto, essas mensagens compartilham a mesma rede CAN. Desta forma, os dados estão limitados a uma taxa de transferência máxima que corresponde a capacidade da rede de comunicação e do sistema de processamento do MCG.

4.5.4.2. Estratégia de controle esterçamento.

A estratégia de controle iniciou-se com a investigação de uma solução que fosse ao mesmo tempo simples de implementar e robusta contra falhas. Optou-se pelo uso de uma estratégia de controle NCS centrada na teoria de controle de robôs manipuladores (ROY & WHITCOMB, 2002). Esta estratégia de controle NCS utiliza uma ideia de controle de posição/velocidade (FARKHATDINOV & RYU, 2007) para calcular os sinais de controle, com base na diferença entre a posição desejada e a real e considerando a velocidade angular das rodas. O fluxograma na Figura 61 detalha o algoritmo de controle de esterçamento NCS desenvolvido. É importante ressaltar que, a estratégia de controle é aplicada simultaneamente para cada uma das quatro rodas, o que resulta em quatro ações distintas a cada *loop* do sistema de controle.

De acordo com o fluxograma mostrado na Figura 61, o processo de controle inicia com uma comparação entre a posição desejada (recebida do modelo cinemático) e a atual posição de cada roda. Se a diferença for maior que um erro máximo tolerável ($erro_{max}$), a estratégia de controle irá atuar para reduzir este erro. O valor do erro pode ser definido pelo usuário ou seguir um conjunto de valores pré-definidos que variam de acordo com o tipo de manobra realizada, velocidade, tipo de terreno, etc. O primeiro passo é aplicar um valor PWM inicial, este valor é subsequentemente incrementado até o sistema de esterçamento iniciar um movimento angular.

Figura 61. Fluxograma da estratégia de controle da NCS.

A detecção do movimento angular é feito pela comparação das últimas duas leituras da posição angular do sistema de esterçamento. Se a diferença entre a primeira e a segunda leitura for maior que uma tolerância previamente definida (tol_{max}) então considera-se que houve movimento. Essa tolerância evita que oscilações na leitura do potenciômetro ocasionadas por fatores mecânicos como folga entre o conjunto pinhão-cremalheira, deformação do suporte do cilindro, deflexão da haste do cilindro, folga na montagem do

potenciômetro e/ou de operação como vibração da estrutura, possam ser processados como movimento.

Depois desse primeiro movimento deve ser considerada a velocidade de esterçamento da roda. Para atender ao modelo cinemático, cada roda possui uma orientação específica a ser alcançada, que dificilmente será a mesma. Desta forma, a quantidade de movimento que cada roda deverá realizar também será dificilmente. Principalmente para situações onde a plataforma está em movimento, é desejado que os quatro rodados atinjam sua correta orientação ao mesmo instante. Isto evita o arrasto das rodas e consequentemente o aparecimento de forças que tendem a deformar a estrutura da plataforma. Desta forma, a velocidade angular de esterçamento deve ser diferente para cada roda.

O intuito do sistema de controle é aplicar para o menor erro encontrado, entre as quatro rodas, a menor velocidade de esterçamento possível. Para as demais rodas, realiza-se um incremento proporcional da velocidade de esterçamento até que se atinja a velocidade desejada. Outra dificuldade é manter essa velocidade constante durante todo o movimento. Para executar o controle da velocidade um cálculo é feito usando as leituras anteriores do posicionamento. Se a velocidade de esterçamento for maior ou menor que o valor especificado pelo modelo cinemático, é aplicado um incremento ou decremento do valor de PWM aplicado às válvulas. O algoritmo de controle é executado até que o erro entre a posição desejada e real, para cada roda, seja menor do que o erro tolerado.

Um estudo prévio foi realizado a fim de verificar alguns parâmetros para o sistema de controle. Este foi baseado nas capacidades mecânicas da plataforma em lidar com esforços e deformações relacionadas com as exigências impostas pelo sistema de guiagem. Definiu-se que o passo adotado para incrementar ou decrementar o valor de PWM no sinal de controle é de 2%. O valor inicial de PWM adotado é de 30% em consequência da zona morta dos atuadores hidráulicos. O erro máximo tolerável (tol_{max}) adotado foi de 2 graus, e a tolerância de movimento (tol_{max}) adotada foi de 1 grau.

5. ENASAI0 SIMULADO E REAL.

Dois testes foram feitos para validar as equações do modelo cinemático e dinâmico desenvolvidos. O primeiro ensaio aqui relatado é uma simulação para obtenção dos dados referentes à movimentação da plataforma de acordo com uma sequência de dados de entrada que foram fornecidos por meio de um joystick. Inicialmente, variaram-se as condições de solo a fim de verificar a influência desses parâmetros na plataforma. Após essa análise variou-se as condições de operação do robô com o intuito de verificar a influência de variáveis operacionais na plataforma. O segundo ensaio mostra os resultados do sistema de controle via rede propostos, durante os experimentos realizados com a plataforma. Nesta segunda parte, os dados de entrada também foram fornecidos por meio de um joystick.

5.1. Sistema supervisório

O sistema supervisório foi desenvolvido em ambiente LabView, software comercial fabricado pela *National Instruments Corporation*. Nesse sistema, constam as equações geradas no Capítulo 4 que monitoram o comportamento da plataforma robótica, recebem as informações de entrada dos sensores e os comandos do usuário. O sistema opera em conjunto com o sistema de controle, enviando os valores das ações a serem executadas.

Para verificar o comportamento do sistema, uma rotina simulada foi executada. Salienta-se que nessa simulação não havia conexão entre o sistema supervisório e a plataforma robótica, por isso não existe realimentação dos sensores. Os atrasos no sistema gerados pela inércia dos componentes mecânicos e eventuais falhas de atuação não foram considerados. As entradas para o sistema cinemático e dinâmico foram fornecidas por meio de um joystick com controle analógico, as quais por sua vez, foram descritas no Capítulo 4.

A primeira parte da simulação tem o intuito de verificar a influencia dos parâmetros de solo na resistência ao rolamento da plataforma e como isso afeta a demanda de potência do sistema. Os parâmetros de solo usado para essa simulação foram extraídos do trabalho de RAY, 2009. Foram analisados três diferentes tipos de solo: areia seca, solo franco arenoso, e solo argiloso sendo que, suas características estão descritas na Tabela 12. Salienta-se que existe uma grande diferença entre os três tipos de solos citados, em função disso, espera-se que haja uma variação perceptível dos resultados obtidos.

Tabela 12. Parâmetros do solo usado na simulação.

Parâmetros	Areia seca	Franco arenoso	Argiloso
c (kPa)	1,04	3,3	68,97
ϕ (graus)	28	33,7	20
k_c (kPa/m ⁿ⁻¹)	0,99	74,6	16,42
k_ϕ (kPa/m ⁿ)	1528	2080	1725
n	1,1	1,1	0,2

A Figura 62 apresenta a velocidade de deslocamento da plataforma (linha preta) e a aceleração (linha vermelha) em função do tempo. O percurso simulado se inicia com a plataforma parada junto a origem do sistema de coordenadas inercial. Uma entrada de aceleração é informada ao sistema que faz com que a plataforma comece a ganhar velocidade.

Figura 62. Velocidade e aceleração da plataforma em função do tempo.

A Figura 63 mostra a resistência ao rolamento durante a simulação para os três tipos de solos analisados que foram, areia seca (linha azul), solo franco arenoso (linha vermelha), e solo argiloso (linha preta). Observa-se que houve grande variação na resistência imposta pelos solos. A areia seca impôs mais que o dobro de resistência para o deslocamento da plataforma, isso se deve a maior deformação do terreno nesse caso. O solo argiloso que apresenta maior resistência entre os agregados não sofreu uma deformação tão grande por isso a resistência ao rolamento foi menor. Chama-se a atenção para o pico de resistência visto no início do movimento, principalmente para o solo argiloso. Isso é em função da distribuição de massa da plataforma ser alterada em razão da aceleração. Como a resultante é maior na parte traseira, houve uma deformação maior do solo nesse momento ocasionando o aumento da resistência ao rolamento. Na areia seca, como já houve uma grande deformação inicial, a transferência de massa em razão da aceleração não causou grande alteração da resistência ao rolamento.

Figura 63. Resistência ao rolamento da plataforma para diferentes tipos de solo.

A Figura 64 apresenta a potência consumida pela plataforma para realizar o movimento. Assim como no gráfico anterior, os solos são representados da seguinte forma: areia seca (linha azul), solo franco arenoso (linha vermelha), e solo argiloso (linha preta). Como a potência consumida está diretamente relacionada à resistência ao rolamento, os maiores valores observados são encontrados no ensaio realizado na areia seca. O pico de potência consumida no início do movimento se deve à aceleração da plataforma.

Figura 64. Potência demandada da plataforma para diferentes tipos de solo.

A segunda parte da simulação tem o intuito de verificar a influência dos parâmetros operacionais na plataforma. Os dados obtidos serviram para verificar o comportamento do modelo cinemático e dinâmico durante a simulação. Para isto, foi utilizado um joystick que enviava os comandos de aceleração e raio de giro. Além disso, foram inseridos de forma manual valores para os ângulos de rolagem e arfagem. Essa medida objetiva a verificação do comportamento da distribuição de massa da plataforma durante a sua movimentação.

A Figura 65 mostra a interface do usuário desenvolvida para a simulação e o resultado final da rotina a qual a plataforma foi submetida. Os componentes indicados representam: 01- ângulo de esterçamento das rodas; 02 – parâmetros do funcionamento da

plataforma; 03 - percurso percorrido pela plataforma; 04 – indicador dos ângulos de rolagem e arfagem; 05 – indicador do ângulo de guinada; 06 - parâmetros de entrada; 07 – início do movimento; 08 – final do movimento.

Figura 65. Interface do usuário.

A seguir é feita uma descrição dos movimentos realizados. A Figura 66 mostra o trajeto executado pela simulação, com os pontos de interesse destacados de (A) até (K).

Figura 66. Trajetória simulada para a plataforma.

De acordo com a Figura 66 os pontos marcados representam: A – movimento tem início junto à origem do sistema de coordenada inercial; B – curva à direita e início de trecho com ângulo de arfagem positivo; C- redução do ângulo de arfagem para zero, curva à esquerda e início do trecho com ângulo de arfagem negativo; D – redução do ângulo de

arfagem para zero, curva à direita e início do trecho com ângulo de rolagem positivo; E - redução do ângulo de rolagem para zero e início do trecho com ângulo de rolagem negativo; F - redução do ângulo de rolagem para zero e curva a esquerda; G – parada da plataforma, movimento das rodas no sentido perpendicular a plataforma, início do movimento lateral e termino do movimento lateral; H – mesmo movimento realizado no ponto G mas com sentido oposto. I – movimento diagonal da plataforma; J – movimento em “marcha ré”; K – final da simulação, plataforma encontra-se na posição (3,55 ; -63,59 ; 3,41) e orientada a - 0,06 graus.

A Figura 67 representa as entradas do raio de giro, sendo que a descontinuidade entre os intervalos é devida ao raio de giro estar posicionado no infinito. Observa-se que foram realizadas duas curvas a direita e duas a esquerda, o movimento inicial foi suave, sendo intensificado gradativamente, representando uma situação normal de uso. A Figura 68 mostra o posicionamento do ângulo Beta, que tem a função de orientar o ICR, como descrito anteriormente na Figura 48 (localizada na página 131 do Capítulo 4).

Figura 67. Raio de giro durante a simulação.

Figura 68. Ângulo Beta durante a simulação.

A Figura 69 mostra a velocidade angular ao longo da simulação. É possível verificar que os valores estavam dentro do limite estipulado de 0,314 rad/s, por isso em nenhum

momento o sistema de supervisão teve que atuar no sentido de reduzir a velocidade de deslocamento.

Figura 69. Velocidade angular durante a simulação.

A Figura 70 mostra o comportamento da aceleração da plataforma, que coincidem com os pontos onde houve variação na velocidade, a qual é mostrada na Figura 71. É possível verificar na porção final do gráfico, valores de velocidade negativos, esses indicam que a plataforma estava andando em “marcha a ré”.

Figura 70. Aceleração durante a simulação.

Figura 71. Velocidade escalar durante a simulação.

Os próximos dois gráficos (Figura 72 e Figura 73) representam os ângulos de arfagem e rolagem, respectivamente. Para ambos, inicialmente se aplicou um acréscimo gradativo até se alcançar o valor de 10° , após um determinado período esse valor foi reduzido gradativamente até -10° . O ângulo de guinada é mostrado na Figura 74.

Figura 72. Ângulo de arfagem durante a simulação.

Figura 73. Ângulo de rolagem durante a simulação.

Figura 74. Ângulo de guinada durante a simulação.

Da Figura 75 até a Figura 78 são indicados os ângulos de esterçamento (linha preta) e a rotação das rodas (linha vermelha) durante o movimento. As rodas são nominadas da seguinte forma, dianteira esquerda: roda 1; traseira esquerda: roda 2; traseira direita: roda 3 e dianteira direita: roda 4. Essa definição é válida para todas as situações descritas nesse trabalho.

Figura 75. Ângulo de esterçamento e rotação roda dianteira esquerda.

Figura 76. Ângulo de esterçamento e rotação roda traseira esquerda.

Figura 77. Ângulo de esterçamento e rotação roda traseira direita.

Figura 78. Ângulo de esterçamento e rotação roda dianteira direita.

É interessante observar que nos pontos onde ocorre mudança na orientação da roda, ocorre também uma alteração na rotação da mesma. Na parte final dos gráficos, essa relação se perde devido a utilização do ângulo Beta em vez do raio de giro. A título de comparação, a Figura 79 mostra o ângulo de todas as rodas em um mesmo gráfico. Observa-se que, na porção final, onde o movimento da plataforma foi feito exclusivamente pelo ângulo Beta, os ângulos de esterçamento são iguais. Da mesma forma feita para o ângulo de esterçamento a Figura 80 mostra os valores da rotação dos rodados.

Figura 79. Ângulo de esterçamento das rodas.

Figura 80. Ângulo de rotação das rodas.

Os próximos três gráficos mostram a somatória das forças geradas na plataforma. Essas forças são relacionadas com o sistema de coordenadas local (fixado junto a plataforma). A Figura 81 mostra a resultante no eixo x. É possível verificar alguns picos de força, que são devidos às mudanças na aceleração da plataforma. Aproximadamente aos 100 segundos se observa alguns valores negativos, que são devidos à mudança do ângulo de arfagem o que fez com que a plataforma descesse uma rampa. O valor negativo representa uma força de frenagem que se contrapõe à força da gravidade.

Figura 81. Somatória das forças no eixo x.

A Figura 82 mostra a resultante no eixo y. Aproximadamente aos 250 segundos se verifica a ação do ângulo de rolagem na plataforma, a alternância entre valores negativos e positivos representa a direção da força em relação ao sistema de coordenadas local.

Figura 82. Somatória das forças no eixo y.

A Figura 83 exibe a resultante no eixo z. Os quatro pontos onde houve alteração da resultante são em função das alterações nos ângulos de arfagem e rolagem, respectivamente. Parte da resultante foi transferida para as componentes x e y.

Figura 83. Somatória das forças no eixo z.

A Figura 84 mostra a potência total consumida durante o movimento. Observa-se que o maior consumo ocorreu no momento em que o ângulo de arfagem exigia que a plataforma, além deslocar-se a frente, tivesse que vencer a força da gravidade. Os valores negativos apresentados entre aproximadamente 80 e 100 segundos são devidos também ao ângulo de arfagem. Nesse caso como a plataforma estava em uma trajetória descendente, era exigido do sistema uma força de resistência ou frenagem. A fim de diferenciar essa situação das demais, se optou por deixar o sinal do valor da potência negativo.

Figura 84. Potência total consumida pela plataforma ao longo do tempo.

5.2. Sistema de controle

Foram realizados testes de campo utilizando a plataforma robótica para avaliar a arquitetura NCS e a estratégia de controle proposto para o sistema de guiagem. Nos experimentos, a plataforma operou no modo manual. Nesse modo o usuário envia as informações de entrada (teleoperado) e as informações de resposta foram analisadas para verificar a operação e a acurácia do movimento da plataforma. Testes foram realizados em diferentes tipos de solo com a plataforma em movimento e parada, os quais serviram para identificar diferenças no comportamento do sistema em função das forças resultantes oferecidas por cada situação testada.

O requerimento definido para o sistema de controle de esterçamento foi que o movimento fosse realizado de forma lenta e que a resposta obtida pelo sistema, preferencialmente, não ultrapassasse a posição desejada (*overshoot*) devido ao alto tempo demandado para que o sistema hidráulico invertesse o sentido de movimento. As Figura 85 até a Figura 88 apresentam a resposta do sistema de guiagem em função das solicitações realizadas (*setpoint*). Os gráficos representam o movimento da roda dianteira direita, traseira direita, traseira esquerda e dianteira esquerda respectivamente.

Os gráficos das Figura 85 até a Figura 88 apresentam diferentes solicitações em função do tempo para cada roda de acordo com o fornecido pelo modelo cinemático. O gráfico superior mostra o valor fornecido como alvo (*setpoint*) e a leitura fornecida pelos sensores de esterçamento indicando a real orientação da roda no decorrer do tempo. Na maioria das vezes, nenhum erro em regime permanente (*steady state error*) e ultrapassagem a posição desejada (*overshoot*) pode ser verificado, além disto, a velocidade de esterçamento imposta pelo sistema está de acordo com os parâmetros informados. Esses resultados indicam que a concepção da estratégia de controle NCS para o sistema de

esterçamento da plataforma está correta. O gráfico inferior mostra o valor de PWM sendo aplicado pelo sistema de controle. O gráfico do valor PWM mostra a dinâmica do sistema de controle na tentativa de manter a velocidade de esterçamento constante.

Figura 85. Variáveis do sistema de controle da roda dianteira direita

Figura 86. Variáveis do sistema de controle da roda dianteira esquerda

Figura 87. Variáveis do sistema de controle da traseira direita

Figura 88. Variáveis do sistema de controle da traseira esquerda

Analisando os gráficos do sistema de controle de esterçamento, é possível verificar que o tempo gasto para se iniciar o movimento até o momento em que a roda adquire a orientação desejada, muda no decorrer da operação da plataforma e, às vezes, é maior em uma direção de movimento. Esta diferença também pode ser vista quando se analisa os valores iniciais de PWM no gráfico do sinal de controle. Este comportamento era esperado

caso a estratégia de controle fosse executada de forma correta, e pode ser explicado por alguns fatos como as características construtivas do cilindro hidráulico, as diferenças de inércia relacionadas com o atrito entre o pneu e o terreno, e a distribuição de massa sobre as rodas. Estas situações demandam diferentes atuações de controle e consequentemente diferentes resultantes nas variáveis de esterçamento de acordo com a navegação da plataforma.

Os atrasos na resposta do sistema são, em parte, atribuídos a troca de mensagens através da rede CAN e, principalmente, atribuídos ao tempo de resposta do sistema hidráulico, que é lento e com grande inércia. O desenvolvimento de uma solução de controle NCS para as quatro rodas simplifica o projeto e a implementação do sistema de controle, porque é utilizado somente um controlador para as quatro rodas. Ademais, a estratégia de controle proposta utiliza baixos recursos computacionais. Apesar da simplicidade a estratégia de controle NCS foi uma solução eficaz para superar os problemas verificados e os desafios do projeto de controle de esterçamento. No entanto, é importante ressaltar que a estratégia de controle pode ser projetada para a plataforma robótica por causa dos requisitos de controle e esterçamento, incluindo a resposta lenta e a baixa velocidade de movimento.

Finalmente, os resultados dos testes suportam a hipótese de que a arquitetura NCS e a solução de controle para a plataforma robótica são confiáveis e satisfatórias. Embora seja desejável melhorar o controle de esterçamento, o atual nível de precisão é suficiente para a orientação da plataforma e os resultados indicam que a arquitetura NCS desenvolvida e a estratégia de controle distribuído são úteis para operações de robôs agrícolas móveis. Trabalhos futuros serão desenvolvidos no intuito de melhorar a orientação da plataforma robótica pelo estudo de soluções de controle cronometrado para sincronizar os movimentos de direção entre as quatro rodas. Movimentos dessincronizados entre as rodas foram verificados durante os testes realizados e essa situação não é desejável se forem requeridas altas velocidades de deslocamento.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram a necessidade da sistematização no processo de desenvolvimento de robôs móveis. Identificou-se a existência de inúmeras formas de se executar um projeto e as dificuldades que podem ocorrer, principalmente por se tratar de um tipo de trabalho que necessita da presença de diversos profissionais de distintas áreas do conhecimento. Esta tese mostrou que a interdisciplinaridade da atividade cria barreiras que podem se agravar à medida que o processo de criação e desenvolvimento ocorre. Tais obstáculos devem-se especialmente às falhas na comunicação ou na documentação das informações geradas no processo.

O desenvolvimento deste projeto também possibilitou que os principais tópicos que devem ser observados durante a etapa de construção de um sistema robótico móvel fossem destacados. Mostrou-se, de forma resumida, quais são as possíveis soluções que podem ser empregadas para satisfazer as necessidades do sistema. Partindo desse princípio, descreveu-se os parâmetros de projeto adotados na construção da plataforma robótica, bem como o detalhamento da montagem de seus componentes. Um modelo tridimensional do conjunto foi criado, o qual embasou a etapa de manufatura.

De acordo com os princípios da cinemática direta, criou-se um modelo para representar o posicionamento da plataforma no ambiente de trabalho. Por meio das entradas do sistema, que são fornecidas pelo usuário, o modelo retorna os dados que irão garantir que a plataforma percorra a trajetória estipulada. Os dados de saída são, entre outros, orientação das quatro rodas e das velocidades dos motores de propulsão. Atrelado ao sistema cinemático, o modelo dinâmico coleta informações do ambiente e calcula as forças atuantes na plataforma. Esses dados sustentam o sistema de controle que foi desenvolvido usando uma rede de dados. As informações provenientes dos sensores espalhados pela plataforma trafegam por um conjunto de unidades de controle que estão conectadas entre si. Após a leitura da mensagem, os dados são interpretados e usados pelo sistema supervisor para controlar a plataforma.

A robustez e a acurácia do modelo proposto foram testados em ambiente virtual. Os resultados foram condizentes com as expectativas iniciais, demonstrando correlação entre os dados de entrada e as resultantes finais. O tempo de processamento para cada *loop* do sistema estava dentro dos padrões necessários para garantir respostas imediatas, baseadas nos padrões de inércia do sistema mecânico em teste. O sistema de controle via rede também mostrou-se apto a realizar as tarefas designadas. Sua simplicidade não afetou os bons resultados obtidos, entretanto as velocidades a quais o sistema foi exposto não eram elevadas. Para situações de maior velocidade, existe a necessidade de refinar as saídas

obtidas, principalmente no que tange ao sincronismo de movimento dos atuadores de esterçamento.

Finalmente, pode-se concluir que a realização deste trabalho contribuiu com o desenvolvimento da pesquisa em sistemas robóticos agrícolas, por meio da descrição do processo de concepção e dos modelos matemáticos necessários para sua operação. A sistematização das informações obtidas nesta tese de doutorado permitiu a publicação de uma série de trabalhos sobre o tema de robótica agrícola, os quais se espera que sirvam como referência para alavancar uma maior difusão das áreas de pesquisa relacionadas e para promover o desenvolvimento de grupos nacionais de pesquisa.

Em resumo, entre os resultados apresentados destacam-se:

- Revisão bibliográfica abrangendo as principais pesquisas relacionadas à robótica móvel agrícola, agricultura de precisão e métodos para criação de projetos disponíveis na literatura.
- Levantamento dos parâmetros de projeto utilizados na área da robótica móvel e em específico a aplicações realizadas para o ambiente agrícola.
- Definição dos parâmetros de qualidade que devem estar presentes em um robô agrícola.
- Modelagem tridimensional da plataforma robótica.
- Modelagem cinemática e dinâmica de uma plataforma robótica.
- Desenvolvimento de um rotina de controle.
- Experimento simulado e real do sistema supervisor e de controle.

7. ATIVIDADES REALIZADAS

7.1. Disciplinas

As disciplinas cursadas no Programa de Pós-Graduação são apresentadas na Tabela 13, com seus respectivos conceitos. O critério de escolha das disciplinas foi baseado nas normas do programa de pós-graduação, além de disciplinas que possuíam potencial para colaborar com o desenvolvimento do projeto.

Tabela 13. Disciplinas concluídas.

Sigla	Nome da Disciplina	Cred.	Freq.	Conc.	Sit. Matric.
SEM5743-4/4	Sistemas de Eventos Discretos I: Tópicos Sobre Modelamento, Simulação e Controle	12	100.00	A	Concluída
SEM5767-3/6	Projeto Assistido por Computador I (CAD I)	12	100.00	A	Concluída
SEM5892-6/7	Metodologia e Pesquisa Bibliográfica	6	92.00	B	Concluída
SEM5796-2/4	Comportamento Mecânico dos Materiais	12	100.00	A	Concluída
SEM5910-1/1	Introdução à Metodologia de Projeto em Engenharia	12	100.00	A	Concluída
SEM5902-1/3	Tópicos Especiais em Simulação de Sistemas Discretos	12	100.00	A	Concluída
SEM5805-10/5	Metrológica Mecânica Dimensional	12	100.00	A	Concluída
SEM5908-1/2	Materiais de Engenharia	-	-	-	Cancelada
SEM5815-2/5	Análise Dinâmica de Sistemas Hidráulicos	12	100.00	A	Concluída

7.2. Participações em eventos e publicações

Artigos publicados em periódicos

1. TABILE, R.A.; GODOY, E.P.; PEREIRA, R.R.D.; TANGERINO, G.T.; PORTO, A.J.V.; INAMASU, R.Y. Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot. Revista Brasileira de engenharia Agrícola, v.31, n.1. 2011.

2. GODOY, E. P. ; TABILE, R.A. ; PEREIRA, R. R. D. ; TANGERINO, G. T. ; PORTO, A. J. V. ; INAMASU, R. Y. . Design and implementation of an electronic architecture for an agricultural mobile robot. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* (Online), v. 14, p. 1240-1247, 2010.

Capítulos de livros publicados

1. TABILE, R.A. ; INAMASU, R.Y. ; PORTO, A.J.V. Robótica na Agricultura. In: Ricardo Y. Inamasu, João de Mendonça Naime, Álvaro Vilela de Resende, Luís Henrique Bassoi, Aberto C. de Campos Bernardi. (Org.). *Agricultura de precisão: um novo olhar..* 1 ed. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011, v. 1, p. 120-125.

Trabalhos publicados em anais de congressos

1. TANGERINO, G. T. ; INAMASU, R. Y. ; TABILE, R.A ; GODOY, E. P. ; PORTO, A. J. V. . Estado da arte em robótica agrícola no Brasil e no mundo. In: XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2011, Cuiaba - MT. *Proceedings of XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 2011.
2. TANGERINO, G. T. ; GODOY, E. P. ; TABILE, R.A ; 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 - MG. *Proceedings of Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 2011.
3. TANGERINO, G. T. ; GODOY, E. P. ; TABILE, R.A ; INAMASU, R. Y. ; PORTO, A. J. V. . Hydraulic networked control of four Wheel steering agricultural robot. In: IX IEEE International Conference on Control & Automation, 2011, Santiago - Chile. *Proceedings of IX IEEE International Conference on Control & Automation*, 2011.
4. TABILE, R.A.; GODOY, E. P. ; PEREIRA, R. R. D. ; TANGERINO, G. T. ; PORTO, A. J. V. ; INAMASU, R. Y. . Design of the mechatronic architecture of an agricultural mobile robot. In: 3rd Annual Dynamic Systems and Control Conference and 5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, 2010, Boston. *Anais*, 2010.
5. 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. In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito. *Anais...*, 2010.
6. SCORZONI, F. ; GODOY, E. P.; TABILE, R.A.; PORTO, A. J. V. ; INAMASU, R. Y. . Sistema distribuído para controle do posicionamento de antena direcional de um robô agrícola móvel. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010, Campina Grande Paraíba. *Anais VI Congresso Nacional De Engenharia Mecânica*, 2010.
7. TABILE, R.A.; GODOY, E. P. ; SCORZONI, F. ; BRAGATO, B. N. ; PORTO, A. J. V. ; INAMASU, R. Y. . Use of virtual prototyping for evaluation of mechanical behavior of an agricultural mobile robot. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA

MECÂNICA, 2010, Campina Grande Paraíba. Anais VI Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2010.

8. GODOY, E. P. ; TABILE, R.A.; PEREIRA, R. R. D. ; TANGERINO, G. T. ; PORTO, A. J. V. ; INAMASU, R. Y. . Design and implementation of a mobile agricultural robot for remote sensing application. In: CIGR Section V International Symposium, 2009, Rosario. Proceedings of CIGR Section V International Symposium, 2009.
9. TABILE, R.A.; GODOY, E. P. ; TANGERINO, G. T. ; PEREIRA, R. R. D. ; PORTO, A. J. V. ; INAMASU, R. Y. . Development of an agricultural mobile robot for use in precision agriculture. In: CIGR Section V International Symposium, 2009, Rosario. Proceedings of CIGR Section V International Symposium, 2009.

7.3. Trabalhos futuros

No que tange ao projeto da plataforma robótica descrita nessa tese, essa faz parte do projeto financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, por meio da CHAMADA PÚBLICA MCT/FINEP/CT-AGRO - Agricultura de Precisão 01/2008 Ref. 1477/08 com data da assinatura pelas partes no dia 08 de junho de 2009 com o número de convenio 01.09.0233.00 sendo o projeto intitulado: "Sistemas para viabilizar monitoramentos e intervenções localizadas".

O referido projeto possui um financiamento total de até R\$ 1.014.154,00 (Um milhão, quatorze mil e cento e cinquenta e quatro reais), sendo R\$ 927.754,00 (novecentos e vinte e sete mil e setecentos e cinquenta e quatro reais) destinados ao CONVENIENTE por meio de aporte direto e R\$ 86.400,00.(oitenta e seis mil e quatrocentos reais) destinados a Bolsas de Desenvolvimento Tecnológico, a serem transferidos pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico – CNPq.

Fazem parte como membros do referido projeto as instituições Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, através do Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária e a Máquinas Agrícolas Jacto S/A

Entre as perspectivas desse trabalho, espera-se que a quantidade de informações compilada na revisão bibliográfica e os conhecimentos (constatações e conclusões) apresentados durante o trabalho, possa ser utilizada como base para confecção de trabalhos sobre robótica agrícola e sistemas agrícolas inteligentes. Devido o caráter multidisciplinar e interinstitucional, existem outros membros do projeto delegados de funções relacionadas a sistemas de controle, monitoramento de parâmetros agrícolas, navegação autônoma, imagem e processamento de dados, aperfeiçoamento do sistema dinâmico, entre outros.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCHUK, V.I.; HUMMEL, J.W.; MORGAN, M.T.; UPADHYAYA, S.K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *computers and electronics in agriculture*, v.44, n.1, p.71-91. 2004.

ADAMCHUK, V.I.; SETHURAMASAMYRAJA, B.; DOBERMANN, A.; MARX, D.B.; JONES, D.D.; MEYER, G.E. Agitated soil measurement method for integrated on-the-go mapping of soil pH, potassium and nitrate contents. *computers and electronics in agriculture*, v.60, n.2, Mar, p.212-225. 2008.

ADRIAN, A.M.; NORWOOD, S.H.; MASK, P.L. Producers' perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. *computers and electronics in agriculture*, v.48, n.3, p.256-271. 2005.

AHAMED, T.; TIAN, L.; ZHANG, Y.; TING, K.C. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. *Biomass and Bioenergy*, v.35, n.7, p.2455-2469. 2011.

AKAO, Y. *Quality Function Deployment--Integrating Customer Requirements into Product Design*. Cambridge - MA. 1990

ALCHANATIS, V.; COHEN, Y.; COHEN, S.; MOLLER, M.; MERON, M.; TSIPRIS, J.; ORLOV, V.; NAOR, A.; CHARIT, Z. *Fusion of IR and Multispectral Images in the Visible Range for Empirical and Model Based Mapping of Crop Water Status*. ASABE Annual International Meeting. Portland, Oregon: ASABE, 2006. 12 p.

ALMANNAL, B.; GREENOUGH, R.; KAY, J. A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v.24, n.4, p.501-507. 2008.

ALMEIDA, F.J.D. Formalização do Processo de Projeto Mecânico Visando ao uso em Sistemas Inteligentes de Projeto Auxiliado por Computador (ICAD). *Revista De Ciência & Tecnologia*, v.8, n.18, p.87-96. 2001.

AMADOR, C.; EMOND, J.-P.; NUNES, M. Application of RFID technologies in the temperature mapping of the pineapple supply chain. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, v.3, n.1, p.26-33. 2009.

AQEEL UR, R.; ABBASI, A.Z.; ISLAM, N.; SHAIKH, Z.A. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, v.In Press, Corrected Proof. 2011.

ARKIN, R.C. *Behavior-based robotics*. London: MIT Press. 1998. xiv,491p. p.

ASTRAND, B.; BAERVELDT, A.-J. A vision based row-following system for agricultural field machinery. *Mechatronics*, v.15, n.2, p.251-269. 2005.

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

ATMEL. *ATMEL - AVR Solutions*. Disponível em:

<http://www.atmel.com/products/AVR/motor_control.asp?family_id=607> Acesso em: 03/03 2010

AUERNHAMMER, H. *Off-Road Automation Technology in European Agriculture - State of the Art and expected Trends*. Automation Technology for Off-Road Equipment, ASAE International Conference. Kyoto - Japan: ASAE 2004. 10-23. p.

AUERNHAMMER, H.; SPECKMANN, H. Dedicated Communication Systems and Standards for Agricultural Applications. In: (Ed.). *Handbook of Agricultural Engineering*.: ASAE, v.7, 2006. Dedicated Communication Systems and Standards for Agricultural Applications, p.435-452

AYENEH, A.; VAN GINKEL, M.; REYNOLDS, M.P.; AMMAR, K. Comparison of leaf, spike, peduncle and canopy temperature depression in wheat under heat stress. *Field Crops Research*, v.79, n.2-3, p.173-184. 2002.

BAILLIEUL, J.; ANTSAKLIS, P.J. Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems. *IEEE Proceedings of the Technology of Networked Control Systems Magazine*, IEEE, v.95, n.1, January, p.9-28. 2007a.

BAILLIEUL, J.; ANTSAKLIS, P.J. Control and Communication Challenges in Networked Real Time Systems. *Proceedings of IEEE Technology of Networked Control Systems*, v.95, n.1, p.09-28. 2007b.

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

BAKKER, T. *An Autonomous Robot for Weed Control*. 2009. 138 p. (Ph.D. Thesis). Wageningen University, Wageningen, The Netherlands 2009.

BAKKER, T.; ASSELT, C.J.V.; J., B.; MÜLLER, J.; STRATEN, G.V. *Path following with a robotic platform*. Agricontrol 2007. 2nd IFAC International Conference on Modeling and Design of Control Systems in Agriculture. Osijek, Croatia, 2007. 153-158 p.

BAKKER, T.; ASSELT VAN, K.; BONTSEMA, J.; MÜLLER, J.; STRATEN VAN, G. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding. *Journal of Terramechanics*, v.47, n.2, p.63-73. 2010.

BAKKER, T.; VAN ASSELT, K.; BONTSEMA, J.; MÜLLER, J.; VAN STRATEN, G. An Autonomous Weeding Robot for Organic Farming. In: (Ed.). *Field and Service Robotics*, 2006. An Autonomous Weeding Robot for Organic Farming, p.579-590

BAKKER, T.; WOUTERS, H.; VAN ASSELT, K.; BONTSEMA, J.; TANG, L.; MULLER, J.; VAN STRATEN, G. A vision based row detection system for sugar beet. *computers and electronics in agriculture*, v.60, n.1, Jan, p.87-95. 2008.

BALSARI, P.; DORUCHOWSKI, G.; MARUCCO, P.; TAMAGNONE, M.; ZANDE, J.C.V.D.; WENNEKER, M. A System for Adjusting the Spray Application to the Target Characteristics. *Agricultural Engineering International*, v.2008, n.10, p.12. 2008.

BARBOSA, G.F. *Aplicação da metodologia DFMA - Design for Manufacturing and Assembly - no projeto e fabricação de aeronaves*. 2008. 165 p. (Mestrado). Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, Sao Carlos, 2008.

- BASTOW, D.; HOWARD, G. *Car suspension and handling*. London Warrendale, PA, USA: Pentech Press ; Society of Automotive Engineers. 1993. xv, 362 p. p.
- BEKKER, M.G. *Off-the-road locomotion*. Ann Arbor - Michigan: The University of Michigan Press. 1960
- BEKKER, M.G.; SEMONIN, E.V. Motion Resistance of Pneumatic Tires. *Journal of Automotive Engineering*, v.6, n.2. 1975.
- BELL, T. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. *computers and electronics in agriculture*, v.25, n.1/2, p.53-66. 2000.
- BENET, G.; MARTÍNEZ, M.; BLANES, F.; PÉREZ, P.; SIMÓ, J.E. Differentiating walls from corners using the amplitude of ultrasonic echoes. *Robotics and Autonomous Systems*, v.50, n.1, p.13-25. 2005.
- BENNEWEIS, R.K. *Status of the ISO11783 Serial control and communications data network standard*. ASAE INTERNATIONAL MEETING. Florida: ASABE, 2005. p.
- BILLER, R.H.; SCHICKE, R. Multi-frequency optical identification of different weeds and crops for herbicide reduction in precision agriculture. *International Conference on Precision Agriculture*. Saint Paul, MN 2000.
- BISGAARD, M.; VINTHER, D.; ØSTERGAARD, K.Z.; IZADI-ZAMANABADI, R.; BENDTSEN, J.D. *Modelling and Fault-Tolerant Control of an Autonomous Wheeled Robot*. 2004. 260 p. Group Project Institute of Control Engineering, University of Aalborg, Aalborg, 2004.
- BLACKMORE, S.; FOUNTAS, S.; HAVE, H. *A proposed system architecture to enable behavioural control of an autonomous tractor*. Automation Technology for Off-Road Equipment. USA, 2002a. 12-23 p.
- BLACKMORE, S.; FOUNTAS, S.; HAVE, H. System Requirements For a Small Autonomous Tractor. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, n.Manuscript PM 04 001. 2004a.
- BLACKMORE, S.; GRIEPENTROG, H.W. Autonomous Vehicles and Robotics. In: Asabe (Ed.). *Munack, A. (eds.). CIGR Handbook of Agricultural Engineering*. Michigan, v.6, 2006. Autonomous Vehicles and Robotics, p.204-215
- BLACKMORE, S.; GRIEPENTROG, H.W.; FOUNTAS, S.; GEMTOS, T.A. A Specification for an Autonomous Crop Production Mechanization System. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, v.2007, n.PM 06 032. Vol. IX. 2007.
- BLACKMORE, S.; GRIEPENTROG, H.W.; NIELSEN, H.; NØRREMARK, M.; RESTING-JEPPESEN, J. Development of a deterministic autonomous tractor. *CIGR International conference*. Beijing: CIGR – International Commission of Agricultural Engineering: 8 p. 2004b.
- BLACKMORE, S.; HAVE, H.; FOUNTAS, S. *A specification of behavioural requirements for an autonomous tractor*. International Symposium on Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering conference. German, 2001. 25-36 p.

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. 2002b.

BLACKMORE, S.; LARSCHEID, G. Strategies for managing variability. *European Conference on Precision Agriculture* Warwick: BIOS Scientific: 851-859 p. 1997.

BLACKMORE, S.; STOUT, B.; WANG, M.; RUNOV, B. *Robotic agriculture the future of agricultural mechanisation*. 5th European Conference on Precision Agriculture. Uppsala, Sweden: Wageningen Academic Publishers, 2005. 621-628 p.

BLACKMORE, S.; VOUGIOUKAS, S.; TANG, L.; SORENSEN, C.G.; JORGENSEN, R. A method to define agricultural robot behaviours. A Mechatronics & Robotics Conference (MECHROB). Japan, 2004c. 1197-1200 p.

BOGREKCI, I.; LEE, W.S. Improving phosphorus sensing by eliminating soil particle size effect in spectral measurement. *Transactions of the ASAE*, v.48, n.5, Sep-Oct, p.1971-1978. 2005a.

BOGREKCI, I.; LEE, W.S. Spectral soil signatures and sensing phosphorus. *Biosystems Engineering*, v.92, n.4, Dec, p.527-533. 2005b.

BOGREKCI, I.; LEE, W.S. Effects of soil moisture content on absorbance spectra of sandy soils in sensing phosphorus concentrations using UV-VIS-NIR spectroscopy. *Transactions of the Asabe*, v.49, n.4, Jul-Aug, p.1175-1180. 2006.

BOSCH. *CAN Specification Version 2.0B*. Disponível em: <www.can.bosch.com> Acesso em: 10 março 2010

BOUJUT, J.-F.; LAUREILLARD, P. A co-operation framework for product-process integration in engineering design. *Design Studies*, v.23, n.6, p.497-513. 2002.

BRADBEER, R.T. *Trial and tribulations of domestic robot*. Computing and Control Division Colloquium on Personal and Domestic Robots. London - UK, 1985. p.

BROUDER, S.M.; THOM, M.; ADAMCHUCK, V.I.; MORGAN, M.T. Potential uses of ion-selective potassium electrodes in soil fertility management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.34, n.19-20, p.2699-2726. 2003.

BÜHLER, C.; HOELPER, R.; HOYER, H.; HUMANN, W. Autonomous robot technology for advanced wheelchair and robotic aids for people with disabilities. *Robotics and Autonomous Systems*, v.14, n.2-3, p.213-222. 1995.

BULANON, D.M.; BURKS, T.F.; ALCHANATIS, V. Study on temporal variation in citrus canopy using thermal imaging for citrus fruit detection. *Biosystems Engineering*, v.101, n.2, Oct, p.161-171. 2008.

BURKS, T.E.; SUBRAMANIAN, V.; SINGH, S. Autonomous greenhouse sprayer vehicle using machine vision and ladar for steering control. *Applied Engineering in Agriculture*, v.21, n.5, Sep, p.935-943. 2005.

CAMILLI, A.; CUGNASCA, C.E.; SARAIVA, A.M.; HIRAKAWA, A.R.; CORRÊA, P.L.P. From wireless sensors to field mapping: Anatomy of an application for precision agriculture. *computers and electronics in agriculture*, v.58, n.1, p.25-36. 2007.

CARNEVALLI, J.A.; MIGUEL, P.C. Review, analysis and classification of the literature on QFD--Types of research, difficulties and benefits. *International Journal of Production Economics*, v.114, n.2, p.737-754. 2008.

CASTRO NETO, P. *Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas*. 2001. 188 p. (PhD). Agronomia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Botucatu - SP, 2001.

CAVANI, F.A.; TRONCO, M.L.; PORTO, A.J.V. Estudo comparativo de classificadores aplicado a análise de cenas de pomares de laranjeiras. *III Workshop de Visão Computacional*. São José do Rio Preto - SP. 1: 192-197 p. 2007.

CECCATTO, H.A.; GRANITTO, P.M.; VERDES, P.F. Large-scale investigation of weed seed identification by machine vision. *computers and electronics in agriculture*, v.47, n.1, Apr, p.15-24. 2005.

CHAN, L.-K.; WU, M.-L. Quality function deployment: A literature review. *European Journal of Operational Research*, v.143, n.3, p.463-497. 2002.

CHAN, L.K.; WU, M.L. A Systematic approach to quality function deployment with a full illustrative example. *The international journal of management science of Computer Programming*, v.33, n.2, p.119-139. 2005.

CHANSUD, W.; WISANMONGKOL, J.; KETPROM, U. RFID for Poultry Traceability System at Animal Checkpoint. *Ecti-Con 2008: Proceedings of the 2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Vols 1 and 2*, p.753-756. 2008.

CIA. *CAN in Automation*. Disponível em: <<http://www.can-cia.org/>> Acesso em: Novembro 2010

CLARK, R.L.; MCGUCKIN, R.L. Variable rate application technology: an overview. *// International Conference On Precision Farming*. Minneapolis: ASA; CSSA; SSSA. 3: 855-862 p. 1996.

CLAWSON, K.L.; JACKSON, R.D.; PINTER, P.J. Evaluating Plant Water-Stress with Canopy Temperature Differences. *Agronomy journal*, v.81, n.6, Nov-Dec, p.858-863. 1989.

COLEMAN, T.L.; TADESSE, W. Differentiating Soil Physical-Properties from Multiple Band Doq Data. *Soil Science*, v.160, n.2, Aug, p.81-91. 1995.

CORWIN, D.L.; PLANT, R.E. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *computers and electronics in agriculture*, v.46, n.1-3, p.1-10. 2005.

COX, S. Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability. *computers and electronics in agriculture*, v.36, n.2-3, p.93-111. 2002.

COZZOLINO, D.; MORON, A. Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. *Soil & Tillage Research*, v.85, n.1-2, Jan, p.78-85. 2006.

CUGATI, S.; MILLER, W.; SCHUELLER, J. *Automation concepts for the variable rate fertilizer applicator for tree farming*. 4th European Conference in Precision Agriculture. Berlin, Germany, 2003. p.

- DAMAS, M.; PRADOS, A.M.; GOMEZ, F.; OLIVARES, G. HidroBus (R) system: fieldbus for integrated management of extensive areas of irrigated land. *Microprocessors and Microsystems*, v.25, n.3, May 30, p.177-184. 2001.
- DARR, M.J.; STOMBAUGH, T.S.; SHEARER, S. CAN based distributed control for autonomous vehicles. *Transactions of the ASAE*, v.48, n.1, p.479-490. 2005.
- DAS, T.; KAR, I.N.; CHAUDHURY, S. Simple neuron-based adaptive controller for a nonholonomic mobile robot including actuator dynamics. *Neurocomputing*, v.69, n.16-18, p.2140-2151. 2006.
- DENG, Y.-M.; TOR, S.B.; BRITTON, G.A. A dual-stage functional modelling framework with multi-level design knowledge for conceptual mechanical design. *Journal of Engineering Design*, v.11, n.4, p.347 - 375. 2000.
- DOBERMANN, A.; PING, J.L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. *Agronomy journal*, v.96, n.1, Jan-Feb, p.285-297. 2004.
- DONG, W. On trajectory and force tracking control of constrained mobile manipulators with parameter uncertainty. *Automatica*, v.38, n.9, p.1475-1484. 2002.
- DRIVA, H.; PAWAR, K.S.; MENON, U. Measuring product development performance in manufacturing organisations. *International Journal of Production Economics*, v.63, n.2, p.147-159. 2000.
- DUFOUR, C.A. *Estudo do processo e das ferramentas de reprojeto de produtos industriais, como vantagem competitiva e estratégia de melhoria constante*. 1996. p. (Master degree). Engenharia de produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 1996.
- EHLERT, D.; HORN, H.J.; ADAMEK, R. Measuring crop biomass density by laser triangulation. *computers and electronics in agriculture*, v.61, n.2, May, p.117-125. 2008.
- EHSANI, M.R.; UPADHYAYA, S.K.; FAWCETT, W.R.; PROTSILO, L.V.; SLAUGHTER, D. Feasibility of detecting soil nitrate content using a mid-infrared technique. *Transactions of the ASAE*, v.44, n.6, Nov-Dec, p.1931-1940. 2001.
- FARKHATDINOV, I.; RYU, J.H. *Hybrid Position-Position and Position-Speed Command Strategy for the Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot*. . 2007 International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul, Korea. Oct. 17-20, 2007. p.
- FARSI, M.; RATCLIFF, K.; BARBOSA, M. An overview of controller area network. *Computing & Control Engineering Journal*, v.10, n.3, June, p.113-120. 1999.
- FERNANDEZ, J.A.; GONZALEZ, J. The NEXUS open system for integrating robotic software. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v.15, n.6, p.431-440. 1999.
- FIGUEIREDO, A.M.; SANTOS, M.L.D.; OLIVEIRA, M.A.S.; CAMPOS, A.C. Impactos dos subsídios agrícolas dos Estados Unidos na expansão do agronegócio brasileiro. *Estudos Econômicos (São Paulo)*, v.40, p.445-467. 2010.
- FLINT, D.J. Compressing new product success-to-success cycle time: Deep customer value understanding and idea generation. *Industrial Marketing Management*, v.31, n.4, p.305-315. 2002.

FOUNTAS, S.; BLACKMORE, B.S.; VOUGIOUKAS, S.; TANG, L.; SØRENSEN, C.G.; JØRGENSEN, R. Decomposition of Agricultural tasks into Robotic Behaviours. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, v.9, n.Manuscript PM 07 006. 2007.

FOX, G.A.; SABBAGH, G.J. *Estimation of soil organic matter from red and near-infrared remotely sensed data using a soil line Euclidean distance technique*. Madison, WI, ETATS-UNIS: Soil Science Society of America, v.66. 2002. 8 p.

FREITAG, D.R.; SCHAFER, R.L.; WISMER, R.D. Similitude studies of Soil-Machine Systems. *Journal of Terramechanics*, v.7, n.2, p.25-58. 1970.

FREITAS, R.R.D. *Desenvolvimento de uma estrutura em pórtico para utilização em um veículo agrícola autônomo*. 2008. 93 p. (Mestrado). Engenharia Mecânica, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2008.

FREITAS, R.R.D.; SOUSA, R.V.; SAKAI, R.M.R.; PORTO, A.J.V.; INAMASU, R.Y. *Aplicação de ferramentas de prototipagem virtual para desenvolvimento de uma plataforma agrícola robótica*. II Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. São Pedro, SP, 2006. p.

FRESCO, L.O. Agro-ecological knowledge at different scales. *Eco-regional approaches for sustainable land use and food production : proceedings of a symposium on eco-regional approaches in agricultural research, 12 - 16 December 1994, ISNAR, The Hague.*, p.133-141. 1995.

FROEHLICH, O.K. Druckverteilung im Baudrunde (Formula of Boussinesq). *Vienna*. 1934.

GAID, M.B.; CELA, A.; DIALLO, S.; KOCIK, R.; HAMOUCHE, R.; REAMA, A. Performance Evaluation of the Distributed Implementation of a Car Suspension System. *IFAC WORKSHOP ON PROGRAMMABLE DEVICES AND EMBEDDED SYSTEMS*. Czech Republic 2006.

GE, Y.; THOMASSON, J.A. Wavelet incorporated spectral analysis for soil property determination. *Transactions of the Asabe*, v.49, n.4, Jul-Aug, p.1193-1201. 2006.

GEE, C.; BOSSU, J.; JONES, G.; TRUCHETET, F. Crop/weed discrimination in perspective agronomic images. *computers and electronics in agriculture*, v.60, n.1, Jan, p.49-59. 2008.

GILLESPIE, T.D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. 1992. xxii, 495 p. p.

GODOY, E.P. *Desenvolvimento de uma ferramenta de análise de desempenho de redes CAN (Controller Area Network) para aplicações em sistemas agrícolas*. 2007. 93 p. (Mestrado). Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GODOY, E.P. *Desenvolvimento de Sistemas de Controle via Rede (NCS) para Aplicações em Redes com Protocolo CAN*. 2011. 249 p. (PhD). Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.

GODOY, E.P.; TABILE, R.A.; PEREIRA, R.R.D.; TANGERINO, G.T.; PORTO, A.J.V.; INAMASU, R.Y. *Design and Implementation of a Mobile Agricultural Robot for Remote Sensing Applications*. CIGR Section V International Symposium. Rosario - Argentina, 2009. p.

- GODOY, E.P.; TANGERINO, G.T.; TABILE, R.A.; INAMASU, R.Y.; PORTO, A.J.V. Networked Control System for the Guidance of a Four Wheel Steering Agricultural Robotic Platform. *Journal of Control Science and Engineering*, v.2012, n.ID. 368503, p.10. 2012.
- GÓMEZ-DE-GABRIEL, J.M.; MARTÍNEZ, J.L.; OLLERO, A.; MANDOW, A.; MUNÓZ, V.F. *Autonomous and Teleoperated Control of the Aurora Mobile Robot*. World Congress of IFAC International Federation of Automatic Control. California - San Francisco, U.S.A. Jul., 1996. 181-186 p.
- GOZDOWSKI, D.; SAMBORSKI, S. Book Reviews - Precision agriculture. *Journal: Communications in Biometry and Crop Science*, v.2, p.90-94. 2007.
- GRANOT, R. Architecture for human supervised autonomously controlled off-road equipment. *Automation Technology for Off-Road Equipment*. ASABE. Chicago - Illinois - USA: ASABE. ASAE Publication Number 701P0502: 24-32 p. 2002.
- GRIFFIN, A.; HAUSER, J.R. The voice of the customer. *Marketing Science*, v.12, n.1, p.1-27. 1993.
- GU, D.; HU, H. Neural predictive control for a car-like mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, v.39, n.2, p.73-86. 2002.
- GU, J.S.; DE SILVA, C.W. Development and implementation of a real-time open-architecture control system for industrial robot systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v.17, n.5, p.469-483. 2004.
- GUHA, A.; JACOBS, J.M.; JACKSON, T.J.; COSH, M.H.; HSU, E.C.; JUDGE, J. Soil moisture mapping using ESTAR under dry conditions from the Southern Great Plains Experiment (SGP99). *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.41, n.10, Oct, p.2392-2397. 2003.
- GULDNERA, J.; UTKINB, V.I.; BAUERC, R. *A three-layered hierarchical path control system for mobile robots: algorithms and experiments*. Amsterdam, PAYS-BAS: Elsevier. 1995. 164 p.
- GUO, L.S.; ZHANG, Q. *A Wireless LAN for Collaborative Off-road Vehicle Automation*. Automation Technology for Off-Road Equipment. Chigaco - Illinois - USA: ASABe, 2002. 51-58 p.
- GUPTA, R.A.; CHOW, M.Y. Networked Control System: Overview and Research Trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v.57, n.7, July, p.2527-2535. 2010.
- GURGEL, F.C.A. *Administração do Produto*. São Paulo: Editora Atlas, v.1. 1995
- HAGUE, T.; MARCHANT, J.A.; TILLET, N.D. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles. *computers and electronics in agriculture*, v.25, n.1-2, p.11-28. 2000.
- HAGUE, T.; TILLET, N.D. Navigation and control of an autonomous horticultural robot. *Mechatronics*, v.6, n.2, p.165-180. 1996.
- HAMRITA, T.K.; HOFFACKER, E.C. Development of a "smart" wireless soil monitoring sensor prototype using RFID technology. *Applied Engineering in Agriculture*, v.21, n.1, Jan, p.139-143. 2005.

- HASELGROVE, L.; BOTTING, D.; VAN HEESWIJCK, R.; HØJ, P.B.; DRY, P.R.; FORD, C.; LAND, P.G.I. Canopy microclimate and berry composition: The effect of bunch exposure on the phenolic composition of *Vitis vinifera* L cv. Shiraz grape berries. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, v.6, n.2, p.141-149. 2000.
- HATFIELD, J.L.; GITELSON, A.A.; SCHEPERS, J.S.; WALTHALL, C.L. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. *Agron. J.*, v.100, n.Supplement_3, 2008/5, p.S-117-S-131. 2008.
- HAUSER, J.R.; CLAUSING, D. The house of quality. *Harvard Business Review*, v.1, n.1, p.1-13. 1988.
- HAVE, H.; NIELSEN, J.; BLACKMORE, S.; THEILBY, F. Autonomous Weeder for Christmas Trees - Basic Development and Tests. D.E.P. Agency: Danish Environmental Protection Agency. Pesticides Research No. 97 2005: 77 p. 2005.
- HE, J.; WANG, J.; HE, D.; DONG, J.; WANG, Y. The design and implementation of an integrated optimal fertilization decision support system. *Mathematical and Computer Modelling*, v.54, n.3-4, p.1167-1174. 2011.
- HEMMAT, A.; ADAMCHUK, V.I. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. *computers and electronics in agriculture*, v.63, n.2, p.89-103. 2008.
- HIRAFUJI, M.; KUBOTA, T. Chaos of Plant Growth under Changing Environment. *Environment Control in Biology*, v.32, n.1, p.31-39. 1994.
- HSU, W.; LIU, B. Conceptual design: issues and challenges. *Computer-Aided Design*, v.32, n.14, p.849-850. 2000.
- HUANG, T.; KONG, C.W.; GUO, H.L.; BALDWIN, A.; LI, H. A virtual prototyping system for simulating construction processes. *Automation in Construction*, v.16, n.5, p.576-585. 2007.
- HUETE, A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (Savi). *Remote Sensing of Environment*, v.25, n.3, Aug, p.295-309. 1988.
- HUI, L.; ZHIJUN, M.; SHUANGHU, C. *A Wireless Sensor Network Prototype for Environmental Monitoring in Greenhouses*. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on. 21-25 Sept. 2007, 2007. 2344-2347 p.
- HUMMEL, J.W.; SUDDUTH, K.A.; HOLLINGER, S.E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. *computers and electronics in agriculture*, v.32, n.2, Aug, p.149-165. 2001.
- IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; PINTER, P.J.; REGINATO, R.J.; HATFIELD, J.L. Normalizing the Stress-Degree-Day Parameter for Environmental Variability. *Agricultural Meteorology*, v.24, n.1, p.45-55. 1981.
- INOUE, K.; OTUKA, K.; SUGIMOTO, M.; MURAKAMI, N. *Estimation of place of tractor and adaptive control method of autonomous tractor using INS and GPS*. Preprints of the International Workshop on Robotics and Automated Machinery for Bio-Productions. Gandia: European Society of Agricultural Engineers, 1997. 727-736 p.
- ISEKI. *Iseki web site*. Disponível em: <<http://www.iseki.co.jp/english/>> Acesso em: 19 mar. 2010

- ISERMANN, R. Information processing for mechatronic systems. *Robotics and Autonomous Systems*, v.19, n.2, p.117-134. 1996.
- JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; JR, P.J.P. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, v.17, n.4, p.1133-1138. 1981.
- JACKSON, T.J.; SCHMUGGE, T.J. Passive Microwave Remote-Sensing System for Soil-Moisture - Some Supporting Research. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.27, n.2, Mar, p.225-235. 1989.
- JAHN, O.L. Penetration of Photosynthetically Active Radiation as a Measurement of Canopy Density of Citrus Trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v.104, n.4, p.557-560. 1979.
- JONES, J.L.; FLYNN, A.M.; SEIGER, B.A. *Mobile robots : inspiration to implementation*. Natick, Mass.: A.K. Peters. 1998
- JORDAN, C.F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, v.50, n.4, p.663-666. 1969.
- JØRGENSEN, R.N.; SØRENSEN, C.G.; JENSEN, K.; SØGAARD, H.T.; PEDERSEN, J.M.; SØRENSEN, L.B.; HAVN, I.; SIBBESEN, S.; NIELSEN, J. *Hortibot: An Accessory Kit Transforming a Slope Mower into a Robotic Tool Carrier for High-Tech Plant Nursing - Part I*. 2006 ASABE Annual International Meeting. Portland, Oregon. 9 - 12 July, 2006. 1-12 p.
- JØRGENSEN, R.N.; SØRENSEN, C.G.; MAAGAARD, J.; HAVN, I.; JENSEN, K.; SØGAARD, H.T.; SØRENSEN, L.B. HortiBot: A System Design of a Robotic Tool Carrier for High-tech Plant Nursing. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, v.9, n.1, July - 2007, p.1-13. 2007.
- JUDGE, J. Microwave remote sensing of soil water: Recent advances and issues. *Transactions of the Asabe*, v.50, n.5, Sep-Oct, p.1645-1649. 2007.
- JUNIOR, A.M.A. *Análise dos requisitos da qualidade em projetos de robôs agrícolas*. 2010. 112 p. (Master). Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2010.
- JUNKER, F. A systematics of modelling mechatronic systems. *Math. Comput. Simul.*, v.39, n.5-6, p.533-539. 1995.
- KALEITA, A.L.; TIAN, L.F.; HIRSCHI, M.C. Relationship between soil moisture content and soil surface reflectance. *Transactions of the ASAE*, v.48, n.5, Sep-Oct, p.1979-1986. 2005.
- KAMINSKI, P.C. *Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v.1. 2000
- KANEKO, N. QFD Implementation in the Service Industry. *45th Annual Quality Congress Transactions*,. Milwaukee, USA.: American Society for Quality Control: 808-813 p. 1991.
- KANO, N. Attractive quality and must-be quality. *The Journal of the Japanese Society for Quality Control*, v.14, n.2, p.39-48. 1984.
- KANO, Y.; MCCLURE, W.F.; SKAGGS, R.W. A near-Infrared Reflectance Soil-Moisture Meter. *Transactions of the ASAE*, v.28, n.6, Nov-Dec, p.1852-1855. 1985.

KARKEE, M. *Modeling, identification and analysis of tractor and single axle towed implement system*. 2009. 246 p. (Doctor Degree). Agricultural Engineering and Human Computer Interaction, Iowa State University, Ames - Iowa, 2009.

KAZYS, R.; SVILAINIS, L.; MAZEIKA, L. Application of orthogonal ultrasonic signals and binaural processing for imaging of the environment. *Ultrasonics*, v.38, n.1-8, p.171-175. 2000.

KEICHER, R.; SEUFERT, H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *computers and electronics in agriculture*, v.25, n.1-2, p.169-194. 2000.

KHOSLA, R.; INMAN, D.; REICH, R.; WESTFALL, D.G. Normalized difference vegetation index and soil color-based management zones in irrigated maize. *Agronomy journal*, v.100, n.1, Jan-Feb, p.60-66. 2008.

KIM, H.J.; HUMMEL, J.W.; SUDDUTH, K.A.; MOTAVALLI, P.P. Simultaneous analysis of soil macronutrients using ion-selective electrodes. *Soil Science Society of America Journal*, v.71, n.6, Nov-Dec, p.1867-1877. 2007.

KIM, M.-S.; SHIN, J.-H.; HONG, S.-G.; LEE, J.-J. Designing a robust adaptive dynamic controller for nonholonomic mobile robots under modeling uncertainty and disturbances. *Mechatronics*, v.13, n.5, p.507-519. 2003.

KING, B. *Better designs in half the time : implementing QFD quality function deployment in America*. Methuen, MA: GOAL/QPC. 1989

KISE, M.; NOGUCHI, N.; ISHII, K.; TERAOKA, H. *The development of the autonomous tractor with steering controller applied by optimal control*. Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment. Chicago - IL, 2002. 367-373 p.

KLAS; ROLF. Integrated architecture for industrial robot programming and control. *Robotics and Autonomous Systems*, v.29, n.4, p.205-226. 1999.

KOOISTRA, L.; WANDERS, J.; EPEMA, G.F.; LEUVEN, R.S.E.W.; WEHRENS, R.; BUYDENS, L.M.C. The potential of field spectroscopy for the assessment of sediment properties in river floodplains. *Analytica Chimica Acta*, v.484, n.2, p.189-200. 2003.

KOPETZ, H. A communication infrastructure for a fault-tolerant distributed real-time system. *Control Engineering Practice*, v.3, n.8, p.1139-1146. 1995.

KRISHNAN, P.; ALEXANDER, J.D.; BUTLER, B.J.; HUMMEL, J.W. Reflectance Technique for Predicting Soil Organic-Matter. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, n.6, p.1282-1285. 1980.

KRÖSE, B.J.A.; DEV, A.; GROEN, F.C.A. Heading direction of a mobile robot from the optical flow. *Image and Vision Computing*, v.18, n.5, p.415-424. 2000.

KUCKENBERG, J.; TARTACHNYK, I.; NOGA, G. Temporal and spatial changes of chlorophyll fluorescence as a basis for early and precise detection of leaf rust and powdery mildew infections in wheat leaves. *Precision Agriculture*, v.10, n.1, p.34-44. 2009.

KURZ, A. ALEF: An autonomous vehicle which learns basic skills and constructs maps for navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, v.14, n.2-3, p.171-183. 1995.

LACAGNINA, M.; MUSCATO, G.; SINATRA, R. Kinematics, dynamics and control of a hybrid robot Wheeleg. *Robotics and Autonomous Systems*, v.45, n.3-4, p.161-180. 2003.

LADONI, M.; BAHRAMI, H.; ALAVIPANAH, S.; NOROUZI, A. Estimating soil organic carbon from soil reflectance: a review. *Precision Agriculture*, v.11, n.1, p.82-99. 2010.

LAMB, D.W.; HUANG, W.; NIU, Z.; ZHANG, Y.; LIU, L.; WANG, J. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging. *Precision Agriculture*, v.8, n.4-5, Oct, p.187-197. 2007.

LAMBE, T.W. *Soil testing for engineers*. New York. 1951. 165 p.

LAMON, P.; SIEGWART, R. *Wheel Torque Control in Rough Terrain - Modeling and Simulation*. Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on, 2005. 867-872 p.

LAMON, P.; SIEGWART, R. 3D Position Tracking in Challenging Terrain. *International Journal of Robotics Research*, v.26, n.2, February 1, 2007, p.167-186. 2007.

LANIEL, M.; UYSAL, I.; EMOND, J.P. Radio Frequency Interactions with Air Cargo Container Materials for Real-Time Cold Chain Monitoring. *Applied Engineering in Agriculture*, v.27, n.4, Jul, p.647-652. 2011.

LAWITZKY, G.; FEITEN, W.; MÖLLER, M. Sonar sensing for low-cost indoor mobility. *Robotics and Autonomous Systems*, v.14, n.2-3, p.149-157. 1995.

LEE, M. Evolution of behaviors in autonomous robot using artificial neural network and genetic algorithm. *Information Sciences*, v.155, n.1-2, p.43-60. 2003.

LEE, W.S.; ALCHANATIS, V.; YANG, C.; HIRAFUJI, M.; MOSHOU, D.; LI, C. Sensing technologies for precision specialty crop production. *computers and electronics in agriculture*, v.74, n.1, p.2-33. 2010.

LEE, Y.-C.; HUANG, S.-Y. A new fuzzy concept approach for Kano's model. *Expert Systems with Applications*, v.36, n.3, Part 1, p.4479-4484. 2009.

LEINONEN, I.; JONES, H.G. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, v.55, n.401, Jun, p.1423-1431. 2004.

LEON, C.T.; SHAW, D.R.; COX, M.S.; ABSHIRE, M.J.; WARD, B.; WARDLAW, M.C.; WATSON, C. Utility of Remote Sensing in Predicting Crop and Soil Characteristics. *Precision Agriculture*, v.4, n.4, p.359-384. 2003.

LIAN, F.L.; MOYNE, J.R.; TILBURY, D.M. Network Design Consideration for Distributed Control Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v.10, n.2, March, p.297-307. 2002.

LIAO, S.-H. Technology management methodologies and applications: A literature review from 1995 to 2003. *Technovation*, v.25, n.4, p.381-393. 2005.

LU, D.S. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, v.27, n.7, Apr 10, p.1297-1328. 2006.

- LYNN, G.S.; AKGUN, A.E. Innovation Strategies under Uncertainty: A Contingency Approach for New Product Development. *Engineering Management Journal*, v.10, n.3, p.8-37. 1998.
- MADSEN, T.E.; JAKOBSEN, H.L. *Mobile Robot for Weeding* 2001. 159 p. (Master Thesis). Department of Control and Engineering design, Technical University of Denmark, Denmark, 2001.
- MAIDIQUE, M.A.; ZIRGER, B.J. A study of success and failure in product innovation: the case of the US Electronics Industry. *IEEE Transactions on Engineering Management*, v.EM 31, n.4, p.192-203. 1984.
- MAJUMDER, S.; SCHEDING, S.; DURRANT-WHYTE, H.F. Multisensor data fusion for underwater navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, v.35, n.2, p.97-108. 2001.
- MANDOW, A.; GÓMEZ-DE-GABRIEL, J.; OLLERO, A.; MARTÍNEZ, J.L.; MUÑOZ, V.F. *Greenhouse Operation with the Aurora Mobile Robot*. IARP Conference on Robotics in the agriculture and the food-industry. Toulouse, France 1995a. 185-191 p.
- MANDOW, A.; GOMEZ-DE-GABRIEL, J.M.; MARTINEZ, J.L.; MUNOZ, V.F.; OLLERO, A.; GARCIA-CEREZO, A. The autonomous mobile robot AURORA for greenhouse operation. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, v.3, n.4, p.18-28. 1996.
- MANDOW, A.; MARTÍNEZ, J.L.; MUÑOZ, V.F.; GÓMEZ-DE-GABRIEL, J.; OLLERO, A.; REINA, A.J. *Sonar-based Navigation in Constrained Environments with The Aurora Mobile Robot*. International Conference on Advanced Robotics. Sant Feliu de Gíxols - Catalonia, Spain, 1995b. 785-790 p.
- MANDOW, A.; MUÑOZ, V.F.; GÓMEZ-DE-GABRIEL, J.; MARTÍNEZ, J.L.; OLLERO, A. *Navigation with Reactive Behaviours for the Aurora Mobile Robot*. IFAC Workshop on Intelligent Components for Autonomous and Semiautonomous Vehicles. Toulouse, France, 1995c. 43-38 p.
- MARDIA, K.V.; KENT, J.T.; BIBBY, J.M. *Multivariate Analysis*.: Academic Press. 1979
- MARSH, J.R.; GATES, R.S.; DAY, G.B.; AIKEN, G.E.; WILKERSON, E.G. *Assessment of an Injectable RFID Temperature Sensor for Indication of Horse Well-Being*. ASABE Annual International Meeting. Providence, Rhode Island: ASABE, 2008. p.
- MARTINS, A.; ASPINWALL, E.M. Quality function deployment: An empirical study in the UK. *Total Quality Management*, v.12, n.5, p.575-588. 2001.
- MATTIAZZO, G.; MAURO, S.; RAPARELLI, T.; VELARDOCCHIA, M. A fuzzy controlled pneumatic gripper for asparagus harvesting. *Control Engineering Practice*, v.3, n.11, p.1563-1570. 1995.
- MCBRATNEY, A.; WHELAN, B.; ANCEV, T.; BOUMA, J. Future Directions of Precision Agriculture. *Precision Agriculture*, v.6, n.1, p.7-23. 2005.
- MCDONOUGH, E.F.; BARCZAK, G. The Effects of Cognitive Problem-Solving Orientation and Technological Familiarity on Faster New Product Development. *Journal of Product Innovation Management*, v.9, n.1, p.44-52. 1992.
- MEDLAND, A.J.; MULLINEUX, G. A decomposition strategy for conceptual design. *Journal of Engineering Design*, v.11, n.1, p.3-16. 2000.

- MEJNERTSEN, A.; RESKE-NIELSEN, A. *Control of Autonomous Tractor*. 2006. 101 p. (Master thesis). Department of Automation, Technical University of Denmark, Ørsted, 2006.
- MERON, M.; TSIPRIS, J.; ORLOV, V.; ALCHANATIS, V.; COHEN, Y. Crop water stress mapping for site-specific irrigation by thermal imagery and artificial reference surfaces. *Precision Agriculture*, v.11, n.2, Apr, p.148-162. 2010.
- METTERNICHT, G.I.; ZINCK, J.A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, v.85, n.1, Apr 25, p.1-20. 2003.
- MICHELS, G.J.; PICCINNI, G.; RUSH, C.M.; FRITTS, D.A. Using infrared transducers to sense greenbug infestation in winter wheat. *International Conference on Precision Agriculture*. Saint Paul, MN 2000.
- MIHAYLOVA, L.; DE SCHUTTER, J.; BRUYNINCKX, H. A multisine approach for trajectory optimization based on information gain. *Robotics and Autonomous Systems*, v.43, n.4, p.231-243. 2003.
- MOGENSEN, L.V.; ANDERSEN, N.A.; RAVN, O.; POULSEN, N.K. *Using Kalmtol in Navigation of Mobile Robots*. European Control Conference. Kos, Greece, 2007. 8 p.
- MOLIN, J.P. *Agricultura de Precisão - O Gerenciamento da Variabilidade*. Piracicaba, v.1. 2001
- MOLLER, M.; ALCHANATIS, V.; COHEN, Y.; MERON, M.; TSIPRIS, J.; NAOR, A.; OSTROVSKY, V.; SPRINTSIN, M.; COHEN, S. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, v.58, n.4, Mar, p.827-838. 2007.
- MOLTO, E.; MARTIN, B.; GUTIERREZ, A. Pesticide loss reduction by automatic adaptation of spraying on globular trees. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.78, n.1, Jan, p.35-41. 2001.
- MOORE, K.; DAVIDSON, M.; BAHL, V.; RICH, S.; JIRGAL, S. *Modeling and control of a six-wheeled autonomous robot*. American Control Conference. Chicago, IL. Jun., 1999. 1483-1490 p.
- MOORE, K.L.; FLANN, N.S. A six-wheeled omnidirectional autonomous mobile robot. *Control Systems Magazine, IEEE*, v.20, n.6, p.53-66. 2000.
- MORAIS, R.; VALENTE, A.; SERÔDIO, C. *Wireless Sensor Network for Smart Irrigation and Environmental Monitoring: A Position Article*. EFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture. Portugal, 2005. 845–850 p.
- MOUAZEN; #160; M., A.; KAROUI; R.; BAERDEMAEKER, D.; J.; RAMON; H. *Characterization of soil water content using measured visible and near infrared spectra*. Madison, WI, ETATS-UNIS: Soil Science Society of America, v.70. 2006. 8 p.
- MOYNE, J.R.; TILBURY, D.M. The Emergence of Industrial Control Networks for Manufacturing Control, Diagnostics and Safety Data. *IEEE Technology of Networked Control Systems*, v.95, n.1, p.29-47. 2007a.
- MOYNE, J.R.; TILBURY, D.M. The Emergence of Industrial Control Networks for Manufacturing Control, Diagnostics, and Safety Data. *IEEE Proceedings of the Technology of Networked Control Systems*, v.95, n.1, January, p.29-47. 2007b.

MULLER, E.; DECAMPS, H. Modeling soil moisture-reflectance. *Remote Sensing of Environment*, v.76, n.2, May, p.173-180. 2001.

NAGASAKA, Y. *Development of an automated rice transplanter*. 2008. p. Ph.D. (Ph.D.). Department of Farm Mechanization and Engineering, Kyoto University, Kyoto - Japan, 2008.

NAGASAKA, Y.; KITAGAWA, H.; MIZUSHIMA, A.; NOGUCHI, N.; SAITO, H.; K., K. Unmanned ricetransplanting operation using a GPS-guided rice transplanter with long mat-type hydroponic seedlings. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, v.9, n.Manuscript ATOE 07 008, Jul., p.1-10. 2007.

NAGASAKA, Y.; OTANI, R.; SHIGETA, K.; TANIWAKI, K. *An automated rice transplanting in paddy fields*. ASAE Paper 99-1045. Toronto - Canada, 1999. p.

NAGASAKA, Y.; SAITO, H.; TAMAKI, K.; SEKI, M.; KOBAYASHI, K.; TANIWAKI, K. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit. *Journal of Field Robotics*, v.26, n.6-7, p.537-548. 2009.

NAGASAKA, Y.; TANIWAKI, K.; OTANI, R.; SHIGETA, K. An automated rice transplanter with RTKGPS and FOG. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, v.4, n.Manuscript PM 01 003, p.1-7. 2002.

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

NAIDU, R.A.; PERRY, E.M.; PIERCE, F.J.; MEKURIA, T. The potential of spectral reflectance technique for the detection of Grapevine leafroll-associated virus-3 in two red-berried wine grape cultivars. *computers and electronics in agriculture*, v.66, n.1, Apr, p.38-45. 2009.

NASSIRAEI, A.A.F.; ISHII, K. Concept of Intelligent Mechanical Design for Autonomous Mobile Robots. *Journal of Bionic Engineering*, v.4, n.4, p.217-226. 2007.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL USA. *Precision agriculture in the 21st century : geospatial and information technologies in crop management*. Washington, D.C.: National Academy Press. 1997. xii, 149 p. p.

NIEUWENHUIZEN, A.; TANG, L.; HOFSTEE, J.; MÜLLER, J.; VAN HENTEN, E. Colour based detection of volunteer potatoes as weeds in sugar beet fields using machine vision. *Precision Agriculture*, v.8, n.6, p.267-278. 2007.

NING, K.; YANG, R. MAS based embedded control system design method and a robot development paradigm. *Mechatronics*, v.16, n.6, p.309-321. 2006.

NOGUCHI, N.; KISE, M.; ISHII, K.; TERAOKA, H. *Field automation using robot tractor*. Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment. Chicago - IL, 2002. 239–245 p.

NØRREMARK, M.; SØRENSEN, C.G.; JØRGENSEN, R.N. *HortiBot: Comparison of present and future phytotechnologies for weed control - part III*. 2006 ASABE Annual International Meeting. Portland, Oregon: ASABE. 9 - 12 July, 2006. 1-14 p.

OERKE, E.; GERHARDS, R.; MENZ, G.; SIKORA, R.A. *Precision crop protection - the challenge and use of heterogeneity*. New York: Springer. 2010

OKSANEN, T.; OMAN, M.; MIETTINEM, M.; VISALA, A. *Open Configurable Control System for Precision Farming*. International Conference of Automation Technology for Off-Road Equipment. Kyoto - Japan: ASAE 2004. 184-191 p.

OKUDAN, G.E.; ZAPPE, S.E. Teaching product design to non-engineers: A review of experience, opportunities and problems. *Technovation*, v.26, n.11, p.1287-1293. 2006.

OLLERO, A.; MARTÍNEZ, J.L.; SIMÓN, A.; GÓMEZ-DE-GABRIEL, J.; MUÑOZ, V.F.; MANDOW, A.; GARCÍA-CEREZO, A.; GARCÍA, F.; MARTINEZ, M.A. *The Autonomous Robots for Spraying: Aurora*. IARP Conference on Robotics in the Agriculture and the food industry. Toulouse, France, 1995. 193-198 p.

ONYANGO, C.M.; MARCHANT, J.A. Segmentation of row crop plants from weeds using colour and morphology. *computers and electronics in agriculture*, v.39, n.3, p.141-155. 2003.

OPARA, L.U. Engineering principles of agricultural machines : A.K. Srivastava, C.E. Goering and R.P. Rohrbach (Editors) The American Society of Agricultural Engineers, 1993 (Revised Printing August 1994), Hardback; 601 pp.; \$54.00; ISBN 0-929355-33-4. *computers and electronics in agriculture*, v.18, n.1, p.55-57. 1997.

OREBÄCK, A.; CHRISTENSEN, H.I. Evaluation of Architectures for Mobile Robotics. *Autonomous Robots*, v.14, n.1, p.33-49. 2003.

ORTIGAO, J.A.R. *Introdução a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*: LTC Editores. 2007. 391 p.

OTHMAN, H.F.; AJI, Y.R.; FAKHREDDIN, F.T.; AL-ALI, A.R. *Controller Area Networks: Evolution and Applications*. International Conference On Information And Communication Technologies. 24-28 April, 2006. 3088-3093 p.

PAHL, G.; BEITZ, W. *Engineering design: a systematic approach*. Berlin: Springer. 1988

PAHL, G.; BEITZ, W. *Engineering design -- A systematic approach*: Springer-Verlag, v.1. 1996. 544 p.

PAVLICS, F. Instruments for the measurement of physical soil values - Report n. 5 In: (Ed.): A soil value system for land locomotion mechanics - Department of the Army, Ordnance Tank Automotive Command, 1958. Instruments for the measurement of physical soil values - Report n. 5 p.14-24

PC/104. *PC/104 Consortium Website*. Disponível em: <<http://www.pc104.org/>> Acesso em: 03/03 2010

PEDERSEN, S.M.; FOUNTAS, S.; HAVE, H.; BLACKMORE, B.S. Agricultural robots: an economic feasibility study. *Precision Agriculture*, p.589-596. 2005.

PEREIRA, R.R.D. *Protocolo ISO 11783 Procedimentos para comunicação serial de dados com o Controlador de Tarefas*. 2008. 188 p. Mestrado (Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos 2008.

PETERSON, G.L.; COOK, D.J. Incorporating decision-theoretic planning in a robot architecture. *Robotics and Autonomous Systems*, v.42, n.2, p.89-106. 2003.

- PIERCE, F.J.; CLAY, D. *GIS applications in agriculture*. Boca Raton: CRC Press. 2007. 203 p. p. (GIS applications in agriculture series)
- PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of Precision Agriculture. In: L.S. Donald (Ed.). *Advances in Agronomy*: Academic Press, v. Volume 67, 1999. Aspects of Precision Agriculture, p.1-85
- PLANT, R.E.; MUNK, D.S.; ROBERTS, B.R.; VARGAS, R.L.; RAINS, D.W.; TRAVIS, R.L.; HUTMACHER, R.B. Relationships between remotely sensed reflectance data and cotton growth and yield. *Transactions of the ASAE*, v.43, n.3, May-Jun, p.535-546. 2000.
- POURBOGHRAT, F.; KARLSSON, M.P. Adaptive control of dynamic mobile robots with nonholonomic constraints. *Computers & Electrical Engineering*, v.28, n.4, p.241-253. 2002.
- PRASAD, B. Review of QFD and related deployment techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, v.17, n.3, p.221-234. 1998.
- PURSER, L. *Home robots: Future of fantasy*. Computing and Control Division Colloquium on Personal and Domestic Robots. London - UK, 1985. p.
- QIAN, D.; CHENGHAI, Y.; EVERITT, J.H. *Airborne hyperspectral image analysis for grain sorghum yield variability mapping*. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International. 25-29 July 2005, 2005. 2991-2993 p.
- RAMASAMY, N.R.; SELLADURAI, V. Fuzzy logic approach to prioritise engineering characteristics in quality function deployment. *International Journal of Quality and Reliability Management*, v.21, n.9, p.1012-1023. 2004.
- RAY, L.E. Estimation of Terrain Forces and Parameters for Rigid-Wheeled Vehicles. *Robotics, IEEE Transactions on*, v.25, n.3, p.717-726. 2009.
- REEKIE, J. *Is there really a market for home robots?* Computing and Control Division Colloquium on Personal and Domestic Robots. London - Uk, 1985. p.
- REID, J.F.; ZHANG, Q.; NOGUCHI, N.; DICKSON, M. Agricultural automatic guidance research in North America. *computers and electronics in agriculture*, v.25, n.1-2, p.155-167. 2000.
- REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J.W. *The Automotive Chassis: Engineering Principles*. Oxford: Elsevier Science, v. Second edition. 2001. 454 p.
- RESKE-NIELSEN, A.; MEJNERTSEN, A.; ANDERSEN, N.; RAVN, O.; NØRREMARK, M.; GRIEPENTROG, H.W. *Multilayer controller for outdoor vehicle*. Automation Technology for Off-Road Equipment Bonn, Germany. 1 e 2 Set, 2006. 41 - 49 p.
- RINNAN, R.; RINNAN, A. Application of near infrared reflectance (NIR) and fluorescence spectroscopy to analysis of microbiological and chemical properties of arctic soil. *Soil Biology & Biochemistry*, v.39, n.7, Jul, p.1664-1673. 2007.
- RITCHIE, J.C.; EVANS, D.L.; JACOBS, D.; EVERITT, J.H.; WELTZ, M.A. Measuring Canopy Structure with an Airborne Laser Altimeter. *Transactions of the ASAE*, v.36, n.4, Jul-Aug, p.1235-1238. 1993.

- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. Proceedings of the Third ERTS Symposium. Washington DC, 1973. 309-317 p.
- ROY, J.; WHITCOMB, L.L. Adaptive Force Control of Position/Velocity Controlled Robots: Theory and Experiment. . *IEEE Transactions On Robotics And Automation*, v.18, n.2, April, p.121-137. 2002.
- RUCKELSHAUSEN, A.; KLOSE, R.; LINZ, A.; MARQUERING, J.; THIEL, M.; TÖLKE, S. Autonome Roboter zur Unkrautbekämpfung *Journal of Plant Diseases and Protection*, p.173-180 2006.
- RUIZ-GARCIA, L.; LUNADEI, L. The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges. *computers and electronics in agriculture*, v.79, n.1, p.42-50. 2011.
- SAE. Surface Vehicle Recommended Practice. *Vehicle Dynamics Terminology - SAE J670*. S.O.a.E.-. Sae: Society of Automotive Engineers: 41 p. 1976.
- SALISBURY, J.W.; DARIA, D.M. Infrared (8-14 μ m) Remote-Sensing of Soil Particle-Size. *Remote Sensing of Environment*, v.42, n.2, Nov, p.157-165. 1992.
- SALYANI, M.; WEI, J. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 1. Prototype development. *Transactions of the ASAE*, v.47, n.6, Nov-Dec, p.2101-2107. 2004.
- SALYANI, M.; WEI, J. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 2. Foliage density measurement. *Transactions of the ASAE*, v.48, n.4, Jul-Aug, p.1595-1601. 2005.
- SALYANI, M.; ZAMAN, Q.U. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. *Applied Engineering in Agriculture*, v.20, n.2, Mar, p.173-178. 2004.
- SANDINI, G.; YAMADA, Y.; WILKES, D.M.; BISHAY, M. Sensing group report. *Robotics and Autonomous Systems*, v.18, n.1-2, p.207-211. 1996.
- SANTANA, P.F.; CÂNDIDO, C.; SANTOS, V.; BARATA, J. *A motion controller for compliant four-wheel-steering robots*. 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Kunming, China. 17-20 Dec, 2006. p.
- SAVAGE. *Supportive autonomous vehicle for agriculture*. Disponível em: <<http://users.forthnet.gr/ath/startrek/index.html>> Acesso em: 03/03 2010
- SCHARF, P.C.; LORY, J.A. *Calibration of remotely-sensed corn color to predict nitrogen need*. Proceeding of the Fifth International Conference on Precision Agriculture. Madison, 2000. p.
- SCHELLBERG, J.; HILL, M.J.; GERHARDS, R.; ROTHMUND, M.; BRAUN, M. Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy*, v.29, n.2-3, p.59-71. 2008.
- SCHONBERG, T.; OJALA, M.; SUOMELA, J.; TORPO, A.; HALME, A. Positioning an autonomous off-road vehicle by using fused DGPS and inertial navigation. *International Journal of Systems Science*, v.27, n.8, p.745-752. 1996.

SCHUELLER, J.K. A Review and Integrating Analysis of Spatially-Variable Control of Crop Production. *Fertilizer Research*, v.33, n.1, Oct, p.1-34. 1992.

SCORZONI, F.; GODOY, E.P.; TABILE, R.A.; PORTO, A.J.V.; INAMASU, R.Y. Sistema distribuído para controle do posicionamento de antena direcional de um robô agrícola móvel VI Congresso Nacional De Engenharia Mecânica. Campina Grande – Paraíba - Brazil: SBEM 2010.

SEARCY, S.W. *Engineering systems for site-specific management: opportunities and limitations*. Site-specific Management for Agricultural Systems. Madison, WI., 1995. 603-612 p.

SEARCY, S.W.; SCHUELLER, J.K.; BAE, Y.H.; BORGELT, S.C.; STOUT, B.A. Mapping of Spatially-Variable Yield during Grain Combining. *Transactions of the ASAE*, v.32, n.3, May-Jun, p.826-829. 1989.

SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; TRINGE, J.M.; SCHLEMMER, M.R.; MAJOR, D.J. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy journal*, v.93, n.3, May/June, p.583-589. 2001.

SHEN, Q.; GAUSEMEIER, J.; BAUCH, J.; RADKOWSKI, R. A cooperative virtual prototyping system for mechatronic solution elements based assembly. *Advanced Engineering Informatics*, v.19, n.2, p.169-177. 2005.

SHIBUSAWA, S.; ANOM, W.S.I.M.; SATO, H.; SASAO, A.; HIRAKO, S.; OTOMO, A.; BLACKMORE, S. On-line real-time soil spectrophotometer. *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*,. P.C. Robert; R.H. Rust; W.E. Larson. Bloomington, Minnesota: 1-13 p. 2001.

SHIMAKAWA, H.; IDO, G.; TAKADA, H.; TAKEGAKI, M. Real-Time Reactions in Supervisory Control According to Data Freshness. *Real-Time Systems*, v.20, n.2, p.197-210. 2001.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSH, I.R. *Introduction to autonomous mobile robots*. Cambridge, Mass.: MIT Press. 2004. ix, 321 p. p. (Intelligent robots and autonomous agents)

SILVA, R.B.; JR, M.S.D.; SANTOS, F.L.; FRANZ, C.A.B. Resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v.28, n.1, p.165-173. 2004.

SØRENSEN, C.G.; JØRGENSEN, R.N.; MAAGAARD, J.; BERTELSEN, K.K.; DALGAARD, L.; NØRREMARK, M. User-centered and conceptual technical guidelines of a plant nursing robot. *2008 ASABE Annual International Meeting*. Asabe. Providence, Rhode Island: ASABE. 1: 12 p. 2008.

SØRENSEN, C.G.; JØRGENSEN, R.N.; MAAGAARD, J.; BERTELSEN, K.K.; DALGAARD, L.; NØRREMARK, M. Conceptual and user-centric design guidelines for a plant nursing robot. *Biosystems Engineering*, v.105, n.1, p.119-129. 2010.

SØRENSEN, C.G.; JØRGENSEN, R.N.; PEDERSEN, J.M.; NØRREMARK, M. *HortiBot: Application of Quality Function Deployment (QFD) Method for Horticultural Robotic Tool Carrier Design Planning - Part II*. 2006 ASABE Annual International Meeting. Portland, Oregon: ASABE. 9 - 12 July, 2006. 1-12 p.

SØRENSEN, C.G.; NØRREMARK, M.; JØRGENSEN, R.N.; JENSEN, K.; MAAGAARD, J.; JENSEN, L.A. *Hortibot: Feasibility study of a plant nursing robot performing weeding*

operations - part IV. 2007 ASABE Annual International Meeting. Minneapolis - Minnesota - USA ASABE. 17 - 20 June, 2007. 1 -12 p.

SOUSA, A.G. *Estudo e análise dos métodos de avaliação da montabilidade de produtos industriais no processo de projeto*. 1998. 238 p. Dissertação de mestrado (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

SOUTHALL, B.; HAGUE, T.; MARCHANT, J.A.; BUXTON, B.F. An Autonomous Crop Treatment Robot: Part I. A Kalman Filter Model for Localization and Crop/Weed Classification. *The International Journal of Robotics Research*, v.21, n.1, January 1, 2002, p.61-74. 2002.

SOUZA, R.V.D. *CAN (Controller Area Network): uma abordagem para automação e controle na área agrícola*. 2002. p. (Master). Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.

SOUZA, R.V.D. *Robô agrícola móvel (RAM) uma arquitetura baseada em comportamentos hierárquicos e difusos para sistemas autônomos de guiagem e navegação*. 2007. 211 p. (Doutorado). Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SPIDER. *Spider - Radio controlled slope mower*. Disponível em: <<http://www.slope-mower.com/en/>> Acesso em: 03/03 2010

SRINIVASAN, A. *Handbook of precision agriculture : principles and applications*. Bringhamton, NY: Food Products Press. 2006. xxv, 683 p. p.

STAJNKO, D.; LAKOTA, M.; HOEVAR, M. Estimation of number and diameter of apple fruits in an orchard during the growing season by thermal imaging. *computers and electronics in agriculture*, v.42, n.1, Jan, p.31-42. 2004.

STER, B. An integrated learning approach to environment modelling in mobile robot navigation. *Neurocomputing*, v.57, p.215-238. 2004.

STEWART, B.L.; SHRESTHA, D.S. Shape and size analysis of corn plant canopies for plant population and spacing sensing. *Applied Engineering in Agriculture*, v.21, n.2, Mar, p.295-303. 2005.

STIGA. *Stiga Garden Combi product features*. Disponível em: <<http://www.stiga-online.com/product/17/stigagardencombi>> Acesso em: 03/03 2010

STILLER, C.; PUENTE LEÓN, F.; KRUSE, M. Information fusion for automotive applications - An overview. *Information Fusion*, v.12, n.4, p.244-252. 2011.

STRAUSS, C.; CUGNASCA, C.E.; SARAIVA, A.M.; PAZ, S.M. *The ISO11783 standard and its use in precision agriculture equipment*. IV International Conference on Precision Farming. Minnesota: ASA; CSSA; SSSA, 1998. 1253-1261 p.

SUBRAMANIAN, V.; BURKS, T.F.; ARROYO, A.A. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. *computers and electronics in agriculture*, v.53, n.2, Sep, p.130-143. 2006.

SUDDUTH, K.A.; CHUNG, S.-O.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; UPADHYAYA, S.K. Field comparison of two prototype soil strength profile sensors. *computers and electronics in agriculture*, v.61, n.1, p.20-31. 2008.

SUVINEN, A.; SAARILAHTI, M. Measuring the mobility parameters of forwarders using GPS and CAN bus techniques. *Journal of Terramechanics*, v.43, n.1, p.237-252. 2006.

TABILE, R.A.; GODOY, E.P.; PEREIRA, R.R.D.; TANGERINO, G.T.; PORTO, A.J.V.; INAMASU, R.Y. *Design of the mechatronic architecture of an agricultural mobile robot* 3rd Annual Dynamic Systems and Control Conference and 5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems. Boston. : Proceedings of the IFAC MECH2010, 2010a. p.

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

TABILE, R.A.; GODOY, E.P.; SCORZONI, F.; BRAGATO, B.N.; PORTO, A.J.V.; INAMASU, R.Y. Use of virtual prototyping for evaluation of mechanical behavior of an agricultural mobile robot. *VI Congresso Nacional De Engenharia Mecânica*. Campina Grande - PB - Brazil: SBEM 2010b.

TABILE, R.A.; INAMASU, R.Y.; PORTO, A.J.V. Robótica na Agricultura. In: R.Y. Inamasu; J.D.M. Naime; Á.V.D. Resende; L.H. Basso; A.C.D.C. Bernardi (Ed.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos: Embrapa Instrumentação, v.1, 2012. Robótica na Agricultura, p.334

TANGERINO, G.T. *Sistemas de sensoriamento embarcado para uso em controle de aplicações de insumos agrícolas à taxa variável*. 2009. 125 p. Mestrado (Master Degree). Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

TANGERINO, G.T.; GODOY, E.P.; TABILE, R.A.; INAMASU, R.Y.; PORTO, A.J.V. Hydraulic networked control of four Wheel steering agricultural robot. *IX IEEE International Conference on Control & Automation*. Santiago - Chile: IEEE 2011a.

TANGERINO, G.T.; GODOY, E.P.; TABILE, R.A.; SANCHES, R.M.; INAMASU, R.Y.; PORTO, A.J.V. Controle de esterçamento de robô agrícola móvel de quatro rodas guiáveis. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. São João Del-Rei - MG - Brazil 2011b.

TANGERINO, G.T.; INAMASU, R.Y.; TABILE, R.A.; GODOY, E.P.; PORTO, A.J.V. Estado da arte em robótica agrícola no Brasil e no mundo. *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*. Cuiaba - MT - Brazil: SBEA 2011c.

TEKIN, Y.; KUL, B.; OKURSOY, R. Sensing and 3D mapping of soil compaction. *Sensors*, v.8, n.5, May, p.3447-3459. 2008.

THOMASSON, J.A.; SUI, R.; COX, M.S.; AL-RAJEHY, A. Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture. *Transactions of the ASAE*, v.44, n.6, Nov-Dec, p.1445-1453. 2001.

THOMPSON, E.A.; HARMISON, E.; CARPER, R.; MARTIN, R.; ISAACS, J. Robot teleoperation featuring commercially available wireless network cards. *J. Netw. Comput. Appl.*, v.29, n.1, p.11-24. 2006.

TIAN, L.F.; SLAUGHTER, D.C. Environmentally adaptive segmentation algorithm for outdoor image segmentation. *computers and electronics in agriculture*, v.21, n.3, Dec, p.153-168. 1998.

TILLETT, N.D.; HAGUE, T.; GRUNDY, A.C.; DEDOUSIS, A.P. Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. *Biosystems Engineering*, v.99, n.2, Feb, p.171-178. 2008.

TORII, T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan. *computers and electronics in agriculture*, v.25, n.1-2, p.133-153. 2000.

TREVELYAN, J. Simplifying robotics -- A challenge for research. *Robotics and Autonomous Systems*, v.21, n.3, p.207-220. 1997.

TUCKER, C.J.; HOLBEN, B.N.; ELGIN, J.H.; MCMURTREY, J.E. Relationship of Spectral Data to Grain-Yield Variation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.46, n.5, p.657-666. 1980.

ULLMAN, D.G. *The Mechanical Design Process*. New York: McGraw-Hill. 1992

ULRICH, I.; MONDADA, F.; NICOUD, J.D. Autonomous Vacuum Cleaner. *Robotics and Autonomous Systems*, v.19, n.3-4, 1997, p.233-245. 1997.

VAN DER WEIDE, R.Y.; BLEEKER, P.O.; ACHTEN, V.T.J.M.; LOTZ, L.A.P.; FOGELBERG, F.; MELANDER, B. Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed Research*, v.48, n.3, Jun, p.215-224. 2008.

VAN EVERT, F.K.; VAN DER HEIJDEN, G.W.A.M.; LOTZ, L.A.P.; POLDER, G.; LAMAKER, A.; DE JONG, A.; KUYPER, M.C.; GROENDIJK, E.J.K.; NEETESON, J.J.; VAN DER ZALM, T. A mobile field robot with vision-based detection of volunteer potato plants in a corn crop. *Weed Technology*, v.20, n.4, Oct-Dec, p.853-861. 2006.

VARVEL, G.E.; SCHLEMMER, M.R.; SCHEPERS, J.S. Relationship between spectral data from an aerial image and soil organic matter and phosphorus levels. *Precision Agriculture*, v.1, n.3, p.291-300. 1999.

VAZ, C.M.P.; MANIERI, J.M.; DE MARIA, I.C.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, v.166, n.1, p.92-101. 2011.

VELLIDIS, G.; TUCKER, M.; PERRY, C.; WEN, C.; BEDNARZ, C. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *computers and electronics in agriculture*, v.61, n.1, Apr, p.44-50. 2008.

VIÑA, A.; GITELSON, A.A.; NGUY-ROBERTSON, A.L.; PENG, Y. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, v.Article in Press, n.0. 2011.

VIVEROS, H.P. *Análise do desempenho na frenagem de um cavalo mecânico e semi-reboque com suspensão mecânica e sistema abs mediante simulação em matlab/simulink*. 2010. 103 p. (Master Degree). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos - SP, 2010.

VOULODIMOS, A.S.; PATRIKAKIS, C.Z.; SIDERIDIS, A.B.; NTAFIS, V.A.; XYLOURI, E.M. A complete farm management system based on animal identification using RFID technology. *computers and electronics in agriculture*, v.70, n.2, p.380-388. 2010.

WACHS, J.; STERN, H.; BURKS, T.; ALCHANATIS, V. Multi-modal Registration Using a Combined Similarity Measure

Applications of Soft Computing. In: E. Avineri; M. Köppen; K. Dahal; Y. Sunitiyoso; R. Roy (Ed.): Springer Berlin / Heidelberg, v.52, 2009. Multi-modal Registration Using a Combined Similarity Measure

Applications of Soft Computing, p.159-168. (Advances in Soft Computing)

WANG, J.; WANG, Q.; JIN, L.; SONG, C. Independent wheel torque control of 4WD electric vehicle for differential drive assisted steering. *Mechatronics*, v.21, n.1, p.63-76. 2011.

WANG, N.; ZHANG, N.; WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. *computers and electronics in agriculture*, v.50, n.1, p.1-14. 2006.

WANG, Q.; RAO, M.; ZHOU, J. *Intelligent systems approach to conceptual design*. New York, NY, ETATS-UNIS: Wiley, v.10. 1995

WANG, X.; YANG, W.; WHEATON, A.; COOLEY, N.; MORAN, B. Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: A first step towards automated plant water stress monitoring. *computers and electronics in agriculture*, v.73, n.1, p.74-83. 2010.

WANJURA, D.F.; MAAS, S.J.; WINSLOW, J.C.; UPCHURCH, D.R. Scanned and spot measured canopy temperatures of cotton and corn. *computers and electronics in agriculture*, v.44, n.1, p.33-48. 2004.

WARK, T.; CORKE, P.; SIKKA, P.; KLINGBEIL, L.; GUO, Y.; CROSSMAN, C.; VALENCIA, P.; SWAIN, D.; BISHOP-HURLEY, G. Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks. *Ieee Pervasive Computing*, v.6, n.2, Apr-Jun, p.50-57. 2007.

WEISS, U.; BIBER, P. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor. *Robotics and Autonomous Systems*, v.59, n.5, p.265-273. 2011.

WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E.; GERBERMANN, A.H. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, v.35, n.2/3, p.105-119. 1991.

WILEY, J.C.; TURNER, R.J. Power Hop Instability of Tractors. *Agricultural Equipment Technology Conference*. Asabe. Agricultural Equipment Technology Conference: ASABE. ASABE Distinguished Lecture N. 32: 1-64 p. 2008.

WINTERS, N.; SANTOS-VICTOR, J. Information Sampling for vision-based robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, v.41, n.2-3, p.145-159. 2002.

WISMER, R.D.; LUTH, H.J. Off-Road Traction Prediction for Wheeled Vehicles. *Transactions of the ASAE*, v.17, n.1, p.8-&. 1974.

WOMACK, J.P.; JONES, D.T. *Lean thinking : banish waste and create wealth in your corporation*. New York: Free Press. 2003. 396 p. p.

WONG, J.Y. *Theory of ground vehicles*. New York ; Chichester: Wiley. 2001. 560p. p.

WONG, J.Y. *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering (Second Edition)*. Oxford: Butterworth-Heinemann, v.1. 2009. 488 p.

WOOD, B.W.; CONNER, P.J.; WORLEY, R.E. Relationship of alternate bearing intensity in pecan to fruit and canopy characteristics. *Hortscience*, v.38, n.3, Jun, p.361-366. 2003.

- XU, H.; VAN BRUSSEL, H. A behaviour-based blackboard architecture for reactive and efficient task execution of an autonomous robot. *Robotics and Autonomous Systems*, v.22, n.2, p.115-132. 1997.
- YANG, C.; ANDERSON, G.L. Airborne Videography to Identify Spatial Plant Growth Variability for Grain Sorghum. *Precision Agriculture*, v.1, n.1, p.67-79. 1999.
- YANG, C.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J.M.; ESCOBAR, D.E. Mapping grain sorghum growth and yield variations using airborne multispectral digital imagery. *Transactions of the ASAE*, v.43, n.6, Nov-Dec, p.1927-1938. 2000.
- YANG, C.H.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J.M. Comparison of QuickBird satellite imagery and airborne imagery for mapping grain sorghum yield patterns. *Precision Agriculture*, v.7, n.1, Mar, p.33-44. 2006.
- YANG, T.C. Networked control system: a brief survey. *IEEE Proceedings of Control Theory and Applications*, v.153, n.4, July, p.403-412. 2006.
- YAO, L.; LI, L.; ZHANG, M.; MINZAN, L. Automatic Guidance of Agricultural Vehicles Based on Global Positioning System. In: (Ed.). *Artificial Intelligence Applications and Innovations*, 2009. Automatic Guidance of Agricultural Vehicles Based on Global Positioning System, p.617-624
- YAVUZ, H. *Conceptual design and development of an autonomous mobile robot. [electronic resource]*. 1999. p. Thesis (Ph.D.) (Doctorate). University of Lancaster, 1999.
- YAVUZ, H. An integrated approach to the conceptual design and development of an intelligent autonomous mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, v.55, n.6, p.498-512. 2007.
- YAVUZ, H.; BRADSHAW, A. A New Conceptual Approach to the Design of Hybrid Control Architecture for Autonomous Mobile Robots. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, v.34, n.1, p.1-26. 2002.
- YE, X.; SAKAI, K.; SASAO, A.; ASADA, S.-I. Potential of airborne hyperspectral imagery to estimate fruit yield in citrus. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v.90, n.2, p.132-144. 2008.
- YILMA, B.; SEIF, M.A. Behavior-based artificial intelligence in miniature mobile robot. *Mechatronics*, v.9, n.2, p.185-206. 1999.
- YOON, R.H.; ADEL, G.T.; LUTTRELL, G.H.; CLAUS, R.O.; MURPHY, K.A. *An optical sensor for on-line analysis of phosphate minerals*. Bartow, FL.: Florida Institute of Phosphate Research, v.Pub. No. 04-045-103. 1993
- ZHANG, M.; QIN, Z.; LIU, X.; USTIN, S.L. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.4, n.4, p.295-310. 2003.
- ZHANG, N.Q.; WANG, M.H.; WANG, N. Precision agriculture - a worldwide overview. *computers and electronics in agriculture*, v.36, n.2-3, Nov, p.113-132. 2002.
- ZHANG, W.-Z.; HAN, Y.-D.; DU, H.-J. Relationship Between Canopy Temperature at Flowering Stage and Soil Water Content, Yield Components in Rice. *Rice Science*, v.14, n.1, p.67-70. 2007.

ZHANG, X.F.; ZHAO, J.P.; SUN, Q.A.; WANG, X.Y.; GUO, Y.L.; LI, J. Soil Moisture Retrieval From AMSR-E Data in Xinjiang (China): Models and Validation. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v.4, n.1, Mar, p.117-127. 2011.

ZHU, X.; MUKHOPADHYAY, S.K.; KURATA, H. A review of RFID technology and its managerial applications in different industries. *Journal of Engineering and Technology Management*, v.Article in Press. 2011.

ZORRIASSATINE, F.; WYKES, C.; PARKIN, R.; GINDY, N. A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.217, n.4, p.513-530. 2003.

ZYL, J.L.V. Canopy temperature as a water stress indicator in vines. *Viticultural and Oenological Research Institute*, v.7, n.2, p.53-60. 1986.