

ÉDILUS DE CARVALHO CASTRO PENIDO

**PULVERIZADOR AUTOPROPELIDO CONTROLADO E
MONITORADO REMOTAMENTE PARA A APLICAÇÃO
DE AGROTÓXICOS EM LAVOURAS DE TOMATE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P411p
2016

Penido, Édilus de Carvalho Castro, 1972-

Pulverizador autopropelido controlado e monitorado remotamente para aplicação de agrotóxicos em lavouras de tomate / Édilus de Carvalho Castro Penido. – Viçosa, MG, 2016. ix, 66f.: il. (algumas color.).

Inclui anexos.

Orientador: Mauri Martins Teixeira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2016.

Referências bibliográficas: f.59-64.

1. Máquinas agrícolas - Projeto e construção.
 2. Equipamento de pulverização - Projeto e construção.
 3. Inovações agrícolas. 4. Mecanização agrícola. 5. Pulverização.
- I. Teixeira, Mauri Martins, 1953-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.372

ÉDILUS DE CARVALHO CASTRO PENIDO

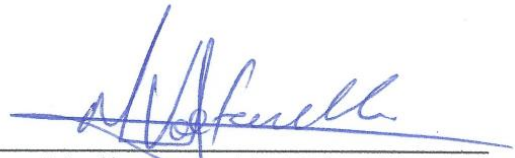
**PULVERIZADOR AUTOPROPELIDO CONTROLADO E
MONITORADO REMOTAMENTE PARA A APLICAÇÃO
DE AGROTÓXICOS EM LAVOURAS DE TOMATE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 16 de dezembro de 2016.



Luciano Baiao Vieira



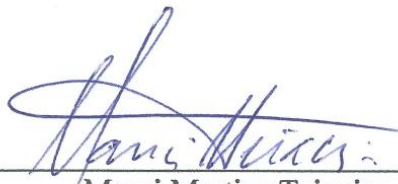
Murilo Aparecido Voltarelli



Paulo Raimundo Pinto



Paulo Marcos de Barros Monteiro
(Coorientador)



Mauri Martins Teixeira
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ter sido concluído sem que houvesse o apoio de várias pessoas em muitas situações difíceis e complicadas da minha vida.

Para não ser injusto com tanta gente que poderia não ser citada nominalmente, farei aqui apenas um agradecimento coletivo e sincero a vocês com todo o meu coração, só relacionado aqueles que cuja participação, direta ou indireta, foi totalmente decisiva para eu chegar até aqui.

Eu agradeço a minha família pela compreensão em relação a tantos momentos de ausência.

Eu agradeço ao Prof. Mauri pela orientação tão segura e pela indicação constante dos melhores caminhos a serem seguidos. Também agradeço aos Profs. Haroldo, Paulo Monteiro e Paulo Cecon por tudo que me orientaram.

Eu agradeço aos amigos, professores, funcionários e colegas do Laboratório de Mecanização do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA-UFV) pelo apoio e ajuda constantes para que eu pudesse concluir essa jornada.

Eu agradeço à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG – pela concessão do apoio que viabilizou essa pesquisa.

E por fim, mas não por último porque que Ele sempre foi o primeiro, eu a agradeço a Deus por TUDO.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE QUADROS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3 – MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 – Conjunto Local	18
3.2 – Conjunto Remoto	18
3.2.1 – Sistema de Propulsão	20
3.2.2 – Sistema de Direção	21
3.2.3 – Sistema de Controle da Pulverização	23
3.2.4 – Sistema de Monitoramento	24
3.3 – Determinação das características do protótipo	24
3.4 – Utilização do protótipo para pulverização a campo	34
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 – Caracterização do protótipo	39
4.2 – Experimento de pulverização a campo	49
5 – CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	65
A1 – Página inicial do datasheet do CI NJM2611	66
A2 – Página inicial do datasheet do CI VNH3SP30-E	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dinâmica da pulverização de agrotóxicos	2
Figura 2 – Diagrama em blocos de um controle de processo	4
Figura 3 – Sistema para guiar um trator e mantê-lo em um sulco-guia	6
Figura 4 – Sistema AURORA	6
Figura 5 – Mini-trator e as modificações realizadas	7
Figura 6 – Sistema de controle de um trator-robô	8
Figura 7 – Arquitetura de gerenciamento de vários tratores-robô	9
Figura 8 – Trator-robô comandado à distância	9
Figura 9 – Sistema de controle de um trator-robô	11
Figura 10 – Pulverizador teleoperado	12
Figura 11 – Aeromodelo telecomandado para pulverização de lavouras	12
Figura 12 – Interface do operador com imagens das câmeras e dados dos sensores	13
Figura 13 – Sistema computacional para o direcionamento de um trator teleoperado	14
Figura 14 – Controle de um trator por meio de ondas cerebrais	14
Figura 15 – Utilização de realidade aumentada para o controle de um trator-robô	15
Figura 16 – Mini-trator agrícola original	16
Figura 17 – Pulverizador pneumático motorizado	16
Figura 18 – Vistas utilizadas para o desenvolvimento do protótipo	17
Figura 19 – Sinais de RF entre o <i>Conjunto Local</i> e o <i>Conjunto Remoto</i> .	18
Figura 20 – Rádio-transmissor utilizado no <i>Conjunto Local</i>	18
Figura 21 – Sistemas de propulsão, direção, controle da pulverização e vídeo	19
Figura 22 – Rádio-receptor utilizado no <i>Conjunto Remoto</i>	19
Figura 23 – Regulador de tensão e rádio-receptor no <i>Conjunto Remoto</i>	20
Figura 24 – Módulo de acionamento do tipo liga/desliga	20
Figura 25 – Sistema de propulsão no <i>Conjunto Remoto</i> (diagrama elétrico)	21
Figura 26 – Sistema de direção no <i>Conjunto Remoto</i> (diagrama elétrico)	22
Figura 27 – Sinais para o controle da direção na saída do rádio-receptor	22
Figura 28 – Composição mecânica do sistema de direção	23
Figura 29 – Eletro-válvula com solenoide de 12 V	23
Figura 30 – Sistema de controle da pulverização no <i>Conjunto Remoto</i>	24
Figura 31 – Câmera montada no pulverizador autopropelido	24
Figura 32 – Triedro de referência do CG	26

Figura 33 – Localização do centro de gravidade (CG) num trator	27
Figura 34 – Ângulos-limite de estabilidade do protótipo	30
Figura 35 – Duto para testes de ventiladores	33
Figura 36 – Analisador de partículas a laser	37
Figura 37 – Protótipo do pulverizador autopropelido	39
Figura 38 – Detalhe do sistema de propulsão no <i>Conjunto Remoto</i>	39
Figura 39 – Acoplamento mecânico entre o motor e a caixa de marchas no protótipo	40
Figura 40 – Detalhe do sistema de direção no <i>Conjunto Remoto</i>	40
Figura 41 – Motor e sistema para esterçamento da direção do protótipo	40
Figura 42 – Eletro-válvula para o controle de saída da calda no atomizador	41
Figura 43 – Imagem captada pela câmera montada no pulverizador autopropelido	41
Figura 44 – Dimensões externas finais do protótipo	42
Figura 45 – Controlador eletrônico da velocidade de um motor de escovas	45
Figura 46 – Controle de velocidade e sentido de rotação do motor de tração	46
Figura 47 – Nível de ruído produzido pelo protótipo em função da distância	48
Figura 48 – Transmissor e receptor para sinais de vídeo – FPV	49
Figura 49 – Câmera de vídeo e monitor de alta luminosidade	49
Figura 50 – Detalhe de uma etiqueta fixada no tomateiro antes da sua remoção	50
Figura 51 – Regiões de colocação das etiquetas nos tomateiros	52
Figura 52 – Curva de calibração para o espectrofotômetro	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices volumétricos para diferentes volumes de pulverização	34
Tabela 2 – Densidade de gotas em função do tipo do fitossanitário	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dimensões externas, configurações geométricas e índices do protótipo	43
Quadro 2 – Características ponderais do protótipo	43
Quadro 3 – Raio de giro e espaço de giro à direita e à esquerda do protótipo	43
Quadro 4 – Ângulos-limite de estabilidade estática e operacional do protótipo	44
Quadro 5 – Tempo do protótipo para percorrer uma distância de 30 metros	44
Quadro 6 – Correntes e potências nas partes alimentadas pela bateria BT1	47
Quadro 7 – Cobertura (%) encontrada na análise das etiquetas	51
Quadro 8 – Densidade (nº de gotas por cm ²) encontrada na análise das etiquetas	51
Quadro 9 – Medidas descritivas para os dados de cobertura e densidade de gotas	51
Quadro 10 – Área (cm ²) dos folíolos coletados	53
Quadro 11 – Absorbância das soluções de lavagem dos folíolos	53
Quadro 12 – Concentração (mg mL ⁻¹) das soluções de lavagem dos folíolos	54
Quadro 13 – Deposição (µg cm ⁻²) de corante alimentício nos folíolos	55
Quadro 14 – Medidas descritivas para os dados de deposição	55
Quadro 15 – Volume pulverizado (%) em função do diâmetro das gotas	56
Quadro 16 – Parâmetros para avaliação da pulverização	56

RESUMO

PENIDO, Édilus de Carvalho Castro, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2016. **Pulverizador autopropelido controlado e monitorado remotamente para aplicação de agrotóxicos em lavouras de tomate.** Orientador: Mauri Martins Teixeira. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Paulo Marcos de Barros Monteiro e Paulo Roberto Cecon.

O tomateiro (*Solanum lycopersicum*) é uma das principais culturas no Brasil. No seu cultivo em larga escala, são aplicados agrotóxicos sobre a planta para impedir a ação direta ou indireta de formas de vida animal ou vegetal, visando uma maior produtividade e uma melhor qualidade do fruto. Os agrotóxicos utilizados podem, no entanto, afetar a saúde dos trabalhadores envolvidos na atividade caso sejam usados incorretamente. Sendo assim, foi desenvolvido um protótipo de pulverizador autopropelido controlado e monitorado à distância, via sinais de rádio, para ser utilizado em lavouras de tomate, minimizando com isso o contato dos trabalhadores com as substâncias químicas utilizadas na tarefa de pulverização. Esse protótipo é formado basicamente por um mini-trator agrícola, por um pulverizador pneumático motorizado (atomizador) e por um conjunto de sensores e atuadores eletrônicos e mecânicos, que permitem o comando remoto do conjunto e a visualização das imagens captadas, por uma câmera de vídeo, em um tablet. Após o desenvolvimento, as principais características do protótipo foram levantadas e ele foi utilizado para pulverizar dez plantas numa lavoura de tomate, sendo observados sete pontos distintos em cada uma delas (quatro pontos na região mais externa do dossel, um ponto no caule central da planta e dois pontos intermediários entre essas duas regiões). Os resultados dessa atividade foram analisados estatisticamente, obtendo-se os seguintes valores para os coeficientes de variação: 15,13% na cobertura da pulverização, 18,70% na densidade de gotas e 16,68% na deposição de produto nos folíolos. Com isso, concluiu-se que o desenvolvimento de um protótipo de pulverizador autopropelido controlado e monitorado remotamente é tecnicamente viável.

ABSTRACT

PENIDO, Édilus de Carvalho Castro, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, December 2016. **Self-propelled sprayer controlled and monitored remotely for application of pesticides in tomato crops.** Adviser: Mauri Martins Teixeira. Co-advisers: Haroldo Carlos Fernandes, Paulo Marcos de Barros Monteiro and Paulo Roberto Cecon.

The tomato (*Solanum lycopersicum*) is one of the main crops in Brazil. In his large-scale farming, pesticides are applied on the plant to prevent the direct or indirect action of harmful forms of life (animals or plants), aiming at higher productivity and better quality fruit. The products used may, however, affect the health of workers involved in the activity if used incorrectly. Therefore, a prototype of a self-propelled sprayer, remotely controlled and monitored via radio signals, was developed to be used in tomato crops to minimize the contact of workers to the chemical substance used in the spraying task. This prototype is basically composed by an agricultural mini-tractor, a motorized pneumatic sprayer (atomizer) and a set of electronic and mechanical sensors and actuators, allowing remote control of the set and the display of video images captured on a tablet. After the development, with the main features of the prototype identified, it was used for spraying ten plants in tomato crops, observed seven distinct points in each (four points in the outer region of the canopy, a point on the central stem of the plant and two intermediate points between these two regions). The results of this activity were statistically analyzed, yielding the following values for the coefficients of variation: 15.13% on spray coverage, 18,70% in the droplet density and 16.68% in the product deposition in leaves. Thus, it was concluded that the development of a self-propelled sprayer prototype controlled and monitored remotely is technically viable.

1 – INTRODUÇÃO

O tomateiro (*Solanum lycopersicum*) é uma das principais culturas no Brasil devido ao seu elevado valor socioeconômico agregado. Segundo dados do IBGE (2016), foram plantados 62.096 hectares de tomate em todo território nacional durante 2015, com uma produção de 4.145.553 toneladas e um rendimento médio de 66.810 kg por hectare.

Para Ferreira; Freitas; Lazzari (2004), "o valor comercial do tomate de mesa é definido pelas características de identidade e qualidade presentes no fruto", que são atributos que o consumidor consciente ou inconscientemente estima que ele deva possuir.

De acordo com pesquisas realizadas (MELO; VILELA, 2005; PICANÇO *et al.*, 2004; GRAVENA; BENVENGA, 2003; PESSINI, 2003), o tomateiro e seus frutos estão sujeitos ao ataque de várias doenças e pragas (insetos, bactérias, fungos, plantas daninhas, etc...) que interferem diretamente nessa qualidade (tanto econômica quanto nutricional) esperada para o produto. Sendo assim, são aplicados agrotóxicos sobre a planta visando garantir uma maior produtividade com um grau satisfatório de qualidade ao impedir a ação direta ou indireta de formas de vida animal ou vegetal que lhe são prejudiciais (NAKANO, 1999).

A dinâmica do processo de pulverização de um defensivo até o seu efeito final está sujeita à interferência de vários fatores, como mostrado na Figura 1 (CHAIM, 2012). Um dos pontos que pode ser destacado, relacionado com as condições operacionais da pulverização e que vem sendo pesquisado há vários anos, é o efeito da exposição dos trabalhadores aos agrotóxicos durante a sua aplicação.

Nesse sentido, London *et al.* (1998) identificaram alguns efeitos adversos em aplicadores de defensivos relacionados com o exercício das suas atividades, como: a diminuição das defesas imunológicas, anemia, impotência sexual masculina, cefaleia, insônia, alterações da pressão arterial, alterações do humor e distúrbios do comportamento, como surtos psicóticos.

Keifer; Mahurin (1997) realizaram estudos para demonstrar as consequências neurológicas da exposição ocupacional aos agrotóxicos, caracterizando vários sintomas severos indicadores de comprometimento das funções nervosas, além de relacionar sinais menos graves como dor de cabeça, tontura, náusea, vômito e suor excessivo.

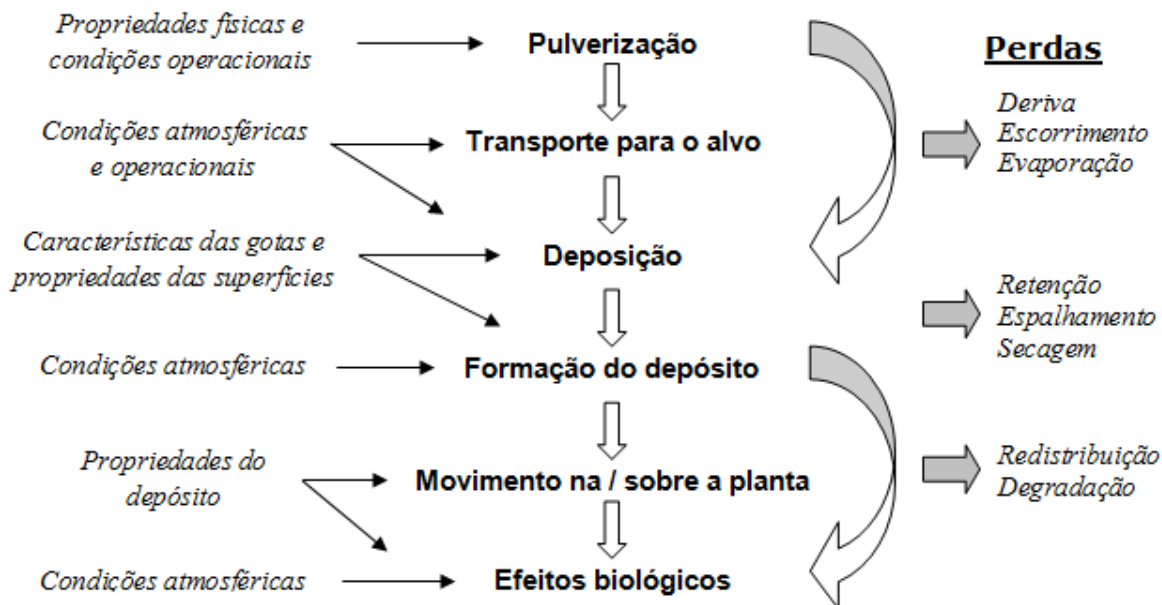


Figura 1 – Dinâmica da pulverização de agrotóxicos (CHAIM, 2012).

Bhatt; Elias; Mandoki (1999) identificaram que o manejo de defensivos pode se relacionar com o aumento do risco de doenças degenerativas neurológicas, principalmente a Doença de Parkinson.

Em relação à plantação específica do tomate, Araújo; Nogueira; Augusto (2000) realizaram uma pesquisa no Estado de Pernambuco com pessoas envolvidas com a aplicação de agrotóxicos para essa cultura e verificaram que 70% das mulheres entrevistadas sofreram aborto espontâneo, além de constatarem que sintomas como tontura, a náusea e dor de cabeça eram comuns nos outros trabalhadores, que também reclamaram de dores nas articulações e formigamento nos membros superiores.

Os problemas de execução da legislação vigente sobre o tema, a falta ou inadequação da assistência técnica aos trabalhadores rurais e a própria atitude desses profissionais, que desconhecem ou se opõem ao uso de equipamentos de proteção individual (EPI's), tendem a agravar ainda mais essa contaminação (OLIVEIRA-SILVA; MEYER; MOREIRA, 2000).

Com base nesses pontos observados, a proposição de um sistema de mecanização agrícola que minimizasse a exposição ocupacional aos agrotóxicos nas lavouras de tomate de mesa poderia propiciar uma melhor qualidade de vida atual e futura para os trabalhadores que tem contato com estes produtos ao diminuir a possibilidade de contaminação.

Considerando então a relevância desse tema, objetivou-se com este trabalho propor o desenvolvimento de um pulverizador autopropelido, controlado e monitorado remotamente por sinais de rádio, para ser utilizado na pulverização em lavouras de tomate com a função de minimizar o contato dos operadores com os agrotóxicos durante a aplicação.

Sendo assim, os objetivos específicos foram:

- Projetar um protótipo de pulverizador autopropelido controlado e observado remotamente;
- Desenvolver e construir os sistemas de propulsão, de direção e de controle da pulverização do protótipo com comando à distância;
- Adaptar um sistema de monitoração remota com uma câmera de vídeo no protótipo;
- Identificar as principais características dimensionais e ponderais do protótipo desenvolvido;
- Determinar os limites de estabilidade, os parâmetros de manobrabilidade, a capacidade de trabalho e as características funcionais (mecânicas e eletroeletrônicas), do protótipo desenvolvido;
- Avaliar o desempenho do protótipo para a pulverização em tomateiros em condições de campo.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Silveira; Santos (2009), controlar um processo relaciona-se com as ações realizadas e as medidas tomadas para fiscalizá-lo, supervisioná-lo ou mantê-lo em determinadas condições desejadas, respondendo adequadamente às interferências externas e/ou às alterações internas.

Uma das maneiras de realizar o controle de um processo é utilizar um dispositivo controlador eletrônico programável que exercerá intervenções apropriadas sobre esse sistema via elementos de saída chamados de atuadores.

As características dessa intervenção (intensidade, momento, sequência, etc...) estarão relacionadas diretamente com as condições do processo, identificadas por elementos de entrada chamados de sensores e com o comportamento esperado para todo o conjunto naquelas circunstâncias, expresso em um programa desenvolvido especificamente para este fim (PENIDO, 2013). Na Figura 2 é apresentado então um diagrama de blocos clássico simbolizando a relação entre o controlador, os sensores e os atuadores para o controle de um processo.

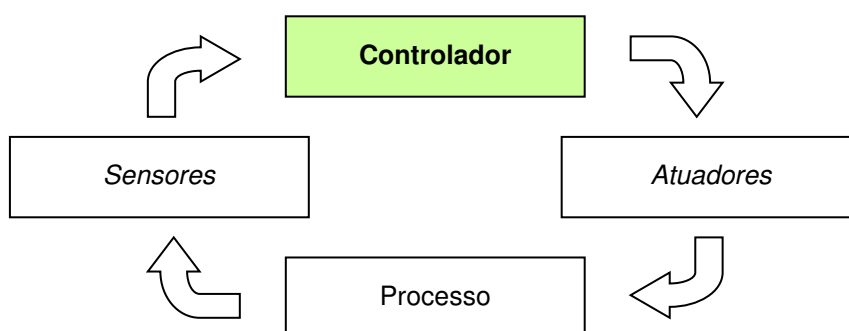


Figura 2 – Diagrama em blocos de um controle de processo (SILVEIRA; SANTOS, 2009).

Saraiva; Cugnasca (2006) consideraram que a utilização de sistemas eletrônicos em atividades agrícolas intensificou-se no final do século XX, baseada principalmente no desenvolvimento da microeletrônica e no advento dos microcontroladores, que são dispositivos cujo modo de comportamento pode ser estabelecimento por meio de uma linguagem de programação com sintaxe e comandos próprios (MIYADAIRA, 2012).

Eles já foram utilizados em vários projetos de máquinas agrícolas para comandar etapas de sistemas maiores. Como exemplos desses empregos, temos:

- O controle da rotação do eixo traseiro de um trator para evitar a patinagem das suas rodas (RAHEMAN; JHA, 2007)

- A coleta de informações sobre a localização de um trator e o seu envio para uma central via uma rede Zigbee, permitindo que essa posição seja exibida em tempo real numa página da Internet (WATTHANAWISUTH *et al.*, 2010)
- O sistema para estimar a localização geográfica de um trator baseado na Lógica Fuzzy (PALIPANA *et al.*, 2012)
- O sistema para controlar toda a parte hidráulica dos implementos de um trator (MUKHOPADHYAY; SEN GUPTA; HOWARTH, 2008)
- O sensor de velocidade para o controle do deslocamento e direção de tratores agrícolas (PRANAV; TEWARI; PANDEY, 2015)
- O sistema para gerenciar a aplicação de defensivos com taxa variável em função da localização geográfica precisa das plantas (TEWARI, 2015)
- O sistema eletro-hidráulico para a mudança das marchas de tratores baseado em microcontroladores com a tecnologia DSP (ZHIQIANG; ZHILI, 2015)

No caso específico da orientação de uma máquina agrícola para a realização de atividades a campo, Wilson (2000) considerou que as pesquisas para o desenvolvimento de sistemas eletrônicos de controle podem ser agrupadas em duas categorias:

- Orientação baseada no conhecimento e/ou percepção da área onde a atividade será realizada, obtidos por meio de técnicas de mapeamento, fotos de satélite e/ou visão computacional, por exemplo;
- Orientação baseada em linhas ou pontos de sinalização espalhados pelo campo, como cabos-guia ou rádio-balizadores, por exemplo.

Historicamente, as pesquisas sobre os sistemas eletrônicos para a orientação de máquinas agrícolas se concentraram mais na primeira categoria por ela emular melhor a ação de um operador humano (WILSON, 2000), sendo que eles também podem contribuir para a diminuição de erros humanos, a redução do consumo de combustível e um melhor uso dos equipamentos (REHMAN *et al.*, 2016).

No trabalho de Harries; Ambler (1981), há a descrição do desenvolvimento e da implementação de um aparato eletrônico e mecânico capaz de guiar um trator agrícola em atividades de aração do solo, mantendo-o em um sulco-guia (Figura 3). De acordo com os autores, os resultados obtidos indicaram que o sistema é viável, mas seriam necessárias mais pesquisas para que o conjunto alcançasse um nível de confiabilidade satisfatório.



Figura 3 – Sistema para guiar um trator e mantê-lo em um sulco-guia durante uma operação com um arado (HARRIES; AMBLER, 1981).

Mandow *et al.* (1996) desenvolveram uma máquina agrícola denominada AURORA (Figura 4), que foi concebida para “substituir o difícil e insalubre trabalho humano dentro de casas de vegetação”. Esse sistema, composto por sensores e atuadores montados em uma base móvel, foi projetado tanto para ter uma navegação autônoma quanto ser guiado remotamente por operador humano. Segundo os autores, a máquina foi testada em diferentes casas de vegetação e obteve bons resultados em tarefas de pulverização.

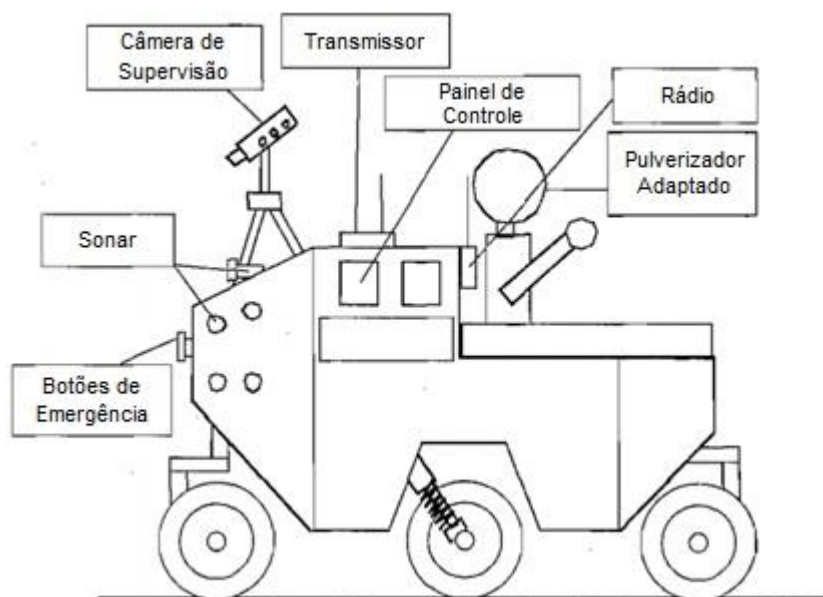


Figura 4 – Sistema AURORA (MANDOW *et al.*, 1996).

Em seu trabalho, Blackmore *et al.* (2004) relataram as modificações que foram realizadas num trator agrícola de pequenas dimensões, modelo Hakotrac 3000 (Figura 5a), dotando-o de dispositivos e equipamentos eletrônicos (Figura 5b) para que ele fosse capaz de seguir automaticamente uma rota previamente definida de maneira determinística e com uma razoável precisão. Apesar dos resultados satisfatórios nessa atividade, a máquina agrícola não tinha a capacidade de desviar de obstáculos não previstos inicialmente em seu programa de controle.

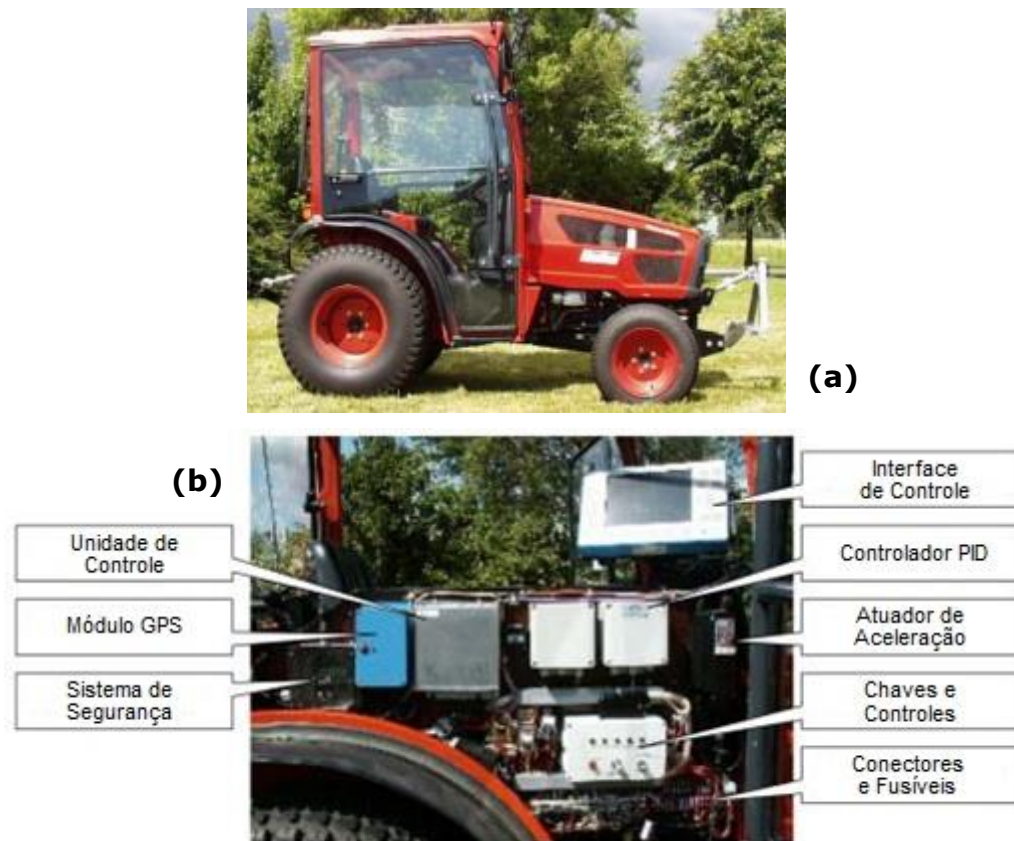


Figura 5 – Mini-trator (a) e as modificações (b) realizadas (BLACKMORE *et al.*, 2004).

Mais recentemente, o trabalho de Zhang; Noguchi; Yang (2016) analisou o desenvolvimento de um sistema de controle para dois tratores sem operadores (um líder e o outro, um seguidor), capaz de orientá-los automaticamente para trabalhos a campo, sendo que cada um desses tratores-robô é complementarmente independente e poderia ser usado isoladamente em outras tarefas agrícolas (Figura 6).

O sistema de controle de cada trator-robô é formado pelos seguintes elementos com as suas respectivas funções:

- GPS (*Global Positioning System*): Determinação da posição geográfica (latitude e longitude) do trator

- IMU (*Inertial Measurement Unit*): Determinação das coordenadas espaciais (ângulos de rotação em relação a um sistema ortogonal de três eixos) do trator
- PDA (*Personal Digital Assistant*): Configuração e atualização do GPS
- Scanner Laser: Identificação de obstáculos à frente do trator.
- PC (*Personal Computer*): Computador que executa o programa de controle de todo o sistema
- CAN (*Controler Area Network*): Rede local de comunicação entre o PC e os outros sensores e atuadores eletrônicos do trator
- Bluetooth: Rede sem fio para comunicação entre os dois tratores (líder e seguidor)

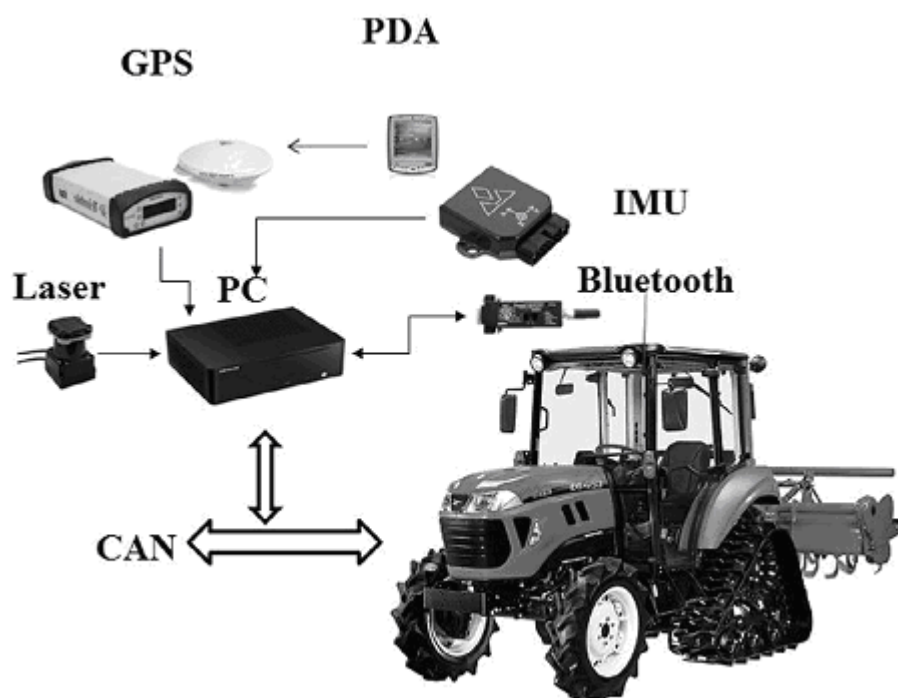


Figura 6 – Sistema de controle de um trator-robô (ZHANG; NOGUCHI; YANG, 2016).

Os resultados obtidos inicialmente nas simulações e confirmados posteriormente em experimentos de campo indicaram que os dois tratores podem operar seguramente na mesma área porque o erro médio de navegação foi inferior a 0,04 m no seu posicionamento.

Além disso, o tempo necessário para se cobrir toda uma área com a utilização simultânea de dois tratores mostrou-se significativamente melhor (95,1% mais eficiente) em relação à mesma operação com apenas um trator, já que houve uma diminuição dos períodos ociosos durante as manobras nos quais as máquinas não estariam efetivamente realizando um trabalho.

Outra pesquisa nessa área foi conduzida por Ball *et al.* (2015). Ela envolveu o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento (Figura 7) que coordena as atividades de pequenos tratores-robô (Figura 8) via sinais de rádio para a pulverização de fitossanitários contra plantas-daninhas em grandes áreas,

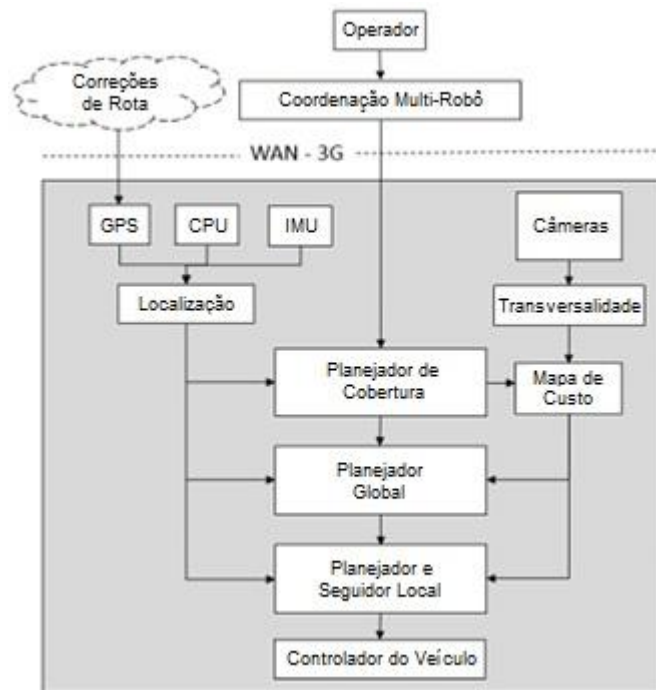


Figura 7 – Arquitetura de gerenciamento de vários tratores-robô (BALL *et al.*, 2015).

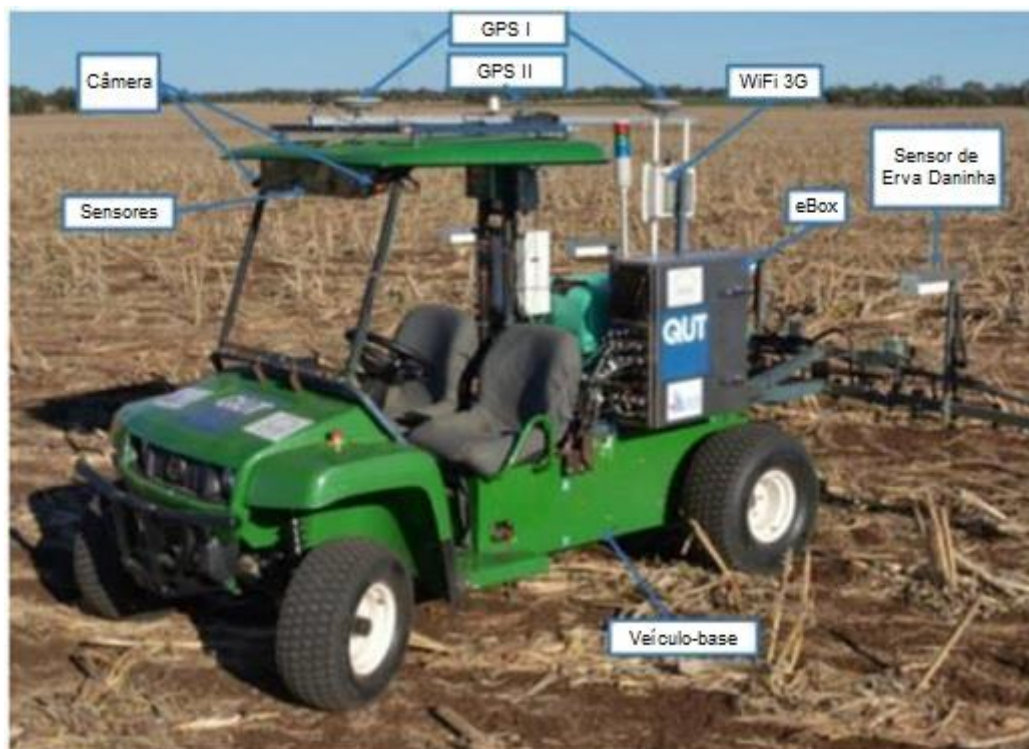


Figura 8 – Trator-robô comandado à distância (BALL *et al.*, 2015).

A utilização de máquinas agrícolas com dimensões reduzidas neste tipo de operação propicia, segundo os autores, uma redução na compactação do solo, já que elas são bem menores que os tratores usuais, além de uma melhor manobrabilidade para desviar-se de obstáculos.

Os resultados oriundos de simulações indicaram que doze tratores-robô conseguiriam realizar pulverizações em uma área de 55 hectares durante um período de duas horas. Em relação aos dados obtidos num experimento real, um trator-robô desviou-se de três obstáculos quando foi conduzido pelo sistema de gerenciamento em uma área de seis hectares. Ele deixou de passar sobre 2,6% e sobrepôs 9,7% desse local.

A interação entre vários veículos agindo conjuntamente para a realização de atividades agrícolas também é o foco da pesquisa do projeto RHEA (*Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture*), conduzido por 15 entidades e fundações de 8 países diferentes da Europa (PÉREZ-RUIZ *et al.*, 2015; RIBEIRO *et al.*, 2015; CONESA-MUÑOZ *et al.*, 2015; FERNÁNDEZ-QUINTANILLA *et al.*, 2015).

A base desse projeto é o desenvolvimento de uma nova geração de sistemas robóticos automáticos, que possam fazer o controle físico e químico de plantas-daninhas. Uma frota heterogênea de pequenos veículos sem condutores terrestres, denominados UGV (*Unmanned Ground Vehicles*), e aéreos, denominados UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), equipados com sensores avançados, seria então capaz de determinar a melhor escolha para eliminação das pragas a partir de comunicações com uma central de comando.

Além dessa capacidade de direção, os subsistemas eletrônicos envolvidos, como os de posicionamento (GPS - *Global Position System*), os de verificação do crescimento das plantas ("*crop sensors*") e os aplicadores controlados de produtos (VRT - *Variable Rate Technology*), também contribuem para evitar os problemas de sobreposição de faixas, mesmo em terrenos muito irregulares, e de aplicação não seletiva de fertilizantes e ou fitossanitários em toda a lavoura.

Para que essas atividades sejam realizadas a contento pelo sistema geral de controle dos tratores, são necessários muitos sensores, colocados em diferentes pontos da máquina (Figura 9). Com eles, é possível a tomada de decisão a partir da medição de uma série de parâmetros enquanto uma operação agrícola está sendo realizada (GONZALEZ-DE-SOTO *et al.*, 2015).

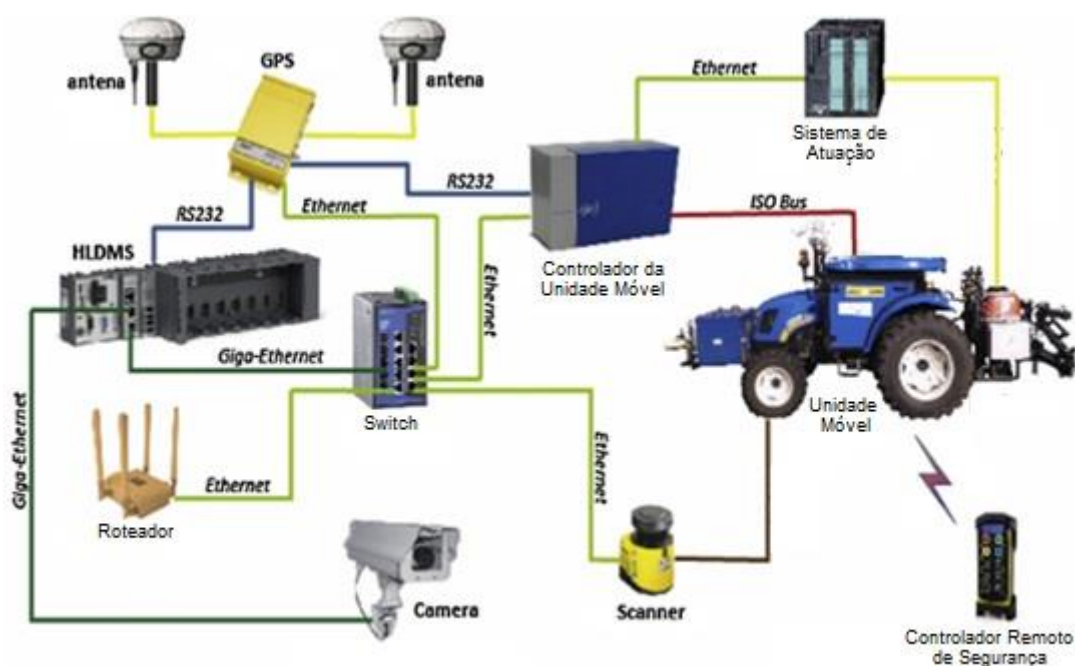


Figura 9 – Sistema de controle de um trator-robô (GONZALEZ-DE-SOTO *et al.*, 2015).

Apesar das muitas pesquisas nessa área de tratores autônomos, Murakami *et al.* (2008) consideraram que a comercialização em larga escala deste tipo de solução ainda está distante devido aos custos envolvidos. Para eles, o desenvolvimento de veículos operados remotamente é interessante por envolver um menor investimento e por manter as pessoas na supervisão das atividades, já que é “um desafio imenso projetar sistemas capazes lidar com situações imprevisíveis”.

A teleoperação ou operação remota de um sistema pode ser definida como a extensão dos sentidos e da capacidade humana de manipulação com sensores e atuadores artificiais, de tal forma que um operador possa interferir à distância nesse sistema via um meio de comunicação (SHERIDAN, 1989).

As pesquisas para o desenvolvimento de máquinas agrícolas dentro desse conceito já são realizadas há várias décadas. Widden; Blair (1972), por exemplo, que consideraram que os tratores guiados remotamente são particularmente indicados para atividades onde os operadores estão expostos a materiais tóxicos como no caso da pulverização de fitossanitários, relatam trabalhos anteriores sobre tratores operados por sinais de rádio em 1957, 1960 e 1966.

Stentz *et al.* (2002), que desenvolveram um sistema de controle e supervisão à distância para tratores agrícolas semiautônomos adaptados para a pulverização de fitossanitários em plantações de laranja (Figura 10), consideraram que a contribuição de

um operador humano é muito significativa na “classificação e na indicação de cursos de ação quando os sensores e equipamentos da máquina detectam um problema ou uma condição não esperada”.



Figura 10 – Pulverizador teleoperado (STENTZ *et al.*, 2002).

Além dos tratores, outras máquinas telecomandadas podem ser utilizadas em tarefas de pulverização. Rasi (2004), por exemplo, desenvolveu um sistema de aplicação de fitossanitários em lavouras baseado em um aeromodelo de asa fixa (Figura 11).

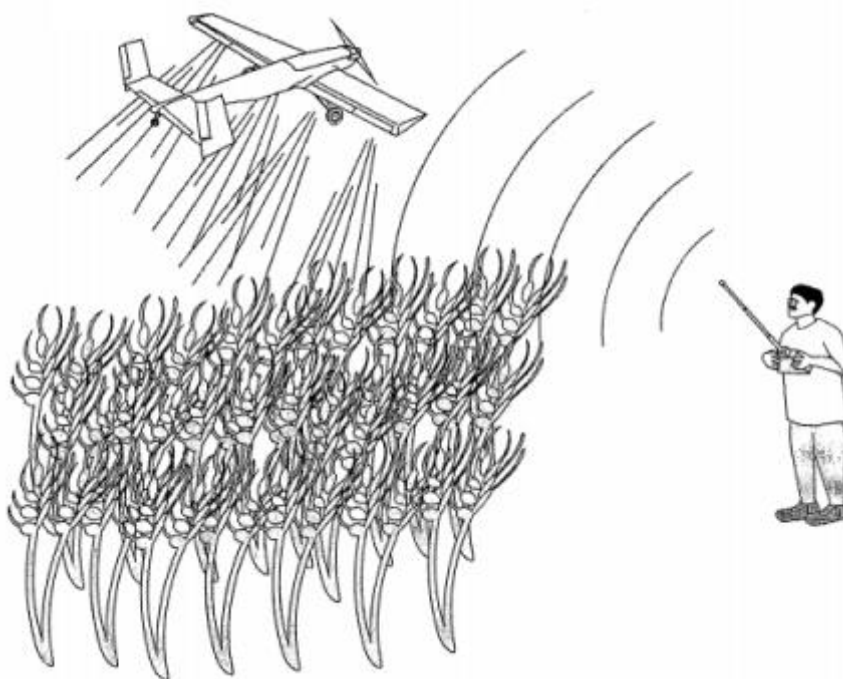


Figura 11 – Aeromodelo telecomandado para pulverização de lavouras (RASI, 2004).

Os sistemas computacionais também podem contribuir para uma utilização mais eficiente dos equipamentos agrícolas teleoperados. Danielsson (2008), por exemplo, desenvolveu uma interface gráfica para o operador onde são mostrados dados atualizados fornecidos pelos sensores montados em um trator, como a velocidade de deslocamento e o ângulo de esterçamento das rodas, conjuntamente com a imagem captada por câmeras (Figura 12). Assim, segundo o autor, há uma diminuição dos riscos de colisão e uma melhoria na dirigibilidade da máquina.



Figura 12 – Interface do operador com imagens das câmeras e dados dos sensores (DANIELSSON, 2008).

Já a pesquisa de Murakami *et al.* (2008) envolveu o desenvolvimento de um sistema computacional que combina as imagens captadas por câmeras montadas num trator com outras obtidas por meio do Google Maps (Figura 13). De acordo com os autores, essa combinação seria muito útil para a compreensão das condições reais do campo pelo operador da máquina agrícola.

Num outro trabalho também sobre esse mesmo sistema, os resultados obtidos na pesquisa de Steffen; Will; Murakami (2008) indicaram, segundo os autores, a viabilidade técnica de um operador telecontrolar um trator agrícola em tempo real a mais de 10.000 km de distância do local onde ele se encontra via Internet.

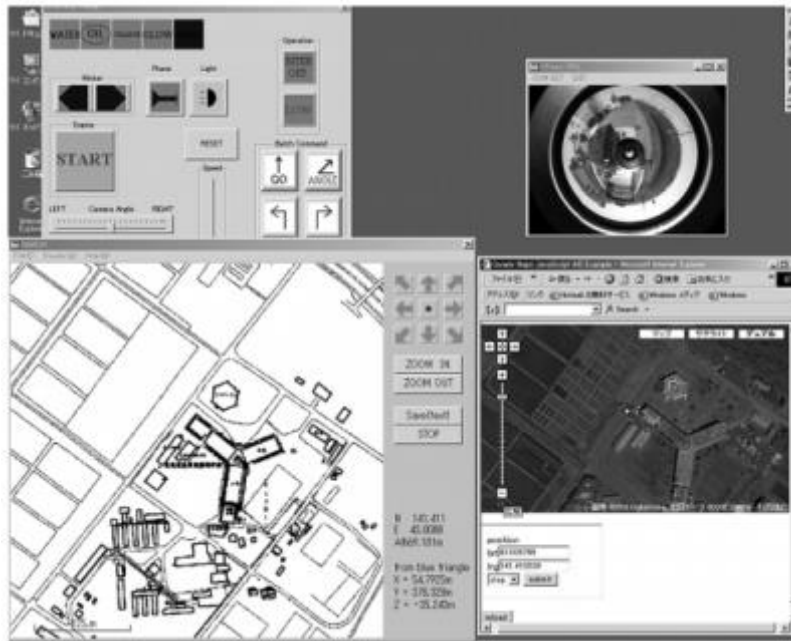


Figura 13 – Sistema computacional para o direcionamento de um trator teleoperado (MURAKAMI *et al.*, 2008).

Mais recentemente, Gomez-Gil *et al.* (2011) desenvolveram um sistema de controle capaz de captar as ondas cerebrais eletromagnéticas de um operador, por meio de um aparato eletrônico usado na sua cabeça, e utilizá-las para guiar um trator agrícola em atividades no campo (Figura 14).

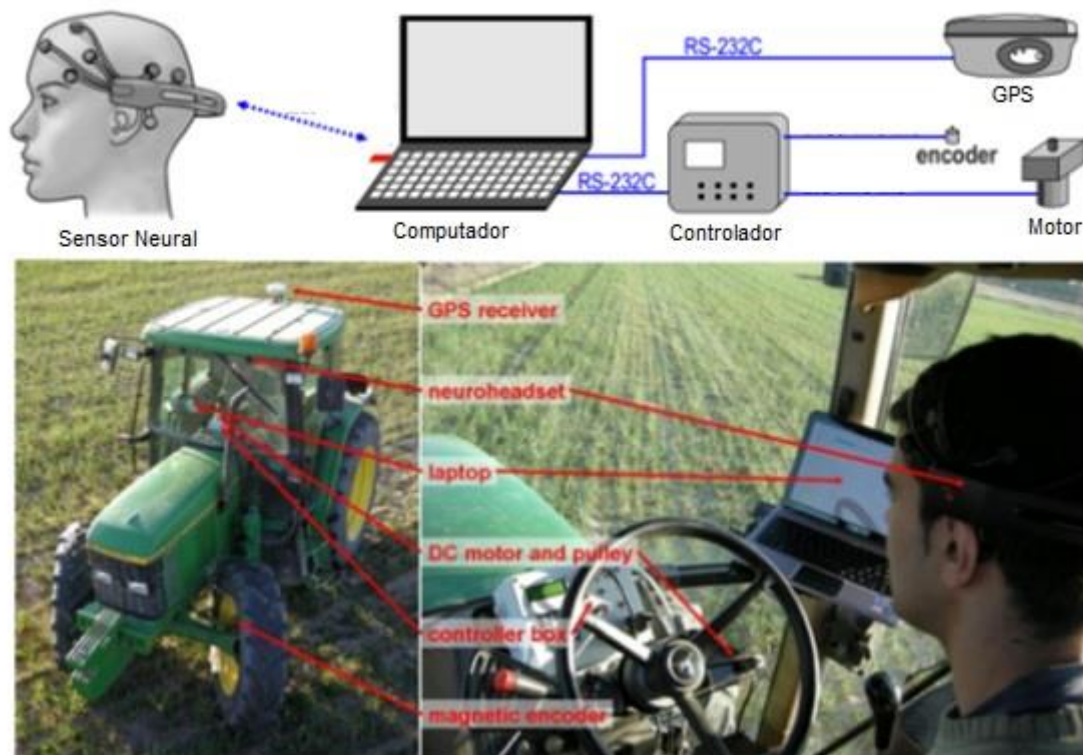


Figura 14 – Controle de um trator por meio de ondas cerebrais (GOMEZ-GIL *et al.*, 2011).

No sistema proposto por Adamides *et al.* (2014), há a combinação de imagens captadas por câmeras com elementos computacionais, produzindo um efeito de realidade aumentada. Assim, um operador utilizando um óculos e um controlador adequados (Figura 15a) poderia controlar um pulverizador autopropelido (Figura 15b) em atividades no campo de forma remota (Figura 15c). Segundo os autores, os resultados obtidos indicaram um menor número de colisões em comparação às situações onde não havia os recursos da realidade aumentada.

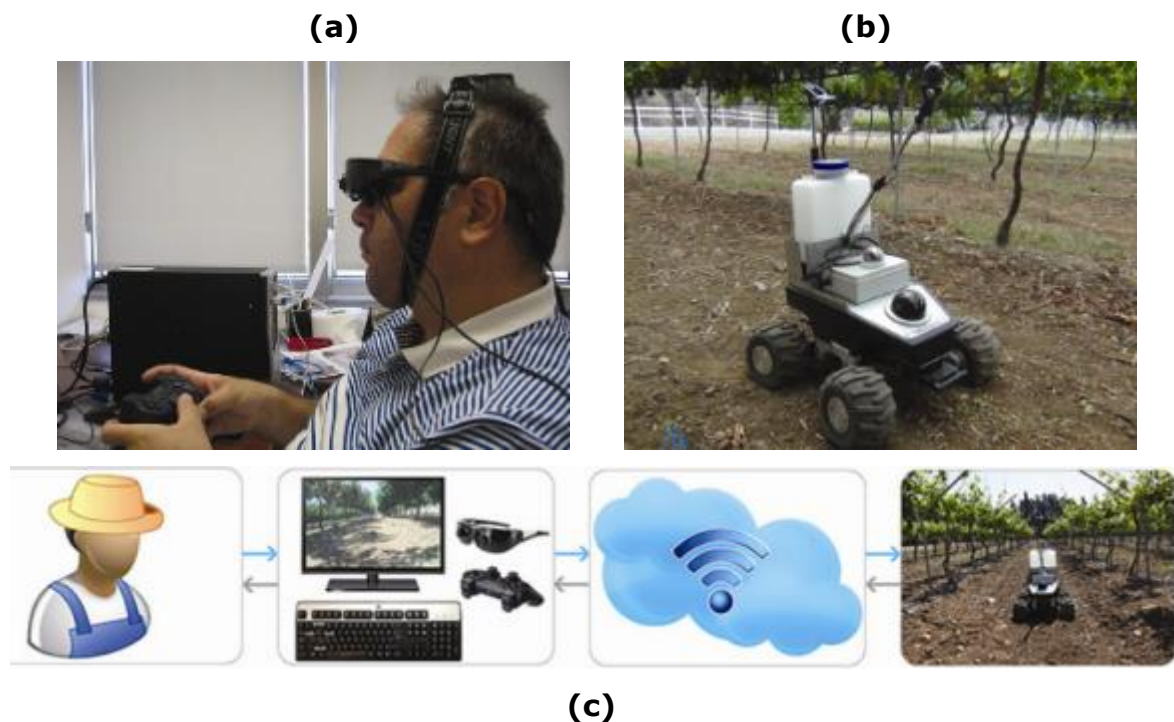


Figura 15 – Utilização de realidade aumentada (a) para o controle de um trator-robô (b) via sinais de rádio (c) (ADAMIDES *et al.*, 2014).

3 – MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento e os testes do protótipo do pulverizador autopropelido foram realizados nas dependências do Laboratório de Mecanização do Departamento de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Olericultura (Horta Velha), ambos pertencentes à Universidade Federal de Viçosa (UFV) e localizados no campus de Viçosa – MG.

A base desse protótipo foi um mini-trator agrícola (Figura 16), modificado para ser operado e observado remotamente por uma pessoa através de um sistema eletrônico/ mecânico de controle sem fio, cujo funcionamento é baseado na transmissão e na recepção de sinais de rádio. Esse sistema também é capaz de controlar a emissão do jorro de um pulverizador pneumático motorizado (Figura 17), também chamado de "atomizador", modelo Guarany 18 L, que foi acoplado ao mini-trator.



Figura 16 – Mini-trator agrícola original (RODRIGUES, 2005).



Figura 17 – Pulverizador pneumático motorizado (GUARANY, 2016).

As vistas que foram utilizadas para o desenvolvimento do protótipo e que ajudaram nas adaptações do mini-trator para a sua conversão em um pulverizador autopropelido podem ser observadas na Figura 18.

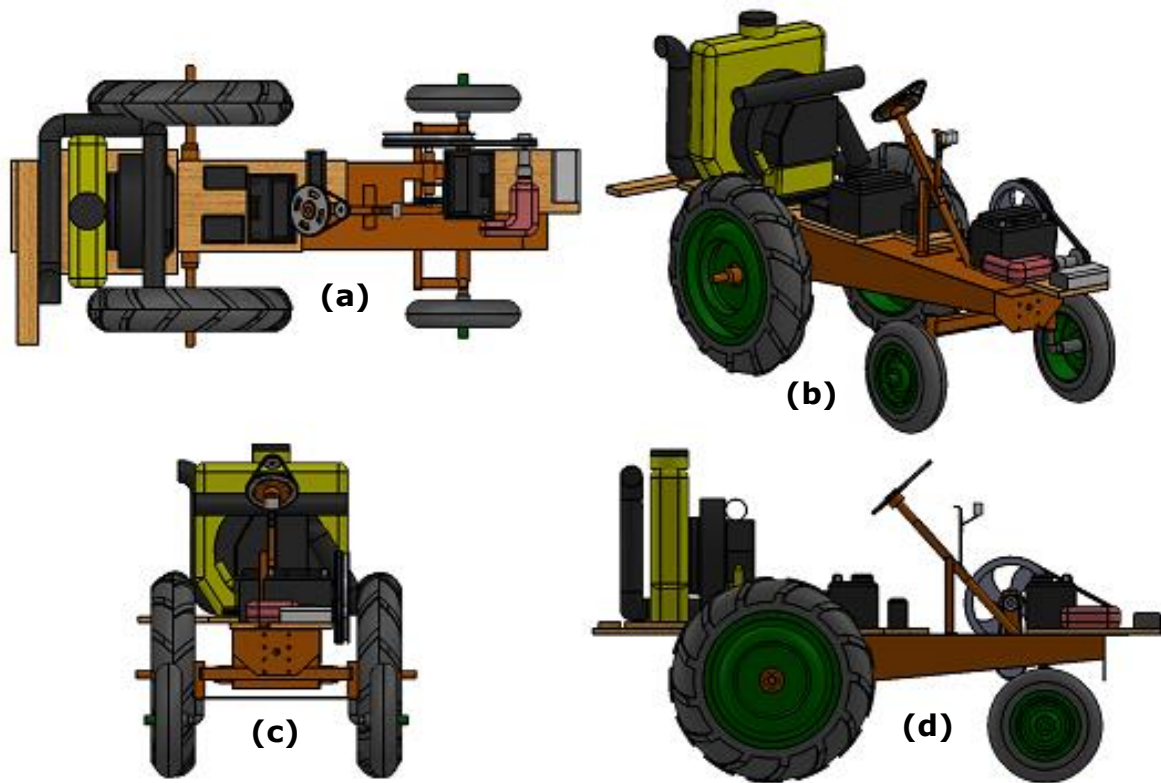


Figura 18 – Vistas utilizadas para o desenvolvimento do protótipo do pulverizador autopropelido: superior (a); perspectiva (b); frontal (c); lateral esquerda (d).

Visando então uma melhor organização das partes de acordo com as funções que elas desempenham no sistema de controle, os equipamentos e os dispositivos que o compõem foram agrupados em dois conjuntos, denominados *Conjunto Local* e *Conjunto Remoto* (Figura 19), com as seguintes características principais:

I – Conjunto Local: Utilizado pelo operador para guiar à distância o pulverizador autopropelido e exibir as imagens captadas pela câmera de vídeo nele instalada.

II – Conjunto Remoto: Formado pelos dispositivos mecânicos e componentes eletrônicos montados no pulverizador autopropelido que são responsáveis por controlar a mobilidade, a direção e a emissão do jorro do atomizador a partir dos sinais de radiofrequência (RF) recebidos do *Conjunto Local*, bem como enviar para esse conjunto as imagens captadas pela câmera de vídeo.

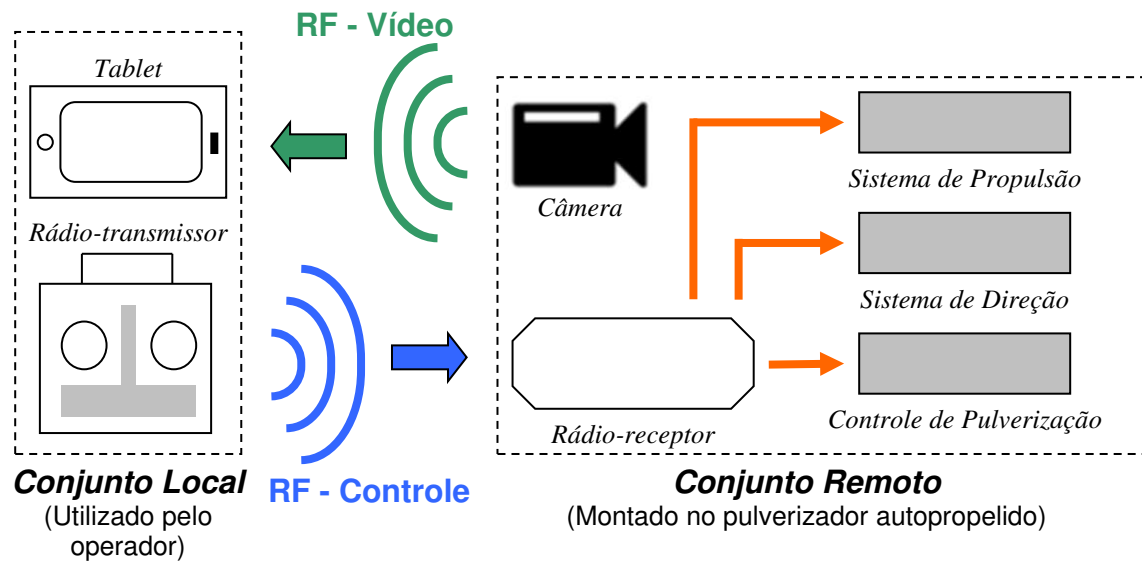


Figura 19 – Sinais de RF entre o *Conjunto Local* e o *Conjunto Remoto*.

3.1 – Conjunto Local

O *Conjunto Local* é constituído basicamente por um rádio-transmissor de sinais de controle, modelo TURNIGY 6X FHSS (Figura 20), e um tablet com tela de 7" e conectividade WiFi nos padrões IEEE 802.11a/b/g, modelo Positivo T710.



Figura 20 – Rádio-transmissor utilizado no *Conjunto Local* (TURNIGY, 2016).

3.2 – Conjunto Remoto

O *Conjunto Remoto* é constituído basicamente por quatro sistemas: propulsão, direção, controle da pulverização e monitoramento (Figura 21).

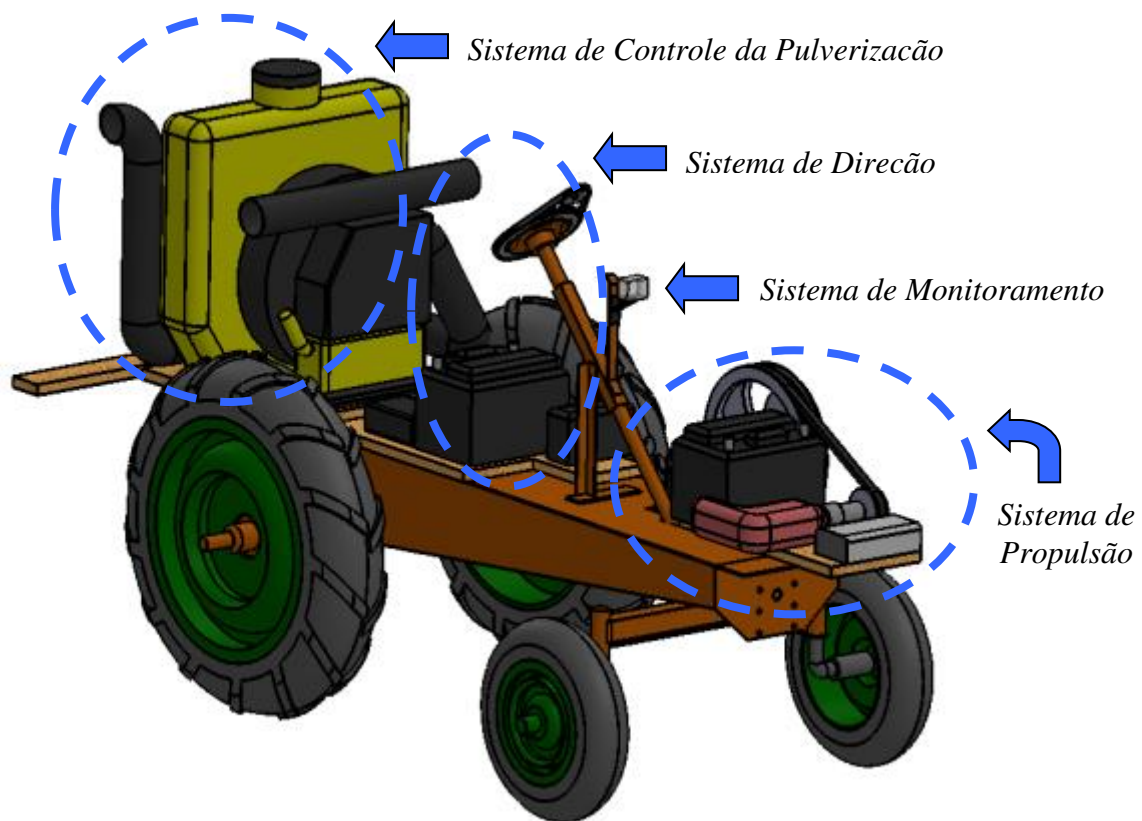


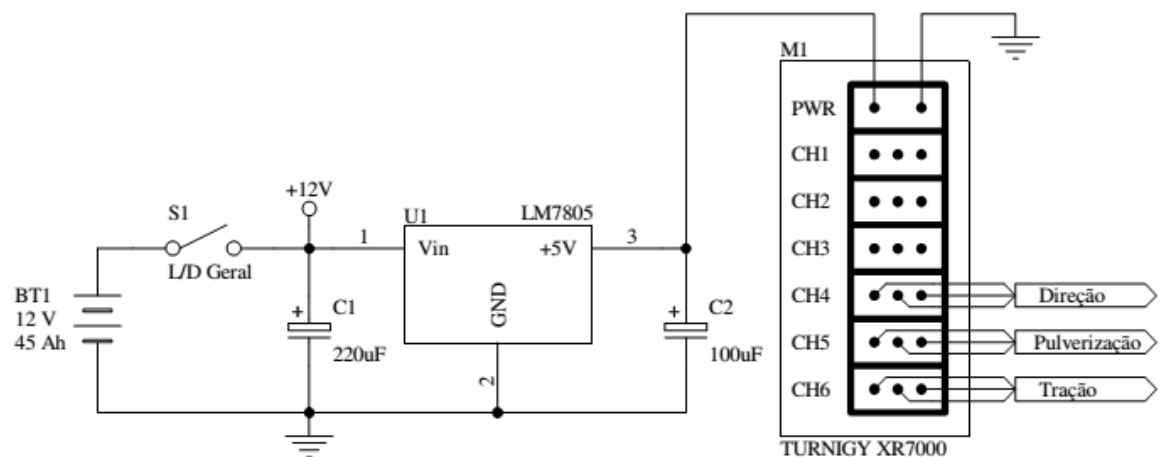
Figura 21 – Sistemas de propulsão, direção, controle da pulverização e monitoramento.

Os sistemas de propulsão, direção e controle da pulverização são controlados diretamente pelo rádio-transmissor a partir dos sinais recebidos por um rádio-receptor, modelo TURNIGY XR7000 (Figura 22)



Figura 22 – Rádio-receptor utilizado no *Conjunto Remoto* (TURNIGY, 2016).

A alimentação de 5 V para o rádio-receptor é obtida na saída de um regulador de tensão LM7805 (U1), cuja entrada recebe a tensão de 12 V oriunda de uma bateria automotiva (BT1), conforme mostrado na Figura 23. Somente três dos seis canais disponíveis foram utilizados nesse projeto.



Legenda:

S1 - Chave liga/desliga geral do sistema de controle

U1 - Regulador de Tensão (5 V)

M1 - Rádio-receptor

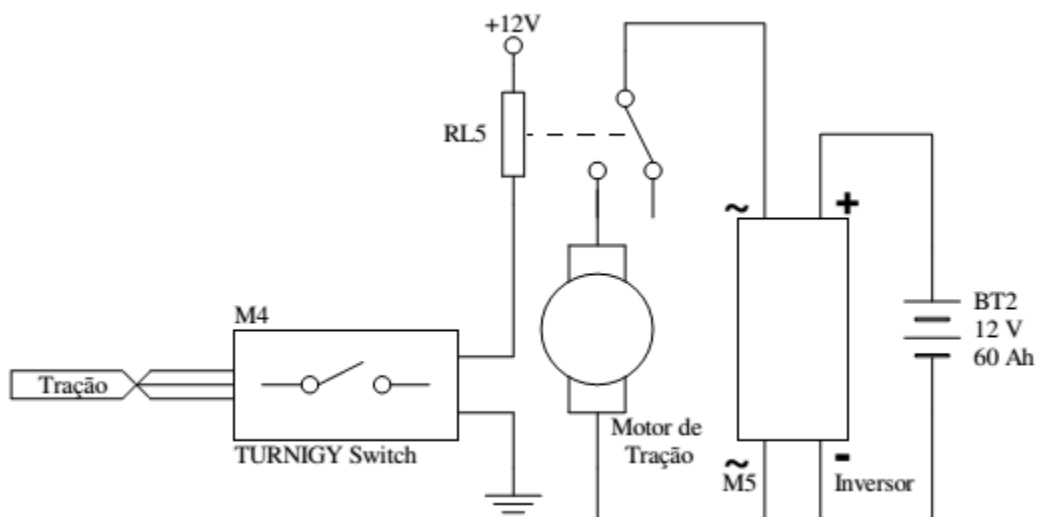
Figura 23 – Regulador de tensão e rádio-receptor no *Conjunto Remoto*.

3.2.1 – Sistema de Propulsão

O sistema de propulsão é formado por uma bateria automotiva de 12 V / 60 Ah (BT2), um inversor eletrônico comercial de 12 Vcc para 127 Vca (M5), modelo WT-C600, e um motor elétrico com escovas de 127 V, que é ligado ou desligado pelo rádio-controle via um módulo de acionamento (M4) que possui proteção interna contra picos de tensão reversa, modelo TURNIGY Receiver Controlled Switch (Figura 24), e de um relé com bobina de 12 V (RL5), conforme mostrado no diagrama elétrico da Figura 25.



Figura 24 – Módulo de acionamento do tipo liga/desliga (TURNIGY, 2016).



Legenda:

M4 - Módulo de acionamento do tipo liga/desliga

M5 - Inversor (12 Vcc p/ 127 Vca)

Motor de Tração - Motor com escovas de 127 V

Figura 25 – Sistema de propulsão no *Conjunto Remoto* (diagrama elétrico).

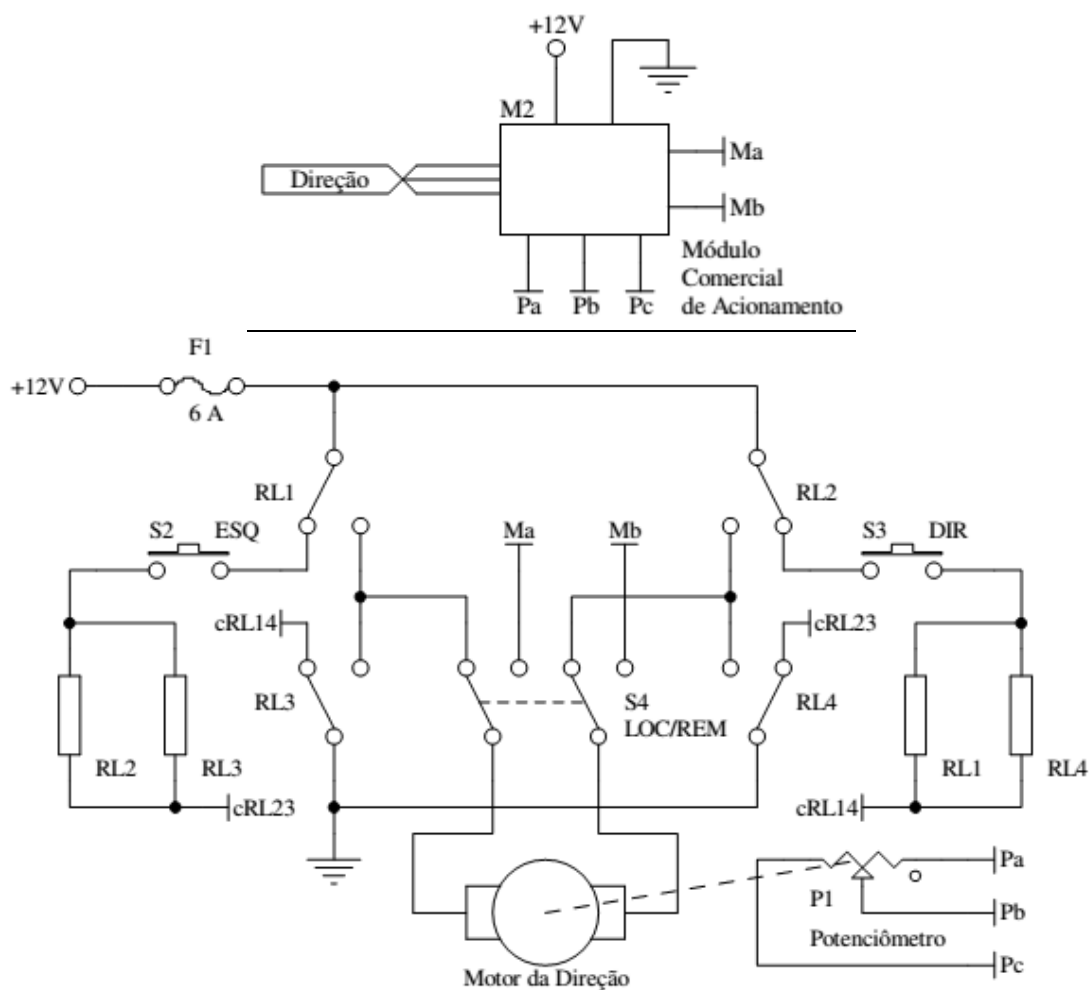
A potência nominal do motor e do inversor é 600 W, sendo que o intuito de se utilizar uma segunda bateria para alimentar esse subconjunto foi minimizar uma eventual interferência do inversor nos outros circuitos do sistema.

O acoplamento mecânico entre o motor elétrico e a caixa de marchas do mini-trator é realizado por um sistema de polias e correia. O diâmetro da polia do motor é de 70 mm e o diâmetro da polia da caixa de marchas é de 300 mm (*relação de transmissão* = 4,286:1).

3.2.2 – Sistema de Direção

O sistema de direção (Figura 26) é formado por um módulo comercial de acionamento baseado nos CI's NJM2611 (controlador para servomotores) e VNH3SP30-E (ponte H automotiva), um potenciômetro de realimentação (P1) e um motor elétrico de 12 V com um sistema de redução mecânica. Há também um subsistema para a movimentação local do motor por meio dos relés RL1, RL2, RL3 e RL4 e das chaves S2, S3 e S4.

O sinal na saída do canal de controle de direção do rádio-receptor TURNIGY XR7000 é um pulso periódico, cuja largura estabelece o rumo desejado pelo operador, conforme mostrado na Figura 27.



Legenda:

- M2 - Módulo comercial para controle de motores
- S2 - Botão para rotação manual do motor de direção para a esquerda
- S3 - Botão para rotação manual do motor de direção para a direita
- S4 - Chave de seleção do modo de operação (local ou remoto)
- P1 - Potenciômetro de realimentação
- Motor de Direção - Motor de 12 Vcc

Figura 26 – Sistema de direção no *Conjunto Remoto* (diagrama elétrico).

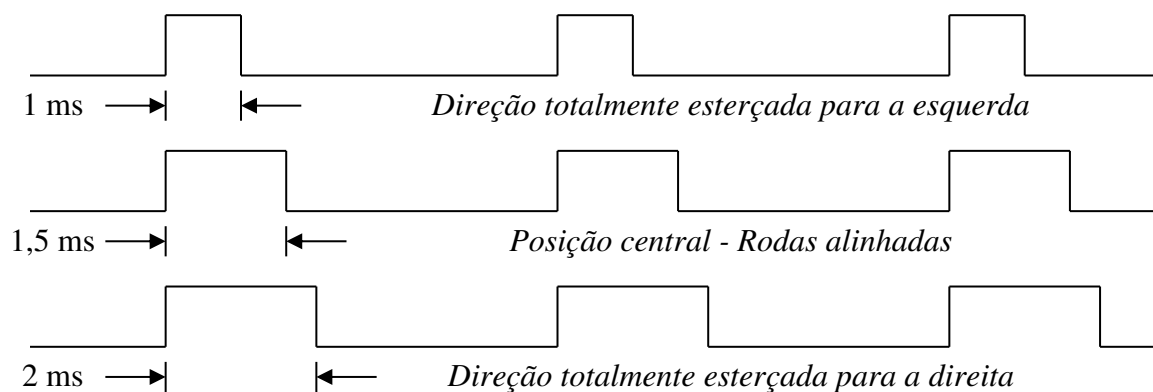
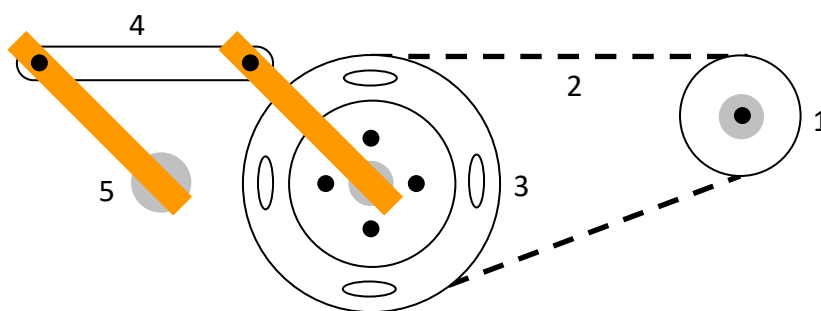


Figura 27 – Sinais para o controle da direção na saída do rádio-receptor.

O CI NJM2611 (Anexo A1) ajusta então a posição do motor elétrico à partir da largura dos pulsos do rádio-controle e da realimentação do ângulo de giro proporcionada por um potenciômetro acoplado mecanicamente ao volante do mini-tractor (Figura 28). Como a sua corrente máxima de saída é 0,6 A, o módulo comercial utilizado possui etapa final baseada no CI VNH3SP30-E (Anexo A2) para acionar motores em tensão contínua com correntes nominais de até 30 A.



Legenda:

- 1 - Pinhão de 14 dentes acoplado ao motor de direção
- 2 - Corrente de transmissão
- 3 - Coroa de 43 dentes acoplada ao volante do mini-tractor
- 4 - Acoplamento mecânico entre o volante e o potenciômetro de realimentação
- 5 - Potenciômetro de realimentação da posição do atual do volante

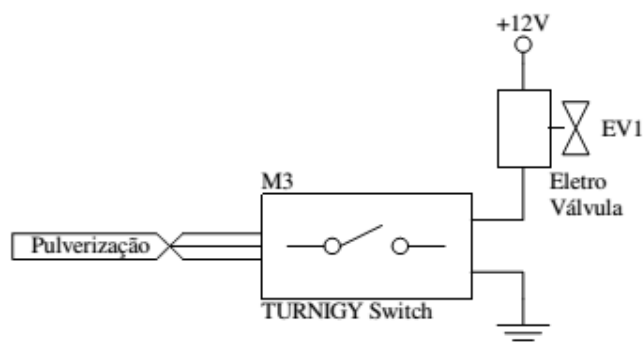
Figura 28 – Composição mecânica do sistema de direção.

3.2.3 – Sistema de Controle da Pulverização

O sistema de controle da pulverização é composto basicamente por uma eletro-válvula (Figura 29) com um solenoide de 12 V, que é ligada ou desligada pelo rádio-controle via um módulo de acionamento (M3), modelo TURNIGY Receiver Controlled Switch, conforme mostrado na Figura 30. A função dessa eletro-válvula é permitir ou bloquear o fluxo da calda armazenada no tanque para a saída do atomizador.



Figura 29 – Eletro-válvula com solenoide de 12 V.



Legenda:

M3 - Módulo de acionamento do tipo liga/desliga

EV1 - Eletro-válvula com solenóide de 12 V

Figura 30 – Sistema de controle da pulverização no *Conjunto Remoto*.

3.2.4 – Sistema de Monitoramento

O sistema de monitoramento é formado basicamente por uma câmera, modelo GoPro HERO3+ Black Edition (Figura 31), que transmite as imagens captadas diretamente para o tablet via uma rede local do tipo ponto a ponto.



Figura 31 – Câmera montada no pulverizador autopropelido (GOPRO, 2016).

3.3 – Determinação das características do protótipo

De acordo com Mialhe (1996), as dimensões lineares básicas de uma máquina agrícola enquadram-se nas denominadas “constantes construtivas” e o seu levantamento é importante para a individualização do equipamento que está sendo analisado.

A partir dessas dimensões do protótipo (comprimento, largura e altura), é possível determinar as suas relações típicas de forma ou configurações geométricas (área ocupada pela máquina quando estiver estacionada, área frontal, volume ocupado, índice de largura,

índice de altura e índice de forma). Esses fatores são relevantes para o dimensionamento do local onde a máquina será alojada quando estiver temporariamente fora de serviço (RODRIGUES, 2005; MOLIN *et al.*, 2002).

O índice de largura (I_L), definido na Equação 1, relaciona a largura do protótipo com o seu comprimento:

$$I_L = \frac{L}{C} \quad \text{Eq. 1}$$

onde

I_L = Índice de largura (adimensional);

L = Largura do protótipo (m); e,

C = Comprimento do protótipo (m).

O índice de altura (I_H), definido na Equação 2, relaciona a altura do protótipo com o seu comprimento:

$$I_H = \frac{H}{C} \quad \text{Eq. 2}$$

onde

I_H = Índice de altura (adimensional);

H = Altura do protótipo (m); e,

C = Comprimento do protótipo (m).

O índice de forma (I_F), definido na Equação 3, relaciona a área frontal do protótipo com o seu comprimento:

$$I_F = \frac{A}{C} \quad \text{Eq. 3}$$

onde

I_F = Índice de forma (m);

A = Área frontal do protótipo (m²); e,

C = Comprimento do protótipo (m).

Além desta caracterização dimensional, também foi realizada uma caracterização ponderal, relacionada com a mensuração da massa total do protótipo (W_T), com a sua distribuição de massas e com a determinação da posição do seu centro de gravidade (MIALHE, 1996).

A distribuição de massas é a designação da forma como a força peso é distribuída sobre os pontos que sustentam o protótipo. Assim, foram determinadas as reações dos apoios no eixo frontal (R_F), no eixo traseiro (R_T), no lado direito (R_D) e no lado esquerdo (R_E) da máquina por meio de pesagens adequadas em uma balança.

A posição do centro de gravidade (CG), que é o ponto no qual atua a resultante das forças gravitacionais que agem sobre a máquina agrícola, foi definida com base no triedro de referência mostrado na Figura 32, cuja origem está localizada na interseção entre os planos longitudinal, vertical (plano que passa verticalmente pelo centro do rodado traseiro) e transversal (plano de apoio).

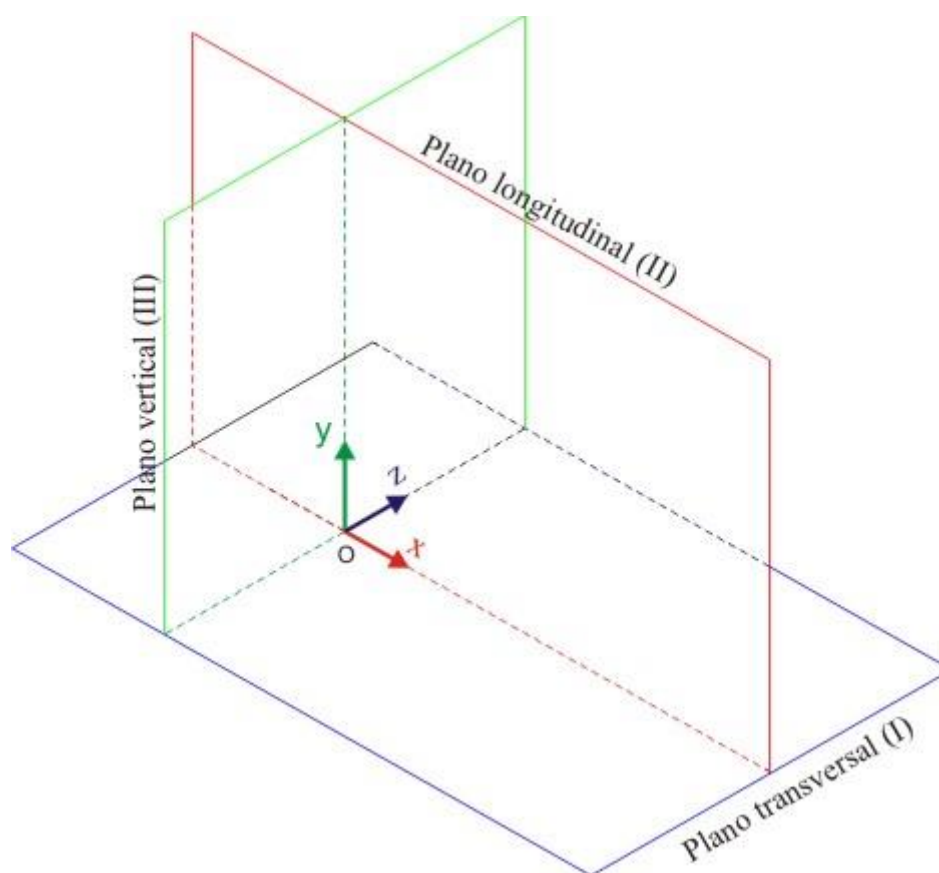
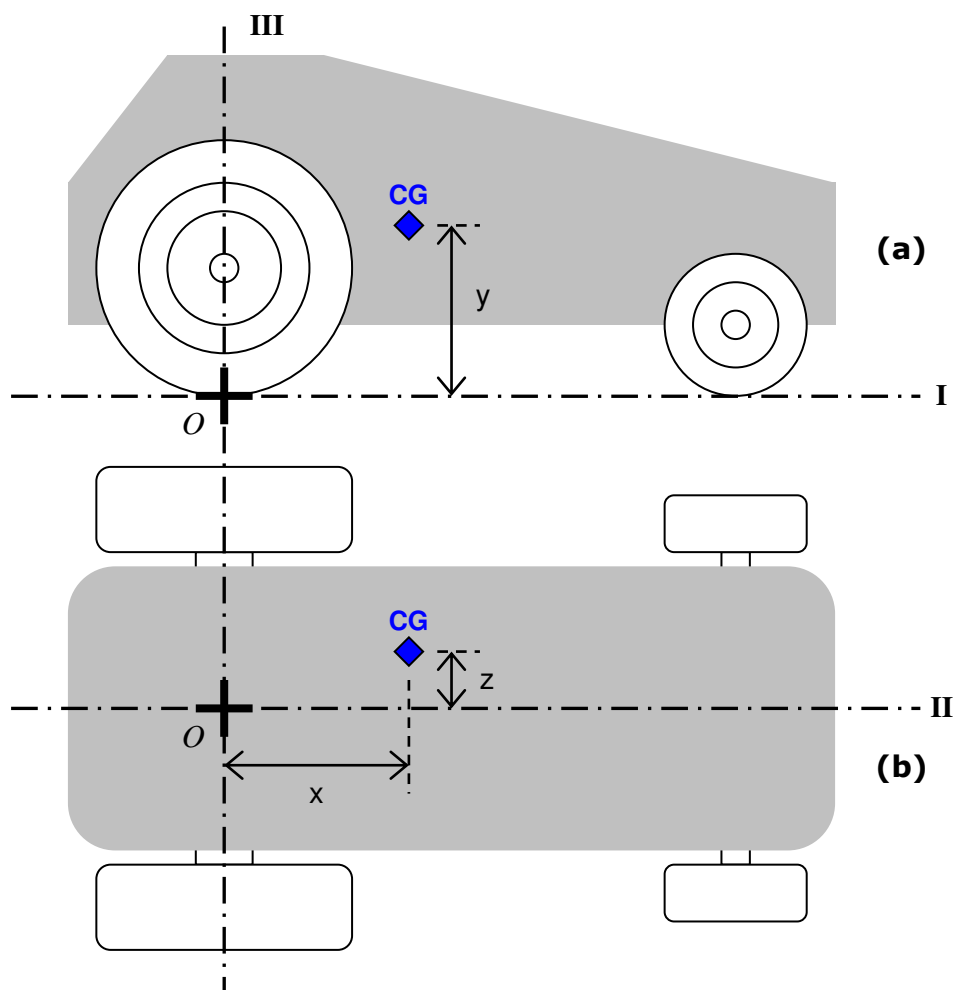


Figura 32 – Triedro de referência do CG (VARELLA; KHOURY Jr., 2008).

As coordenadas longitudinal (x), vertical (y) e transversal (z) do CG, mostradas na Figura 33, referem-se assim à distância entre este ponto e a origem do respectivo plano.

Com base no método da dupla pesagem, proposto por Chudakov (1977), foi possível determinar as coordenadas do centro de gravidade do protótipo considerando-o como um corpo rígido com quatro pontos de apoio no solo (LIMA *et al.*, 2004).



Legenda:

- x – Coordenada do CG no plano longitudinal (II)
- y – Coordenada do CG no plano vertical (III)
- z – Coordenada do CG no plano transversal de apoio (I)

Figura 33 – Localização do centro de gravidade (CG) nas vistas lateral esquerda (a) e superior (b) de um trator.

A coordenada longitudinal (x) do CG foi determinada com a utilização da Equação 4.

$$x = \frac{R_F d_{EE}}{W_T} \quad \text{Eq. 4}$$

onde

x = Coordenada longitudinal do CG (m);

R_F = Reação do apoio no eixo frontal (kg);

d_{EE} = Distância entre os eixos do protótipo (m); e,

W_T = Massa total do protótipo (kg).

A coordenada transversal (z) do CG foi determinada com a utilização da Equação 5.

$$z = \frac{b (R_E - R_D)}{2 W_T} \quad \text{Eq. 5}$$

onde

z = Coordenada transversal do CG (m);

b = Bitola do protótipo (m);

R_E = Reação do apoio no lado esquerdo (kg);

R_D = Reação do apoio no lado direito (kg); e,

W_T = Massa total do protótipo (kg).

Para a determinação da coordenada vertical (y) do CG, também foi realizada uma medição da reação do apoio no eixo frontal após uma elevação conhecida (R_{FE}). O seu valor pode então ser encontrado com a utilização da Equação 6:

$$y = r_T + \frac{(W_T x) - (R_{FE} d_{EE})}{W_T \tan \beta} - \frac{[(r_T - r_F) R_{FE}]}{W_T} \quad \text{Eq. 6}$$

onde

y = Coordenada vertical do CG (m);

r_T = Raio estático do rodado traseiro (m);

r_E = Raio estático do rodado frontal (m);

x = Coordenada longitudinal do CG (m);

d_{EE} = Distância entre os eixos do protótipo (m);

R_{FE} = Reação do apoio no eixo frontal quando estiver elevado (kg);

W_T = Massa total do protótipo (kg); e,

β = Ângulo de elevação (°).

O ângulo de elevação (β) foi determinado com a utilização da Equação 7:

$$\beta = \sin^{-1} \frac{h_{FE}}{d_{EE}} \quad \text{Eq. 7}$$

onde

β = Ângulo de elevação (°);

h_{FE} = Altura de elevação do eixo frontal (m); e,

d_{EE} = Distância entre os eixos do protótipo (m).

O raio de giro (raio da menor circunferência medido no plano de apoio, descrita tangencialmente pelo plano médio longitudinal da roda mais externa) e o espaço de giro (diâmetro da menor circunferência medido no plano de apoio, descrita pela projeção do ponto mais externo de um trator) são características que refletem a manobrabilidade de uma máquina agrícola isolada ou de um conjunto (trator + implemento), “cuja mensuração é considerada em todas as normas de ensaio sobre esse tipo de equipamento” (MIALHE, 1996).

Sendo assim, foram determinados o raio de giro e o espaço de giro (considerando-se o atomizador e a estrutura de sustentação do bocal de pulverização) do protótipo, tanto à direita quanto à esquerda. O índice de relação do raio e do espaço de giro, mostrado na Equação 8, correlaciona esses dois valores:

$$IRE = \left[\frac{EGE + EGD}{2(RGE + RGD)} - 1 \right] 100\% \quad Eq. 8$$

onde

IRE = Índice da relação entre o raio e espaço de giro (%);

EGE = Espaço de giro à esquerda (m);

EGD = Espaço de giro à direita (m);

RGE = Raio de giro à esquerda (m); e,

RGD = Raio de giro à direita (m).

Outro índice que foi determinado, relevante por caracterizar se as manobras à esquerda ou à direita ocorrem de modo semelhante, é o de simetria do raio de giro, que correlaciona os raios de giro em ambos os sentidos de acordo com a Equação 9.

$$IS_{rg} = \left(\frac{RGE - RGD}{RGE + RGD} \right) 100\% \quad Eq. 9$$

onde

IS_{rg} = Índice de simetria do raio de giro (%);

RGE = Raio de giro à esquerda (m); e,

RGD = Raio de giro à direita (m).

Segundo Mialhe (1996), nomeia-se *limites de estabilidade* as “condições do plano de apoio que permitem o funcionamento estável de uma máquina agrícola, sem sobrecarga dos rodados e risco de tombamento”. Normalmente, esses limites referem-se à operação do equipamento em terrenos com uma determinada inclinação.

O ângulo-limite estático longitudinal em aclive (α), o ângulo-limite estático longitudinal em declive (θ) e o ângulo-limite estático transversal (γ), nos quais uma máquina agrícola pode se posicionar em equilíbrio sem deslizar ou tombar para trás, para frente ou para os lados (LIMA *et al.*, 2004), simbolizados na Figura 34, foram determinados com a utilização das Equações 10, 11 e 12, respectivamente:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{x}{y} \quad \text{Eq. 10}$$

onde

α = Ângulo-limite estático longitudinal em aclive (°);

x = Coordenada longitudinal do CG (m); e,

y = Coordenada vertical do CG (m).

$$\theta = \tan^{-1} \frac{d_{EE} - x}{y} \quad \text{Eq. 11}$$

onde

θ = Ângulo-limite estático longitudinal em declive (°);

d_{EE} = Distância entre os eixos do protótipo (m);

x = Coordenada longitudinal do CG (m); e,

y = Coordenada vertical do CG (m).

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{b}{y} \quad \text{Eq. 12}$$

onde

γ = Ângulo-limite estático transversal (°);

b = Bitola do protótipo (m); e,

y = Coordenada vertical do CG (m).

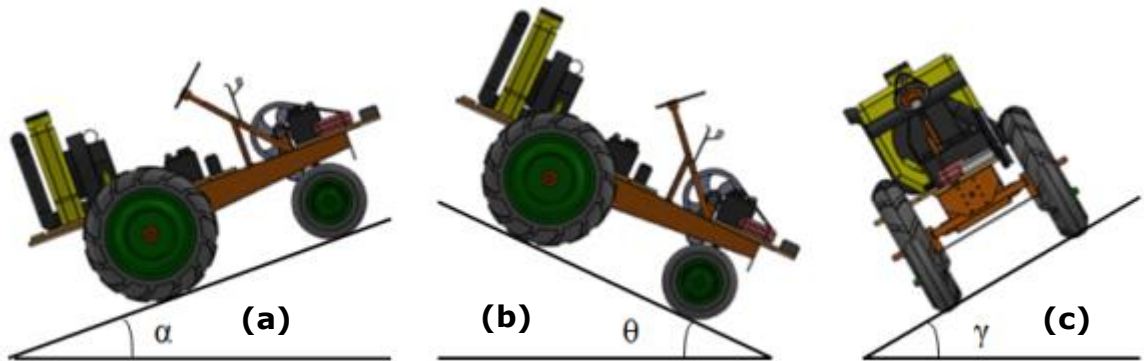


Figura 34 – Ângulos-limite de estabilidade do protótipo: longitudinal em aclive (a), longitudinal em declive (b) e transversal (c).

Por questões de segurança para pessoas próximas ao protótipo e de integridade do equipamento, considerou-se que os ângulos-limite operacionais para a sua utilização a campo são iguais a 50% dos respectivos ângulos-limite estáticos (LEITE, 2007).

A velocidade de deslocamento do pulverizador autopropelido em 1ª e em 2ª marcha foi determinada ao se medir o tempo que ele levou para percorrer uma distância conhecida (30 metros). Considerando que o protótipo só é capaz de pulverizar um lado da linha de plantio em cada passada porque o atomizador utilizado só possui um bocal de saída, determinou-se a capacidade de trabalho teórica (CT_T) em 1ª marcha a partir da Equação 13:

$$CT_T = \frac{v L}{10} \quad \text{Eq. 13}$$

onde

CT_T = Capacidade de trabalho teórica (ha h^{-1});

v = Velocidade de deslocamento do protótipo (km h^{-1}); e,

L = Largura de faixa de aplicação (m).

O consumo de combustível do pulverizador pneumático (atomizador) foi determinado por meio da medição do volume utilizado em um intervalo de tempo estipulado (25 minutos). Com esse valor, foi estabelecido o consumo total desse equipamento empregando-se a Equação 14:

$$C_h = \frac{3,6 C}{t} \quad \text{Eq. 14}$$

onde

C_h = Consumo horário de combustível do atomizador (L h^{-1});

C = Volume de combustível utilizado (mL); e,

t = Tempo decorrido durante o ensaio (s).

A Equação 15 foi utilizada então para se determinar a quantidade de combustível teórica necessária por hectare de área pulverizada:

$$C_A = \frac{C_h}{CT_T} \quad \text{Eq. 15}$$

onde

C_A = Consumo de combustível do atomizador por área pulverizada (L ha^{-1});

C_h = Consumo horário de combustível do atomizador (L h^{-1}); e,

CT_T = Capacidade de trabalho teórica (ha h^{-1}).

A vazão da calda foi determinada por meio da medição da variação do volume no tanque do pulverizador em um tempo estabelecido (25 minutos), empregando-se a Equação 16:

$$q = \frac{3600 v}{t} \quad \text{Eq. 16}$$

onde

q = Vazão da calda ($L h^{-1}$);

v = Variação do volume no tanque de calda (L); e,

t = Tempo decorrido durante o ensaio (s).

A partir da medição individual da corrente elétrica consumida pelos diversos circuitos que compõem os sistemas do *Conjunto Remoto*, determinou-se a autonomia das baterias BT1 e BT2 com a utilização da Equação 17:

$$A_{BT} = \frac{C_{BT}}{I} \quad \text{Eq. 17}$$

onde

A_{BT} = Autonomia da bateria (h);

C_{BT} = Capacidade de fornecimento de corrente (Ah); e,

I = Corrente média consumida (A).

O nível de ruído ao qual o operador do protótipo estará exposto durante a sua utilização foi medido com um decibelímetro, modelo Minipa MSL-1310, em intervalos de cinco metros até uma distância de trinta metros. De acordo com o Anexo I da Norma Regulamentadora N° 15 (NR 15 - Atividades e Operações Insalubres) do Ministério do Trabalho e Previdência Social (MTPS, 2016), o limite de exposição ao ruído contínuo ou intermitente para uma jornada de trabalho de 8 horas é 85 dB.

A distância operacional máxima confiável entre o *Conjunto Local* e o *Conjunto Remoto* foi determinada a partir de medições em campo do alcance de recepção dos sinais de controle e de vídeo, baseando-se também nas informações fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos utilizados.

É importante salientar que o sistema foi projetado para imobilizar automaticamente o pulverizador autopropelido se houver a perda de sinal entre esses conjuntos por questões de segurança. No caso dos sinais de controle, o alcance entre o rádio-transmissor (Figura

20) e o rádio-receptor (Figura 22) é superior a 1 km em visada direta segundo o seu fabricante (TURNIGY, 2016).

Para o envio das imagens captadas pela câmera, montada no protótipo, para o tablet, utilizado pelo operador, utilizou-se uma rede local do tipo ponto a ponto, baseada numa comunicação WiFi no padrão IEEE 802.11g. Essa tecnologia apresenta como vantagens o baixo custo, a facilidade de implementação da comunicação e a grande disseminação no mercado de vários tipos de equipamentos capazes de suportá-la (DONG, 2007).

A velocidade do ar no bocal do pulverizador foi medida de acordo com as indicações estabelecidas no padrão americano AMCA/ANSI 210-99 (2000). Nesta metodologia, deve-se construir um túnel de vento com comprimento equivalente a dez vezes o diâmetro do duto, associado a um homogeneizador de fluxo de ar e a um controlador de vazão (válvula cônica montada na saída do duto), conforme mostrado na Figura 35.

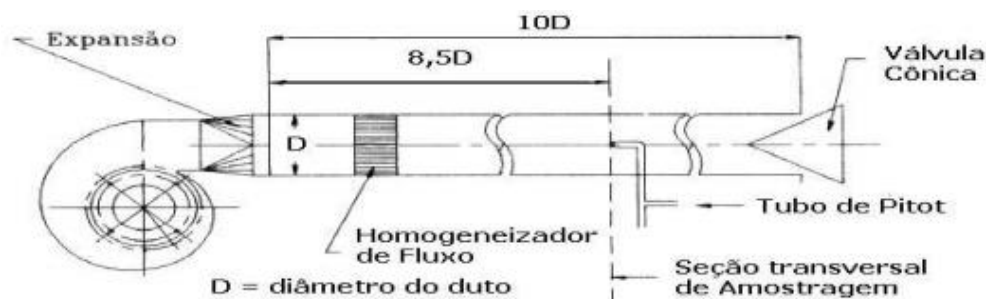


Figura 35 – Duto para testes de ventiladores (MESQUITA; GUIMARÃES; NEFUSSI, 1985).

Para se determinar o número de pontos de leitura da velocidade do ar dentro de dutos circulares, a seção transversal da tubulação deve ser dividida em áreas iguais (MESQUITA; GUIMARÃES; NEFUSSI, 1985). Considerando-se então um duto com o diâmetro de 70 mm, são recomendados seis pontos de leituras na seção longitudinal e seis leituras na seção vertical do tubo, cuja localização foi determinada com a Equação 18.

$$L_N = d \sqrt{\frac{2n - 1}{4N}} \quad \text{Eq. 18}$$

onde

L_N = Distância dos pontos de leitura em relação ao centro da seção circular (mm);

d = diâmetro do ventilador (mm);

n = enésima área; e,

N = número de leituras.

As medições foram realizadas com um manômetro de coluna de tubo em “U”, modelo 500-0-500 mmca, marca Salcas, com precisão de 0,5% do fundo de escala. A velocidade do ar foi calculada então como a média aritmética entre os doze pontos medidos considerando-se a válvula cônica de saída totalmente aberta.

3.4 – Utilização do protótipo para pulverização a campo

O protótipo foi utilizado para pulverizar uma lavoura de tomate, sendo que o volume de vegetação nesse campo (TRV – *Tree Row Volume*) foi calculado com a utilização da Equação 19:

$$TRV = \frac{10000 \ h \ L}{d} \quad Eq. 19$$

onde

TRV = Volume da vegetação ($m^3 \ ha^{-1}$);

h = Altura de vegetação (m);

L = Largura de vegetação (m); e,

d = Distância entre as linhas (m).

A partir desse volume de vegetação e do índice de volume recomendado para diferentes volumes de pulverização (Tabela 1), determinou-se o volume de pulverização por área com a utilização da Equação 20:

$$Q_A = \frac{TRV \ IV}{1000} \quad Eq. 20$$

onde

Q_A = Volume de pulverização por área ($L \ ha^{-1}$);

TRV = Volume do vegetação ($m^3 \ ha^{-1}$); e,

IV = Índice volumétrico ($mL \ m^{-3}$).

Tabela 1 – Índices volumétricos recomendados para diferentes volumes de pulverização (VIRGINIA AND WEST VIRGINIA COOPERATIVE EXTENSION SERVICES, 1989)

Volume de Pulverização	Índice Volumétrico ($mL \ m^{-3}$)
<i>Muito Alto</i>	120
<i>Alto</i>	100
<i>Médio</i>	70
<i>Baixo</i>	50
<i>Muito Baixo</i>	30
<i>Ultra Baixo</i>	10

A vazão de calda necessária para se produzir esse volume de pulverização foi então determinada com a utilização da Equação 21:

$$q_T = \frac{Q_A v f}{600} \quad \text{Eq. 21}$$

onde

q_T = Vazão de calda (L min^{-1});

Q_A = Volume de pulverização por área (L ha^{-1});

v = Velocidade de deslocamento do protótipo (km h^{-1}); e,

f = Largura da faixa de aplicação (m).

A quantidade de gotas por área proporcionada pela pulverização é função do tipo do produto aplicado, conforme mostrado na Tabela 2. Para a verificação desse número de gotas por área e da sua cobertura na planta, foram fixadas sete etiquetas de papel hidrossensível em cada tomateiro. Essas etiquetas são impregnadas com o corante azul de bromofenol, que na sua forma não-ionizada apresenta coloração amarela, mas que adquire uma coloração azul ao se ionizar em contato com a água.

Tabela 2 – Densidade de gotas em função do tipo do fitossanitário (PENTAIR, 2016)

Tipo do Produto	Densidade (Nº de gotas por cm^2)
<i>Inseticida</i>	20 a 30
<i>Herbicida (pré-emergente)</i>	20 a 30
<i>Herbicida (foliar de contato)</i>	30 a 40
<i>Fungicida</i>	50 a 70

As etiquetas foram retiradas com cuidado e acondicionadas adequadamente após a pulverização para evitar a absorção de umidade, sendo então devidamente identificadas e levadas para análise posterior com o software *Image Tool*.

Com as imagens obtidas a partir delas, determinou-se a cobertura (%) e a densidade de gotas por área. Os resultados obtidos foram então analisados com base na Estatística Descritiva, com a determinação de medidas de posição (Média Aritmética, Moda e Mediana) e de dispersão (Variância, Desvio-Padrão e Coeficiente de Variação).

Como as variáveis analisadas no experimento são contínuas, para a determinação da Moda nas observações realizadas, utilizou-se a fórmula de Pearson, mostrada na Equação 22:

$$Mo = (3 Md) - (2 \bar{X}) \quad Eq. 22$$

onde

Mo = Moda (Pearson);

Md = Mediana; e,

$\bar{X}$ = Média aritmética.

Com os valores da média aritmética, da moda e do desvio padrão, foi possível calcular o índice de assimetria de Pearson dos resultados obtidos com a fórmula mostrada na Equação 23:

$$As = \frac{\bar{X} - Mo}{\sigma} \quad Eq. 23$$

onde

As = Índice de assimetria (Pearson);

$\bar{X}$ = Média aritmética;

Mo = Moda; e,

σ = Desvio-padrão.

A partir da média aritmética, do desvio-padrão e do número de observações, também foi possível construir um Intervalo de Confiança (IC) para a quantidade de gotas por área e verificar se o resultado obtido se enquadraria nas faixas indicadas na Tabela 2.

A deposição da calda foi avaliada empregando-se um marcador, conforme o método proposto por Palladini; Raetano; Velini (2005). Nessa metodologia, foi utilizado o corante alimentício Azul Brilhante ($C_3H_3N_2Na_2O_9S_2$ - FD&C Blue N° 1) por ele não alterar as propriedades físico-químicas da calda, sendo então acrescentado à solução de pulverização na proporção de 3,0 gramas por litro.

Após a pulverização da calda (água + corante alimentício), foram coletadas amostras de folíolos em cada tomateiro nas mesmas regiões de colocação das etiquetas. Elas foram então acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados.

Seguindo-se a metodologia indicada por Quirino (2010), adicionou-se 10 ml de água destilada em cada saco plástico, agitando-os então por 30 segundos para a remoção do corante, sendo que a solução da lavagem foi analisada em espectrofotômetro, modelo SP-1105, ajustado para a leitura da absorbância no comprimento de onda de 630 nm,

Para se determinar a concentração do depósito de corante nos folíolos, foi elaborada uma curva-padrão de linearidade com a mesma solução aplicada durante a pulverização na lavoura (SASAKI, 2012; VIGANO; RAETANO, 2007). Com essa concentração e a área dos folíolos, mensurada com um medidor de área foliar modelo CI-202, determinou-se a deposição por área de acordo com a Equação 24:

$$D_A = \frac{1000 C_a V_a}{A_f} \quad \text{Eq. 24}$$

onde

D_A = Deposição por área ($\mu\text{g cm}^{-2}$);

C_a = Concentração da solução de lavagem (mg mL^{-1});

V_a = Volume da solução de lavagem (mL); e,

A_f = Área foliar (cm^2).

Os resultados obtidos nessa análise da deposição também foram caracterizados de acordo com a Estatística Descritiva, determinando-se tanto medidas de posição (Média Aritmética, Moda e Mediana) quanto de dispersão (Variância, Desvio-Padrão e Coeficiente de Variação).

Os coeficientes de correlação linear entre pares das variáveis avaliadas no experimento a campo, obtidos por meio das etiquetas (cobertura e densidade de gotas por área) e da pulverização da calda com o corante alimentício (deposição), também foram determinados.

O espectro de gotas produzido pelo pulverizador pneumático motorizado foi avaliado em laboratório, utilizando-se nesse caso um analisador de partículas a laser, marca Malvern Instruments, modelo *Spraytech*, com uma lente focal de 750 mm (Figura 36).



Figura 36 – Analisador de partículas a laser (MALVERN, 2016).

Foram realizadas três repetições, com o bocal de saída posicionado a 0,5 m do feixe do laser, sendo que o analisador foi calibrado para contabilizar gotas cujo diâmetro esteja na faixa de 0,1 a 2.500 μm .

Por meio da análise dos dados fornecidos pelo equipamento, determinou-se o diâmetro da mediana volumétrica (DMV), o diâmetro da mediana numérica (DMN), o coeficiente de homogeneidade (CH) e a amplitude relativa (SPAN), correlacionados com a utilização das Equações 25 e 26:

$$CH = \frac{DMV}{DMN} \quad \text{Eq. 25}$$

onde

CH = Coeficiente de homogeneidade (adimensional);

DMV = Diâmetro de mediana volumétrica (μm); e,

DMN = Diâmetro de mediana numérica (μm).

$$SPAN = \frac{D_{0,9} - D_{0,1}}{D_{0,5}} \quad \text{Eq. 26}$$

onde

SPAN = Amplitude relativa (adimensional);

$D_{0,9}$ = Diâmetro da gota abaixo do qual está contido 90% do volume total (μm);

$D_{0,1}$ = Diâmetro da gota abaixo do qual está contido 10% do volume total (μm); e,

$D_{0,5}$ = Diâmetro da mediana volumétrica (μm).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Caracterização do protótipo

O protótipo do pulverizador autopropelido, após a sua finalização, é mostrado na Figura 37. Alguns detalhes das suas outras partes também são mostrados nas seguintes imagens: Figuras 38 e 39 (sistema de propulsão); Figuras 40 e 41 (sistema de direção); Figura 42 (sistema de controle da pulverização).



Figura 37 – Protótipo do pulverizador autopropelido.



Figura 38 – Detalhe do sistema de propulsão no *Conjunto Remoto*.



Figura 39 – Acoplamento mecânico entre o motor e a caixa de marchas no protótipo.



Figura 40 – Detalhe do sistema de direção no *Conjunto Remoto*.



Figura 41 – Motor e sistema para esterçamento da direção do protótipo.

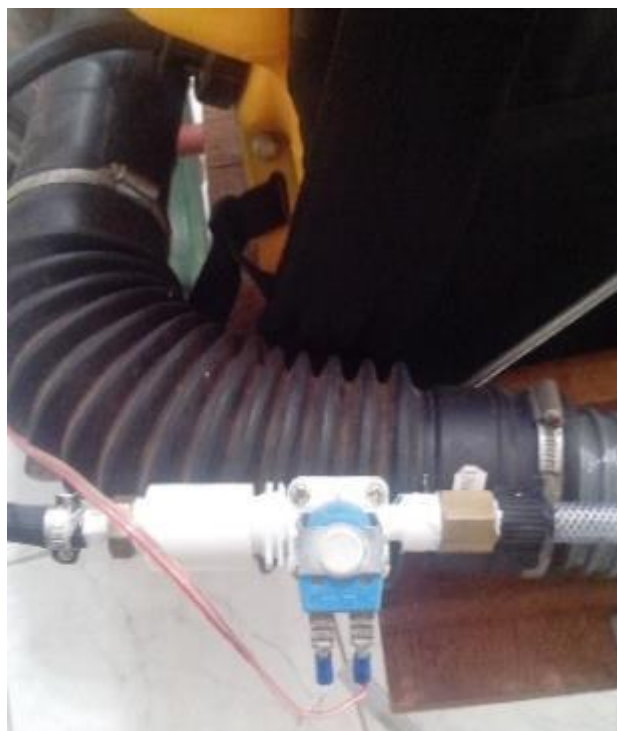


Figura 42 – Eletro-válvula para o controle de saída da calda no atomizador.

Na Figura 43 é mostrada uma imagem captada pela câmera montada no pulverizador autopropelido e que faz parte do sistema de monitoramento.



Figura 43 – Imagem captada pela câmera montada no pulverizador autopropelido.

As dimensões externas finais do protótipo do pulverizador autopropelido estão representadas na Figura 44, enquanto que as configurações geométricas e os índices de largura, altura e forma correlacionados com elas estão no Quadro 1.

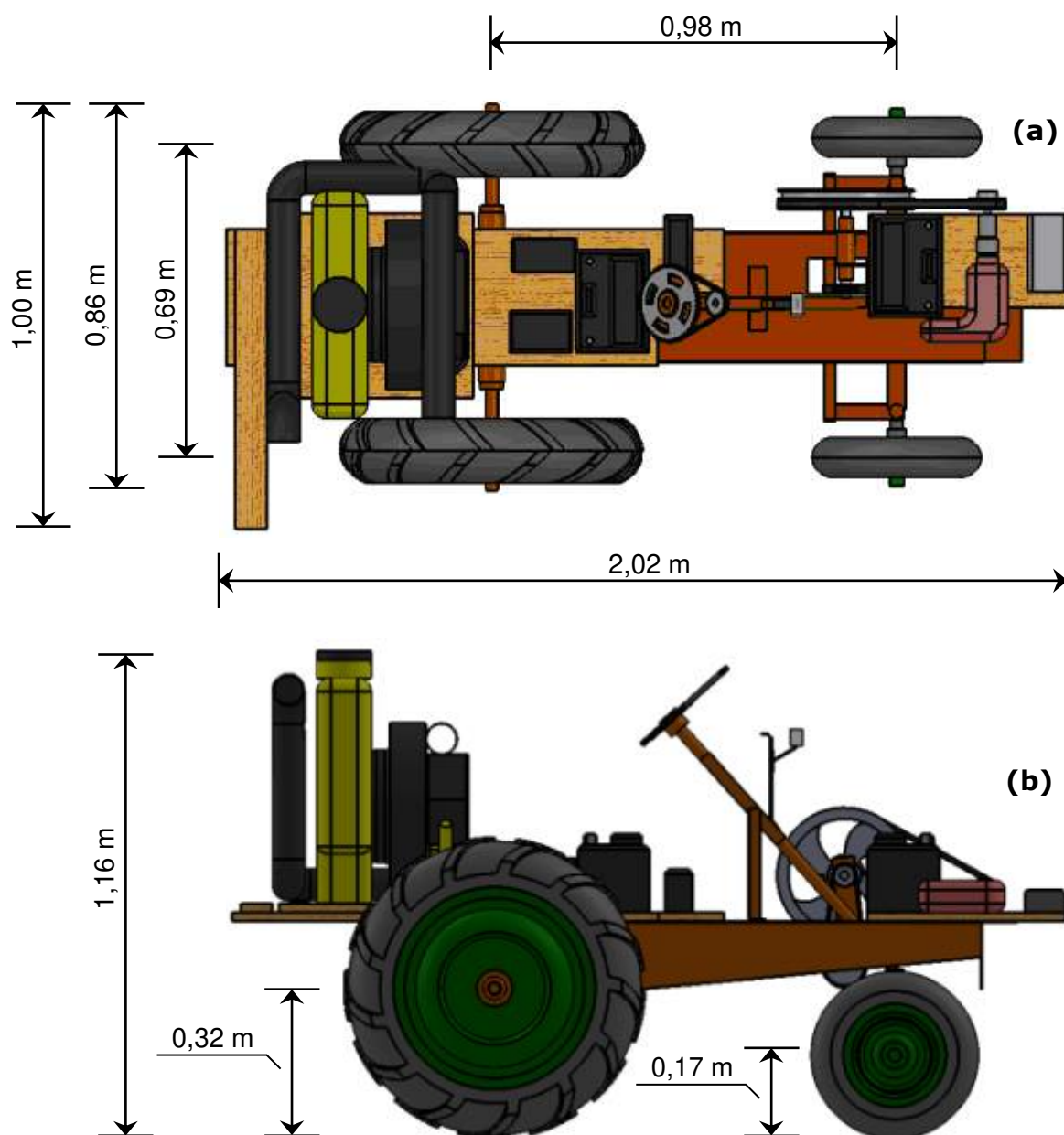


Figura 44 – Dimensões externas finais do protótipo nas suas vistas superior (a) e lateral esquerda (b).

As características ponderais do protótipo, considerando o reservatório de calda (18 litros) e o tanque de gasolina (2 litros) do atomizador totalmente abastecidos, estão no Quadro 2.

Quadro 1 – Dimensões externas, configurações geométricas e índices do protótipo

Característica	Símbolo	Valor	Equação
<i>Comprimento (m)</i>	C	2,02	-
<i>Largura (m)</i>	L	1,00	-
<i>Altura (m)</i>	H	1,16	-
<i>Área ocupada estacionado (m²)</i>	S	2,02	$S = C \cdot L$
<i>Área frontal (m²)</i>	A	1,16	$A = H \cdot L$
<i>Volume ocupado (m³)</i>	V	2,34	$V = S \cdot H = A \cdot C$
<i>Índice de Largura (adimensional)</i>	I_L	0,50	$I_L = L / C$
<i>Índice de Altura (adimensional)</i>	I_H	0,57	$I_H = H / C$
<i>Índice de Forma (m)</i>	I_F	0,57	$I_F = A / C$

Quadro 2 – Características ponderais do protótipo

Característica	Símbolo	Valor
<i>Massa total (kg)</i>	W_T	212,5
<i>Reação dos apoios no rodado frontal (kg)</i>	R_F	60,6
<i>Reação dos apoios no rodado traseiro (kg)</i>	R_T	151,9
<i>Reação dos apoios no lado direito (kg)</i>	R_D	97,7
<i>Reação dos apoios no lado esquerdo (kg)</i>	R_E	114,8

Após uma elevação de 0,28 m em relação ao solo, a reação do apoio no rodado frontal (R_{FE}) foi de 45,6 kg. Assim, considerando-se um ângulo de elevação (β) igual 16,6°, as coordenadas calculadas para o CG do protótipo são:

- *Coordenada no eixo longitudinal* → $x = 0,28$ m
- *Coordenada no eixo vertical* → $y = 0,52$ m
- *Coordenada no eixo transversal* → $z = 0,03$ m

Para a determinação do raio de giro e do espaço de giro tanto à direita quanto à esquerda, foram realizadas três repetições, sendo que os resultados obtidos e os valores médios calculados estão no Quadro 3.

Quadro 3 – Raio de giro e espaço de giro à direita e à esquerda do protótipo

Característica	Repetições			Média
	1	2	3	
<i>Raio de giro à direita (m)</i>	2,08	2,06	2,06	2,07
<i>Raio de giro à esquerda (m)</i>	2,09	2,10	2,09	2,09
<i>Espaço de giro à direita (m)</i>	4,13	4,14	4,13	4,13
<i>Espaço de giro à esquerda (m)</i>	4,29	4,30	4,28	4,29

Com base nesses resultados, determinou-se o índice de relação entre o raio e do espaço de giro (IRE) e o índice de simetria do raio de giro (IS_{rg}), obtendo-se como resultado 1,20% e 0,48%, respectivamente. Segundo Mialhe (1996), esses valores podem ser considerados ótimos, já que o IRE foi inferior a 3,00% e o IS_{rg} foi inferior a 0,50%.

Essas características dimensionais, ponderais e de manobrabilidade permitiriam a utilização do protótipo, por exemplo, em lavouras de tomate que adotassem o Sistema Viçosa de espaçamento (ALMEIDA *et al.*, 2015), no qual as linhas de plantio distanciam-se dois metros entre si.

Os ângulos-limite de estabilidade estática e operacional do protótipo, calculados a partir das suas características dimensionais e ponderais, estão no Quadro 4.

Quadro 4 – Ângulos-limite de estabilidade estática e operacional do protótipo

Característica	Condição de Inclinação		
	Longitudinal em Active (α)	Longitudinal em Declive (θ)	Transversal (γ)
Ângulo-limite estático	28,2°	53,4°	53,0°
Ângulo-limite operacional	14,1°	26,7°	26,5°

Para a determinação da velocidade do protótipo, foram realizadas três medições do tempo necessário para que ele percorresse uma distância de trinta metros, inicialmente em 1ª marcha e depois em 2ª marcha, sendo que os resultados obtidos estão no Quadro 5.

Quadro 5 – Tempo do protótipo para percorrer uma distância de 30 metros

Condição	Repetições			Média
	1	2	3	
Deslocamento em 1ª Marcha (s)	55,03	56,06	55,80	55,63
Deslocamento em 2ª Marcha (s)	34,10	33,16	34,63	33,96

Com base nos dados do Quadro 5, foi possível determinar que a sua velocidade em 1ª marcha é 1,94 km/h e em 2ª marcha é 3,18 km/h. Como essa velocidade influi diretamente no volume de calda aplicado por área em um determinado intervalo de tempo, um aumento do seu valor implicaria também num aumento da capacidade de trabalho do equipamento.

No entanto, velocidades maiores tendem a ter uma influência negativa no espectro de gotas e na homogeneidade da distribuição da calda aplicada sobre a planta, comprometendo assim a qualidade da pulverização (CAVALIERI *et al.*, 2015).

Assim, na escolha da velocidade de deslocamento do protótipo para a aplicação de um fitossanitário em específico, deve haver um compromisso entre a produtividade almejada, relacionada com a capacidade de trabalho, e a deposição desejada do produto na planta, relacionada com a qualidade da pulverização.

A alteração dessa velocidade pode ser realizada de forma mecânica, com a alteração da relação entre as polias do motor de propulsão e da caixa de marchas do mini-tractor (Figura 40). Outra forma possível de mudança da velocidade do protótipo seria a adoção, por exemplo, de um controlador eletrônico simples baseado em uma malha RC, em um DIAC e em um TRIAC, como aquele mostrado na Figura 45.

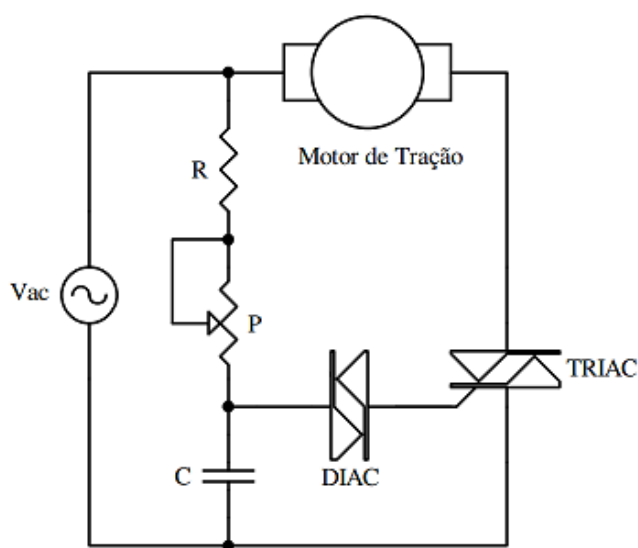


Figura 45 – Controlador eletrônico da velocidade de um motor de escovas.

Num motor com escovas, a velocidade de rotação depende da tensão nele aplicada. No entanto, esse tipo de solução não permite uma variação funcional da velocidade na faixa de 0 a 100% já que o torque que pode ser desenvolvido pelo motor também é função do valor dessa tensão.

Se substituirmos o motor de propulsão original utilizado no protótipo, com tensão nominal de 127 V, por um outro motor também com escovas, só que com tensão nominal de 12 V, poderíamos utilizar uma ponte H baseada em MOSFET's (Figura 46) para realizar o seu controle de velocidade a partir de pulsos com largura variável (*Pulse-Width Modulation* – PWM), gerados por um microcontrolador programado com um firmware adequado para realizar essa função.

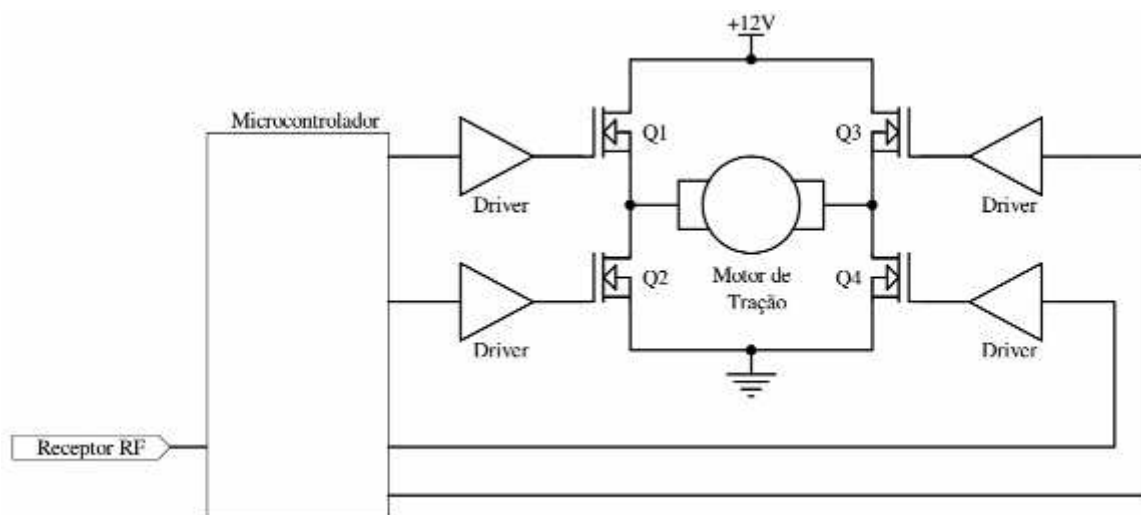


Figura 46 – Controle de velocidade e sentido de rotação do motor de tração.

Essa opção de controle baseada em uma ponte H apresenta como vantagem adicional a possibilidade de reversão do sentido de rotação, o que tornaria o pulverizador autopropelido capaz de se deslocar para trás sem a necessidade de um engate mecânico e manual da marcha-a-ré.

Considerando que o protótipo só é capaz de pulverizar um lado da linha de plantio em cada passada porque o atomizador utilizado só possui um bocal de saída, a sua capacidade de trabalho teórica (CT_T) é $0,198 \text{ ha h}^{-1}$ com o deslocamento do pulverizador autopropelido sendo realizado em 1ª marcha.

O motor a gasolina do atomizador consumiu 261 mL de combustível durante 25 minutos de funcionamento. Assim, o seu consumo horário (C_h) é $0,63 \text{ L h}^{-1}$, a sua autonomia é 1,26 h e o seu consumo de combustível teórico por área pulverizada (C_A) é $9,55 \text{ L ha}^{-1}$, considerando-se o volume do seu reservatório de combustível (2 litros).

O volume de líquido pulverizado foi 8,6 litros durante 25 minutos de funcionamento. Assim, a vazão de calda do atomizador é $20,64 \text{ L h}^{-1}$ ($0,344 \text{ L min}^{-1}$) com a ponta utilizada e sua autonomia é 0,87 h, considerando-se o volume do seu reservatório de líquido (18 litros).

Essas autonomias (combustível e calda) seriam insuficientes para se cumprir uma jornada de trabalho típica de oito horas diárias, fazendo com que vários reabastecimentos necessitem ser realizados durante esse período de tempo. Contudo, como o pulverizador pneumático motorizado não necessitaria mais ser carregado nas costas pelo operador, reservatórios auxiliares de calda e combustível poderiam ser adaptados no protótipo para

estendê-las, diminuindo-se assim o número de paradas para encher esses tanques novamente.

No Quadro 6 são apresentadas as correntes medidas e as potências calculadas para o sistemas de direção, de controle da pulverização, do rádio-receptor e da etapa de controle do motor de propulsão no pulverizador autopropelido. Todos eles são alimentados pela bateria BT1.

Quadro 6 – Características das partes alimentadas pela bateria BT1

Fatores	Corrente (A)	Potência (W)
<i>Consumo em repouso (estado quiescente)</i>	0,032	0,41
<i>Motor de Direção</i>	3,024	37,92
<i>Motor de Propulsão (somente controle)</i>	0,061	0,76
<i>Eletro-Válvula da Pulverização</i>	0,186	2,33
TOTAL (todos subconjuntos acionados)	3,303	41,42

OBS.: Tensão medida nos pólos da bateria BT1 = 12,54 V

Considerando que a capacidade e da bateria BT1 é 45 Ah, ela poderia alimentar o sistema por um prazo teórico máximo de 13,62 h no caso de todas as cargas estiverem acionadas simultaneamente.

No entanto, na prática, esse período de tempo deve ser consideravelmente maior porque o elemento de maior consumo (motor de direção) não funciona continuamente, só sendo utilizado momentaneamente para corrigir a direção do protótipo.

Quando o motor de propulsão não está funcionando, a potência da bateria BT2 utilizada pelo inversor de frequência foi de 7,12 W (tensão de 12,68 V e corrente de 0,562 A). Com o motor em funcionamento, a potência do conjunto foi determinada indiretamente, somando-se a potência em repouso com a potência demandada pelo motor, 403,08 W (tensão de 107,2 V e corrente de 3,760 A), resultando em 410,20 W.

Como a capacidade de BT2 é 60 Ah, essa bateria poderia alimentar o motor de propulsão por um prazo teórico máximo de 1,85 h, o que seria insuficiente para se cumprir uma jornada de trabalho típica de oito horas diárias. Para o atendimento dessa condição, poderia ser considerado então um banco de baterias em paralelo com maior capacidade de fornecimento de corrente, ou uma solução híbrida, onde a fonte de energia para o sistema seria um gerador elétrico acionado por um motor a gasolina, por exemplo.

As medições do nível de ruído produzido pelo protótipo, mensuradas com um decibelímetro em intervalos de cinco metros até uma distância de trinta metros, estão representadas no gráfico da Figura 47.

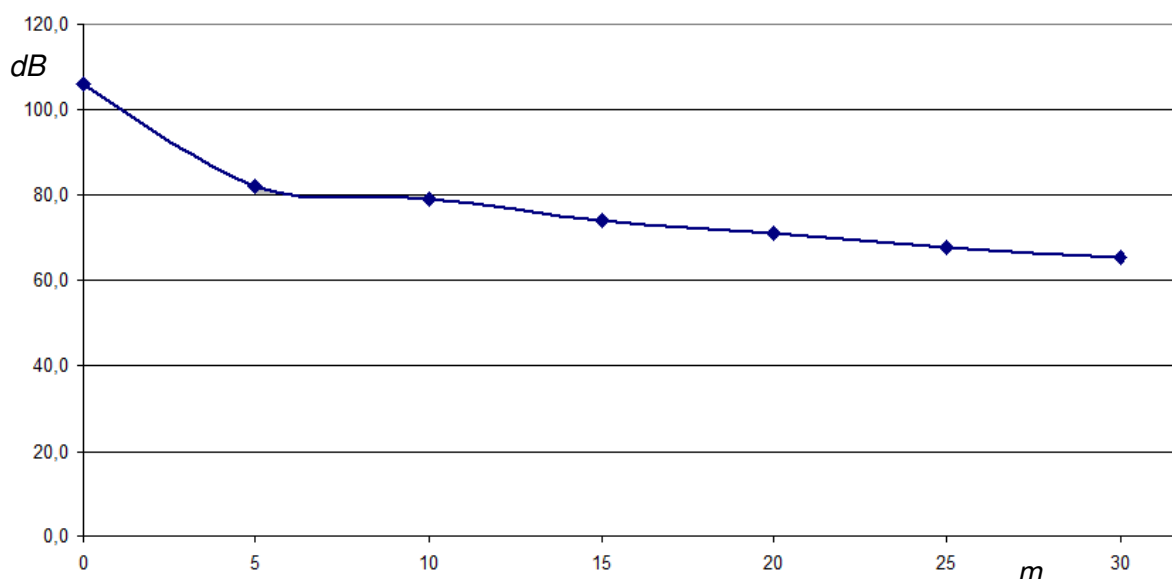


Figura 47 – Nível de ruído produzido pelo protótipo em função da distância.

Assim, baseando-se no limite diário de exposição ao ruído contínuo ou intermitente indicado na Norma NR-15 (MTPS, 2016) para uma jornada de trabalho de 8 horas, o operador do sistema deve estar a mais de 5 metros do equipamento. É importante salientar que o nível de ruído gerado somente pelo atomizador (105 dB) permitiria que um trabalhador o utilizasse somente 30 minutos diariamente de acordo com essa norma.

A máxima distância entre a câmera (montada no protótipo) e o tablet (utilizado pelo operador) na qual houve a captação de imagens nítidas foi 42 metros com os equipamentos utilizados. Uma alternativa para que o operador visualize os movimentos do pulverizador autopropelido em distâncias consideravelmente maiores seria a utilização de sistemas do tipo FPV (*First Person View*), bastante popularizados em função do aeromodelismo.

Neste tipo de solução, um conjunto dedicado de transmissor e receptor de vídeo (Figura 48), operando usualmente nas faixas de 2,4 ou 5,8 GHz, envia as imagens captadas por uma câmera de pequenas dimensões para um monitor de vídeo portátil de alta luminosidade (Figura 49). A distância entre os dispositivos nesse caso pode ser de várias centenas de metros de acordo com os modelos utilizados (HOBBYKING, 2016).



Figura 48 – Transmissor e receptor para sinais de vídeo – FPV (HOBBYKING, 2016).



Figura 49 – Câmera de vídeo e monitor de alta luminosidade (HOBBYKING, 2016).

A velocidade média do ar na saída do atomizador, determinada a partir dos doze pontos medidos conforme as indicações de Mesquita; Guimarães; Nefussi (1985), foi $50,69 \text{ m s}^{-1}$.

4.2 – Experimento de pulverização a campo

O volume de vegetação (TRV) da lavoura de tomate onde o experimento em campo ocorreu, que adotava o Sistema Viçosa de espaçamento (ALMEIDA *et al.*, 2015), foi calculado considerando a sua altura igual a 0,4 m (1/3 da altura total da planta), a sua largura igual a 0,5 m e a distância entre as linhas igual a 1,0 m (pulverização só em um lado da faixa de plantio a cada passada). O valor encontrado utilizando-se a Equação 19 foi $2.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

De acordo com Courshee (1960), não há uma relação entre volume aplicado e o resíduo de produto na planta. Como também a pulverização com um atomizador nesse tipo de aplicação tende a ser mais eficiente do que a realizada com um pulverizador hidráulico, já que no primeiro caso as gotas da calda são transportadas e no segundo caso elas são projetadas, optou-se por um índice volumétrico baixo (50 mL m^{-3}) por volume de vegetação de acordo com a Tabela 1.

Assim, o volume de pulverização por área (Q_A) encontrado utilizando-se a Equação 20 foi 100 L ha^{-1} . A vazão de calda (q_T) na saída do atomizador necessária para produzi-lo foi então calculada com o protótipo deslocando-se em 1ª marcha ($1,94 \text{ km/h}$). O valor encontrado utilizando-se a Equação 21 foi $0,330 \text{ L min}^{-1}$.

As condições atmosféricas no momento da pulverização eram:

- *Velocidade do vento* $\rightarrow v = 3,2 \text{ km h}^{-1}$
- *Temperatura* $\rightarrow T = 26,8 \text{ }^\circ\text{C}$
- *Umidade relativa* $\rightarrow \text{UR} = 74\%$

A Figura 50 mostra em detalhe uma etiqueta hidrossensível fixada num tomateiro depois da pulverização e antes da sua remoção. Os resultados obtidos na análise dessas etiquetas com o software *Image Tool* após a pulverização são mostrados nos Quadros 7 e 8, sendo que as siglas *E1*, *E2*, *E3*, *E4*, *I1*, *I2* e *CT* referem-se às posições de colocação das etiquetas nos tomateiros, conforme mostrado na Figura 51.



Figura 50 – Detalhe de uma etiqueta fixada no tomateiro antes da sua remoção.

As medidas de posição e dispersão para os dados de cobertura e densidade de gotas estão no Quadro 9. Como a média aritmética, a mediana e a moda dos dois parâmetros analisados resultaram em valores próximos entre si, há uma tendência de uma distribuição simétrica das observações, e elas também tendem a ter uma boa homogeneidade, já que os seus coeficientes de variação estão na faixa de 10 a 20% (GARCIA, 1989).

Quadro 7 – Cobertura (%) encontrada na análise das etiquetas

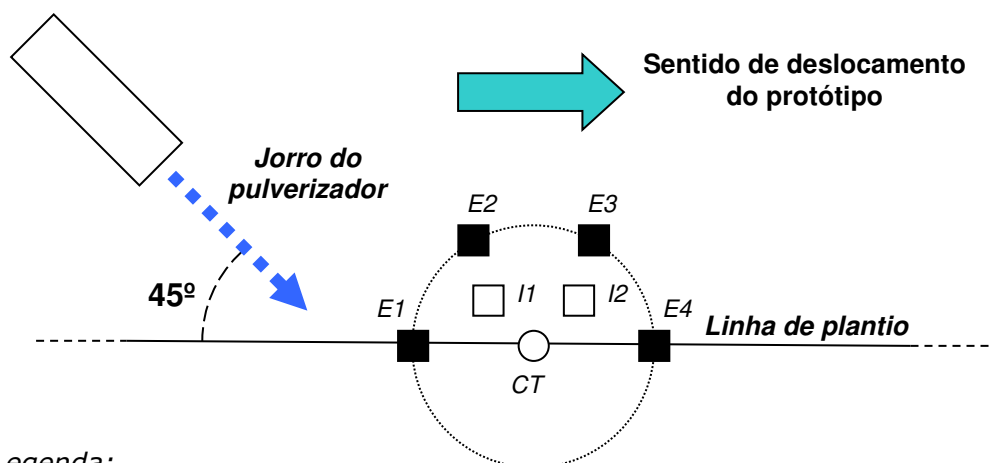
Observação	Posição da Etiqueta						
	E1	E2	E3	E4	I1	I2	CT
1	12,1060	13,8002	12,9782	11,9519	12,0135	12,5997	10,7092
2	10,0918	12,0422	10,5879	8,6434	11,0987	10,8094	8,5391
3	13,4817	14,5088	14,3163	12,4090	13,7223	14,0997	11,9089
4	10,7531	12,0469	12,2487	10,7485	10,9142	11,4687	10,1777
5	9,8171	11,7595	10,9782	8,6848	10,3347	10,4402	9,8742
6	10,9660	12,2764	11,9015	11,4045	12,0203	11,2096	10,3885
7	8,8495	10,2701	10,2191	8,3174	8,6735	9,7419	8,1507
8	13,8045	15,3519	15,2043	12,6675	14,3627	14,1134	12,4291
9	10,3843	11,3249	11,3448	9,7632	10,6546	10,7242	8,3935
10	12,1385	13,4799	13,5469	10,7813	13,3234	12,8207	10,4939

Quadro 8 – Densidade (nº de gotas por cm²) encontrada na análise das etiquetas

Observação	Posição da Etiqueta						
	E1	E2	E3	E4	I1	I2	CT
1	47,7963	63,8068	58,1463	55,3041	70,5125	50,9522	54,6847
2	50,0825	44,0537	58,3336	51,0344	65,0463	61,6816	45,4615
3	84,4081	76,4908	64,7055	68,2065	61,3400	65,8861	65,2493
4	57,5930	54,2429	50,2387	66,2112	59,4726	52,4907	37,4576
5	65,4348	67,3708	53,1557	45,0865	62,1248	47,7446	57,8185
6	62,7743	52,5095	57,0279	68,5409	62,1646	51,7193	49,6492
7	40,2283	56,8486	47,6420	35,9215	49,7501	36,4440	45,1076
8	64,9147	83,7607	70,9189	65,6654	62,3895	60,5022	70,6977
9	59,0688	60,2344	57,4300	37,5147	53,2468	55,5094	37,5955
10	43,5296	59,7586	68,3725	43,9602	50,1836	51,2937	43,9192

Quadro 9 – Medidas descritivas para os dados de cobertura e densidade de gotas

Medida Descritiva	Cobertura (%)	Densidade (gotas cm⁻²)
<i>Média Aritmética</i>	11,48	56,52
<i>Mediana</i>	11,34	57,23
<i>Moda (Pearson)</i>	11,03	58,65
<i>Variância</i>	3,02	111,72
<i>Desvio-Padrão</i>	1,73	10,56
<i>Coeficiente de Variação (%)</i>	15,13	18,70



Legenda:

E1, E2, E3 e E4 - Posições externas
 I1 e I2 - Posições intermediárias
 CT - Centro da planta

Figura 51 – Regiões de colocação das etiquetas nos tomateiros.

Os índices de assimetria de Pearson para a cobertura e para a densidade de gotas foram +0,26 e -0,20, respectivamente. Esses valores calculados são próximos de zero e também indicam uma tendência de simetria na distribuição dos dados coletados.

A homogeneidade na distribuição das observações está possivelmente relacionada com a utilização de um pulverizador pneumático de acordo com Marti *et al.* (2006), já que assistência do fluxo de ar tende a facilitar a penetração das gotas no dossel de uma planta quando comparada com um pulverizador hidráulico (BERNARDES *et al.*, 2014).

Com os valores do Quadro 9, foi possível construir um intervalo de confiança (IC) para a densidade de gotas com um nível de confiança de 95%, mostrado a seguir:

$$IC(\mu)_{95\%}: 56,52 \pm 6,55 \text{ gotas cm}^{-2}$$

Esse intervalo de confiança indica que se forem realizados outros experimentos em condições semelhantes, há 95% de confiança que a média aritmética das suas densidades esteja no intervalo de 49,97 a 63,07 gotas cm^{-2} . Assim, o protótipo, com os ajustes realizados para esse experimento, poderia ser empregado para a fazer a pulverização de um fungicida de acordo com a Tabela 2.

Os resultados apresentados no Quadro 10 indicam as áreas dos folíolos coletados nas sete regiões especificadas (E1, E2, E3, E4, I1, I2 e CT) em cada tomateiro conforme mostrado na Figura 51. No Quadro 11 estão as absorvâncias para as soluções de lavagem desses folíolos medidas com o espectrofotômetro.

Quadro 10 – Área (cm²) dos folíolos coletados

Observação	Posição do Folíolo						
	E1	E2	E3	E4	I1	I2	CT
1	72,46	94,50	99,54	108,22	103,69	68,38	110,75
2	101,06	97,95	103,75	96,12	54,81	96,25	118,47
3	75,26	83,73	102,09	118,94	71,40	88,88	114,50
4	52,64	76,58	69,74	84,93	102,11	81,43	53,60
5	45,31	90,33	110,94	82,34	91,49	68,23	107,53
6	72,12	100,58	108,85	82,47	95,14	70,32	85,46
7	62,97	102,76	86,45	116,58	117,45	80,02	101,02
8	55,48	62,49	82,92	84,72	82,84	91,16	96,58
9	103,47	63,95	89,13	96,30	97,27	110,07	99,08
10	95,58	100,29	108,98	88,29	98,24	68,74	105,32

Quadro 11 – Absorbância das soluções de lavagem dos folíolos

Observação	Posição do Folíolo						
	E1	E2	E3	E4	I1	I2	CT
1	0,227	0,331	0,350	0,334	0,360	0,220	0,335
2	0,211	0,252	0,233	0,178	0,109	0,218	0,259
3	0,257	0,311	0,396	0,430	0,257	0,315	0,356
4	0,150	0,252	0,234	0,250	0,343	0,258	0,146
5	0,082	0,232	0,258	0,150	0,191	0,151	0,230
6	0,214	0,351	0,370	0,225	0,318	0,216	0,259
7	0,149	0,296	0,243	0,261	0,302	0,215	0,245
8	0,188	0,236	0,324	0,292	0,292	0,340	0,340
9	0,313	0,210	0,286	0,271	0,297	0,358	0,303
10	0,285	0,325	0,351	0,264	0,309	0,209	0,307

A curva de calibração para o espectrofotômetro com a solução utilizada para pulverização (água + corante alimentício azul) é mostrada na Figura 52. Com ela, determinou-se a concentração das soluções de lavagem dos folíolos, mostrada no Quadro 12. Já deposição do corante nos folíolos, calculada a partir desses valores, é mostrada no Quadro 13.

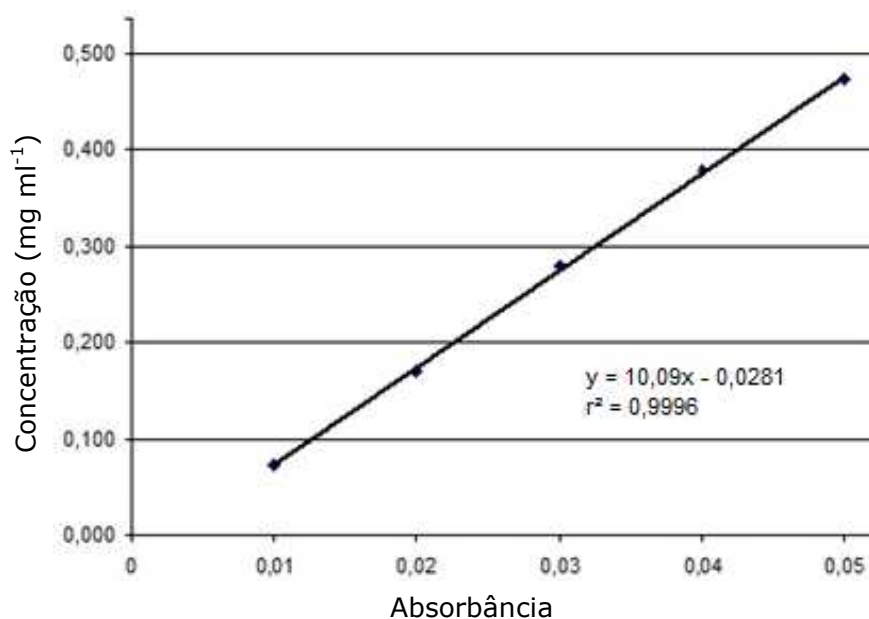


Figura 52 – Curva de calibração para o espectrofotômetro.

Quadro 12 – Concentração (mg mL⁻¹) das soluções de lavagem dos folíolos

Observação	Posição do Folíolo						
	E1	E2	E3	E4	I1	I2	CT
1	0,0253	0,0356	0,0374	0,0359	0,0385	0,0246	0,0360
2	0,0237	0,0278	0,0259	0,0205	0,0136	0,0244	0,0285
3	0,0283	0,0336	0,0420	0,0454	0,0282	0,0340	0,0380
4	0,0176	0,0277	0,0260	0,0275	0,0368	0,0284	0,0172
5	0,0110	0,0258	0,0284	0,0177	0,0217	0,0178	0,0256
6	0,0240	0,0376	0,0395	0,0251	0,0343	0,0242	0,0285
7	0,0176	0,0322	0,0269	0,0287	0,0327	0,0241	0,0271
8	0,0215	0,0261	0,0349	0,0318	0,0318	0,0365	0,0365
9	0,0338	0,0236	0,0311	0,0296	0,0322	0,0383	0,0329
10	0,0310	0,0350	0,0376	0,0290	0,0334	0,0235	0,0333

As medidas de posição e dispersão para os dados de deposição estão no Quadro 14. Assim como ocorreu com os resultados da cobertura e da densidade de gotas, a média aritmética, a mediana e a moda dos valores de deposição também foram próximas entre si, indicando uma tendência de simetria na distribuição das observações, sendo que elas também tendem a ter uma boa homogeneidade já que o seu coeficiente de variação está na faixa de 10 a 20% (GARCIA, 1989).

Quadro 13 – Deposição ($\mu\text{g cm}^{-2}$) de corante alimentício nos folíolos.

Observação	Posição do Folíolo						
	E1	E2	E3	E4	I1	I2	CT
1	13,9772	15,0699	15,0436	13,2561	14,8337	14,3952	13,0028
2	9,3924	11,3546	9,9768	8,5137	9,934	10,1368	9,623
3	15,022	16,0469	16,4613	15,2625	15,8083	15,2975	13,2872
4	13,4064	14,4827	14,8886	12,961	14,4115	13,9277	12,8587
5	9,6694	11,4207	10,2218	8,5861	9,4856	10,4218	9,508
6	13,3068	14,9597	14,5113	12,1632	14,4288	13,7423	13,321
7	11,1695	12,5204	12,434	9,841	11,1496	12,0639	10,7182
8	15,4656	16,7357	16,8274	14,9944	15,3363	15,9977	15,1099
9	13,0573	14,7695	13,9702	12,2999	13,2488	13,918	13,2663
10	12,9681	13,9403	13,7958	13,1242	13,6003	13,6758	12,6284

Quadro 14 – Medidas descritivas para os dados de deposição

Medida Descritiva	Deposição ($\mu\text{g cm}^{-2}$)
<i>Média Aritmética</i>	8,18
<i>Mediana</i>	8,14
<i>Moda (Pearson)</i>	8,05
<i>Variância</i>	1,86
<i>Desvio-Padrão</i>	1,36
<i>Coefficiente de Variação (%)</i>	16,68

O índice de assimetria de Pearson para a deposição foi +0,10. Esse valor calculado é próximo de zero e também indica uma tendência de simetria na distribuição dos dados coletados.

Os coeficientes de correlação linear entre pares das variáveis avaliadas no experimento a campo são:

$$\circ r_{\text{Cobertura, Densidade}} = 0,6536$$

$$\circ r_{\text{Densidade, Deposição}} = 0,4577$$

$$\circ r_{\text{Deposição, Cobertura}} = 0,7987$$

Esses valores indicam, segundo Shimakura (2016), que há uma correlação linear positiva forte entre a deposição e a cobertura (valor na faixa de 0,70 a 0,89) e uma correlação linear positiva moderada entre a cobertura e a densidade e entre a densidade e a deposição (valores na faixa de 0,40 a 0,69).

O espectro de gotas produzido pelo atomizador e identificado pelo analisador de partículas a laser é mostrado no Quadro 15. Foram realizadas três repetições, sendo que o coeficiente de homogeneidade (CH) e a amplitude relativa (SPAN) de cada uma delas e da média aritmética para essas repetições são mostrados no Quadro 16.

Quadro 15 – Composição do volume pulverizado (%) em função do diâmetro das gotas

% do volume de gotas	Repetições		
	1	2	3
%V < 100 µm	28,51	24,86	28,93
100 µm < %V < 150 µm	14,38	13,61	15,7
150 µm < %V < 200 µm	10,61	11,56	10,51
200 µm < %V < 250 µm	8,096	9,329	7,686
250 µm < %V < 300 µm	6,104	7,144	5,912
300 µm < %V < 350 µm	4,505	5,261	4,586
350 µm < %V < 400 µm	3,627	3,765	3,519
400 µm < %V < 450 µm	2,331	2,621	2,648
450 µm < %V < 500 µm	1,649	1,781	1,954
%V > 500 µm	20,55	20,07	18,55

Quadro 16 – Parâmetros para avaliação da pulverização

Parâmetro	Repetições			Média
	1	2	3	
$D_{0,1}$ (µm)	53,2	54,1	55,7	54,3
$D_{0,5}$ (µm)	182,0	199,9	173,3	185,1
$D_{0,9}$ (µm)	1359,0	1396,0	1262,0	1339,0
CH (adimensional)	0,910	0,999	0,867	0,925
SPAN (adimensional)	7,175	6,713	6,961	6,950

Como as gotas com o diâmetro inferior a 100 µm tendem a serem arrastadas pelo vento, os valores obtidos nos testes indicam que em média 27,43% das gotas produzidas pelo atomizador podem sofrer deriva, sendo que há também uma não homogeneidade na população de gotas porque a amplitude relativa média (SPAN) calculada ficou distante da unidade.

5 – CONCLUSÕES

O protótipo do pulverizador autopropelido realizou uma pulverização em uma lavoura de tomate quando era controlado e monitorado à distância por um operador, demonstrando assim a viabilidade técnica do projeto e da construção de uma máquina agrícola com as características operacionais indicadas (controle e observação remotos via sinais de rádio).

As dimensões externas do protótipo são: 2,02 m (comprimento), 1,00 m (largura) e 1,16 m (altura), sendo que a sua massa total é 212,5 kg considerando o reservatório de calda e o tanque de gasolina do atomizador totalmente abastecidos.

Os raios de giro médios à direita e à esquerda do protótipo foram 2,07 m e 2,09 m, respectivamente, sendo que o índice de simetria do raio de giro (IS_{rg}) foi 0,48%. Os espaços de giro médios à direita e à esquerda foram 4,13 m e 4,29 m, respectivamente, sendo que o índice de relação entre o raio e do espaço de giro (IRE) foi 1,20%.

Os ângulos-limite operacionais de inclinação do protótipo foram: 14,1° (longitudinal em auge), 26,7° (longitudinal em declive) e 26,5° (transversal). Ele desenvolveu uma velocidade de 1,94 km h⁻¹ em 1ª marcha e 3,18 km h⁻¹ em 2ª marcha, sendo que a sua capacidade de trabalho teórica (CT_T) é 0,198 ha h⁻¹ (deslocamento em 1ª marcha).

A autonomia do protótipo em relação ao combustível utilizado pelo atomizador é de 1,26 horas e de 0,87 horas em relação à calda pulverizada. Já em relação aos sistemas eletroeletrônicos, a autonomia da bateria do motor de propulsão é 1,87 horas, enquanto que a autonomia da bateria que alimenta o restante do conjunto é 13,62 horas.

A máxima distância entre o protótipo e o tablet na qual houve a captação de imagens nítidas foi 42 metros, sendo que a partir de 5 metros de separação, o nível de ruído produzido pelo conjunto (83 dB) já é adequado para que o operador cumpra uma jornada de trabalho típica de 8 horas.

Em relação à pulverização em si, os resultados obtidos com o experimento indicaram que o protótipo poderia ser utilizado na aplicação de fungicidas. Os coeficientes de variação obtidos na pulverização a campo foram: 15,13% na cobertura da pulverização; 18,70% na densidade de gotas e 16,68% na deposição de produto nos folíolos.

Por fim, já que o tema da aplicação de fitossanitários utilizando-se máquinas agrícolas remotamente controladas é muito significativo e abrange várias possibilidades de ampliação da pesquisa realizada neste trabalho, apresentamos as seguintes sugestões de linhas de pesquisa para trabalhos futuros:

- Inserção computacional de elementos de realidade aumentada nas imagens fornecidas ao operador
- Montagem de sensores para a medição e transmissão em tempo real de parâmetros operacionais do sistema (velocidade do trator, carga das baterias, volume de calda no reservatório, etc...)
- Utilização de sensores para avaliar as condições ambientais (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento), permitindo ou não que a pulverização ocorra em função dos valores medidos
- Emprego de sensores para avaliar as inclinações longitudinal e transversal do protótipo, indicando para o operador a possibilidade de deslizamento e/ou tombamento da máquina
- Movimentação transversal do bocal do atomizador durante o deslocamento do protótipo para a pulverização
- Modificação do subsistema de propulsão para a utilização de um motor com escovas de corrente contínua, permitindo o controle à distância da velocidade e do sentido de deslocamento do protótipo
- Substituição da eletroválvula do tipo liga-desliga (*on-off*) por uma outra do tipo proporcional e adequação do subsistema de pulverização para que operador possa comandar essa etapa com maior flexibilidade à distância

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMIDES, George; CHRISTOU, Georgios; KATSANOS, Christos; XENOS, Michalis; KOSTARAS, Nektarios; HADZILACOS, Thanasis; EDAN, Yael. **A reality-based interaction interface for an agricultural teleoperated robot sprayer**. In: Second International Conference on Robotics and Associated High-Technologies and Equipment for Agriculture and Forestry. Madrid, 2014.
- ALMEIDA, V. S.; SILVA, D. J. H.; GOMES, C. N.; ANTÔNIO, A. C.; MOURA, A. D.; LIMA, A. L. R. **Sistema Viçosa para o cultivo de tomateiro**. Horticultura Brasileira, vol. 33, nº 1, 2015.
- AMCA – Air Moving and Conditioning Association, Inc. **AMCA/ANSI Standard 210-99**. Arlington Heights, 2000.
- ARAÚJO, Adélia C. P.; NOGUEIRA, Diogo P.; AUGUSTO, Lia G. S. **Impacto dos praguicidas na saúde: estudo da cultura de tomate**. Saúde Pública, vol. 34, nº 3, p. 309-313, 2000.
- BALL, David; ROSS, Patrick; ENGLISH, Andrew; PATTEN, Tim; UPCROFT, Ben; FITCH, Robert; SUKKARIEH, Salah; WYETH, Gordon; CORKE, Peter. **Robotics for Sustainable Broad-Acre Agriculture**. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 105, p. 439-453, 2015.
- BERNARDES, A. M.; TEIXEIRA, M. M.; PICANÇO, M. C., QUIRINO, A. L. S.; MACIEL, C. F. S.; SANTIAGO, H. **Espectrofotometria da deposição de agrotóxico no dossel do tomateiro**. Varia Scientia Agrárias, vol. 4, nº 1, p. 93-104, 2014.
- BHATT, M. H.; ELIAS, M. A.; MANDOKI, A. K. **Acute and reversible parkinsonism due to organophosphate pesticide intoxication**. Neurology, vol. 52, nº 7, p. 67-71, 1999.
- BLACKMORE, B. S.; GRIEPENTROG, H. S.; NIELSEN, H.; NORREMARK, M.; RESTING-JEPPESEN, J. **Development of a deterministic autonomous tractor**. In: CIGR International Conference. CIGR, 2004.
- CAVALIERI, Jhonatan D.; RAETANO, Carlos G.; MOREIRA, Laís L. Q.; MADUREIRA, Ronaldo P. **Spraying systems and traveling speed in the deposit and spectrum of droplets in cotton plant**. Engenharia Agrícola, vol. 35, nº 6, p. 1042-1052, 2015.
- CHUDAKOV, D. A. **Fundamentos de la teoria y el cálculo de tractores y automóveis**. Moscou: Mir Publishers, 1977.
- CHAIM, Aldemir. Tecnologia de Aplicação de Agrotóxicos: **Fatores que afetam a eficiência e o impacto ambiental**. In: SILVA, Célia Maria Maganhotto de Souza; FAY, Elisabeth Francisconi. (Ed.). *Agrotóxicos e Ambiente*. Jaguariúna: Embrapa Informação Tecnológica, 2012.

- CONESA-MUÑOZ, Jesus; VALENTE, João; DEL CERRO, Jaime; BARRIENTOS, Antonio; RIBEIRO, Ângela. **Integrating Autonomous Aerial Scouting with Autonomous Ground Actuation to Reduce Chemical Pollution on Crop Soil**. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 418, p. 41-53, 2015.
- COURSHEE, R. J. **Some aspects of the application of insecticides**. *Annual Review of Entomology*, Palo Alto, vol. 5, p. 327-352, 1960.
- DANIELSSON, Peter. **Teleoperated tractor: development of a graphical user interface**. 46 páginas. Dissertação de Mestrado. Lulea Tekniska Universitet (LTU), 2008.
- DONG, Jieli. **Network Dictionary**. Pequim: Javvin Press, 2007.
- FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, César; DORADO, José; GONZALEZ-DE-SOTO, Pablo; RIBEIRO, Ângela. **Using a fleet of robots for patch spraying**. In: 17th European Weed Research Society Symposium. EWRS, 2015.
- FERREIRA, Sila Mary Rodrigues; FREITAS, Renato João Sossela de; LAZZARI, Elisa Noemberg. **Padrão de identidade e qualidade do tomate (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) de mesa**. *Ciência Rural*, vol. 34, n° 1, p. 329-335, 2004.
- GARCIA, C.H. **Tabelas para classificação do coeficiente de variação**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – Circular Técnica N° 171. Piracicaba: IPEF, 1989.
- GOMEZ-GIL, J.; SAN-JOSE-GONZALEZ, I.; NICOLAS-ALONSO, L. F.; ALONSO-GARCIA, S. **Steering a tractor by means of an EMG-based Human-Machine Interface**. *Sensors*, vol. 11, n° 7, p. 7110-7126, 2011.
- GONZALEZ-DE-SOTO, Mariano; GARCIA, Isaias; GONZALEZ-DE-SANTOS, Pablo; EMMIA, Luís. **Reducing fuel consumption in weed and pest control using robotic tractors**. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 114, p. 96–113, 2015.
- GOPRO – GoPro Incorporation. **Site Institucional**. Disponível em: <<http://www.gopro.com>>. Acesso em: 01/09/2016.
- GRAVENA, S.; BENVENGA, S. R. **Manual prático para manejo de pragas do tomate**. Jaboticabal: Funep, 2003.
- GUARANY – Guarany Indústria e Comércio Ltda. **Pulverizador Pneumático Motorizado**. Disponível em: <http://www.guaranyind.com.br/equipamentos/agricultura-e-horticultura/atomizador-costal-motorizado-18l>>. Acesso em: 01/09/2016.
- HARRIES, G. O.; AMBLER, B. **Automatic ploughing: A tractor guidance system using opto-electronic remote sensing techniques and a microprocessor based controller**. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 26, n° 1, p. 33-53, 1981.
- HOBBYKING – HobbyKing International Incorporation. **Site Institucional**. Disponível em: <<http://www.hobbyking.com>>. Acesso em: 01/09/2016.

- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Dados da produção nacional de tomate**. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, vol. 29, nº 5, p. 74-75, 2016.
- KEIFER M.; MAHURIN, R. **Chronic neurological effects of pesticides overexposure**. Journal of Occupational & Environmental Medicine, nº 12, p. 291-304, 1997.
- LEITE, Fabrício. **Construção de um inclinômetro para avaliar o efeito da declividade lateral no desempenho de tratores agrícolas**. 116 páginas. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, 2007.
- LIMA, J. S. S.; SOUZA, A. P.; MACHADO, C. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; AREAS, M. L. **Estimativa das estabilidades longitudinal e transversal de tratores florestais utilizados na colheita de madeira**. Revista Árvore, vol. 28, nº 6, p. 839-844, 2004.
- LONDON, L.; NELL, V.; THOMPSON, M. L.; MYERS, J. E. **Effects of long term organophosphate exposure on neurological symptoms, vibration sense and tremor among South African farmer workers**. Scand J. Work Environ Health, vol. 24, nº 1, p. 18-29, 1998.
- MALVERN – Malvern Instruments Ltd. **Site Institucional**. Disponível em: <<http://www.malvern.com>>. Acesso em: 01/09/2016.
- 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**. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 3, nº 4, p. 18-28, 1996.
- MARTI, S. P.; POLO, J. R. R.; MOYA, E. G.; MONTEROLA, L. V.; ESCOLA, A. **Optimizing pesticide spray application in tree crops**. Paper nº 061128. St. Joseph. Mich: ASABE, 2006.
- MELO, Paulo César T. de; VILELA, Nirlene Junqueira. **Desafios e perspectivas para a cadeia brasileira do tomate para processamento industrial**. Horticultura Brasileira, vol. 23, nº 1, p. 154-157, 2005.
- MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. **Engenharia de ventilação industrial**. São Paulo: Convênio Cetesb/Ascetesb, 1985.
- MIALHE, L. G. **Máquinas Agrícolas: Ensaios & Certificações**. Piracicaba: FEALQ, 1996.
- MIYADAIRA, Alberto Noboru. **Microcontroladores PIC18: aprenda e programe em linguagem C**. São Paulo: Érica, 2012.
- MOLIN, J. P.; ZAMBUZI, P. C.; ARAUJO, J. C.; PEREIRA, F. J. S. **Ensaio de características dimensionais, ponderais e de desempenho na barra de tração de um quadriciclo**. Engenharia Agrícola, vol. 22, p. 276-287, 2002.

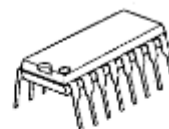
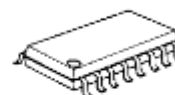
- MTPS – Ministério do Trabalho e Previdência Social. **Norma Regulamentadora N° 15 – Anexo I (Atividades e Operações Insalubres)**. Brasil, 2016.
- MUKHOPADHYAY, S. C.; SEN GUPTA, G.; HOWARTH, J. W. **Embedded micro-controller and sensors based front end loader control system**. In: Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceeding - IMTC 2008. IEEE, 2008.
- MURAKAMI, N.; ITO, A.; WILL, J. D.; STEFFEN, M.; INOUE, K.; KITA, K.; MIYAURA, S. **Development of a teleoperation system for agricultural vehicles**. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 63, n° 1, p. 81–88, 2008.
- NAKANO, O. **As pragas das hortaliças: seu controle e o selo verde**. Horticultura Brasileira, vol. 17, n° 1, p. 4-5, 1999.
- OLIVEIRA-SILVA, J. J.; MEYER, A.; MOREIRA, J. C. **Cholinesterase activities determination in frozen blood samples: An improvement to the occupational monitoring in developing countries**. Human & Environ Toxicology, n° 19, p. 173-177, 2000.
- PALIPANA, S.; MALASINGHE, U.; WIJENAYAKA, P.; MUNASINGHE, S. R.. KAPUKOTUWE, C. **Localization of a mobile robot using ZigBee based optimization techniques**. In: Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), 2012 IEEE 6th International Conference on. IEEE, 2012.
- PALLADINI, Luiz Antônio; RAETANO, Carlos Gilberto; VELINI, Edivaldo. **Choice of tracers for the evaluation of spray deposits**. Scientia Agricola, vol. 62, n° 5, p. 440-445, 2005.
- PENIDO, Édilus de Carvalho Castro. **ENERGILAR – Um controlador de cargas domiciliares para a melhoria da sustentabilidade das residências brasileiras**. 118 páginas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 2013.
- PENTAIR – Pentair Hypro Incorporation. **Site Institucional**. Disponível em: <<http://www.hypropumps.com/>>. Acesso em: 01/09/2016.
- PÉREZ-RUIZ, M.; GONZALEZ-DE-SANTOS, P.; FERNANDEZ-QUINTANILLA, C.; RIBEIRO, A.; PERUZZI, A.; VIERI, M.; TOMIC, S.; AGÜERA, J. **Highlights and preliminary results for autonomous crop protection**. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 110, p. 150–161, 2015.
- PESSINI, Milena Martins de Oliveira. **Resíduos de Acetamiprid e Thiamethoxam em tomate estaqueado (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) em diferentes modalidades de aplicação**. 71 páginas. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo (USP), 2003.
- PICANÇO, Marcelo C.; PAULA, Silvana V. de; MORAES JR., Antônio R.; OLIVEIRA, Ivênio R. de; SEMEÃO, Altair A.; ROSADO, Jander F. **Impactos financeiros da adoção de manejo integrado de pragas na cultura do tomateiro**. Acta Scientiarum Agronomy, vol. 26, n° 2, p. 245-252, 2004.

- PRANAV, P. K.; TEWARI, K. P.; PANDEY, K. P. **Development of Electronic Ground Speed Sensor for Tractors**. Journal of Agricultural Engineering, vol. 52, nº 3, p. 46-50, 2015.
- QUIRINO, A. L. S. **Parâmetros técnicos para aplicação do *Glyphosate* visando o aumento da eficácia segurança ambiental e do aplicador**. 75 páginas. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2010.
- RAHEMAN, H.; JHA, S. K. **Wheel slip measurement in 2WD tractor**. Journal of terramechanics, vol. 44, nº 1, p. 89-94, 2007.
- RASI, José Roberto. **Sistema de pulverização de lavouras por meio de aeromodelo de asa fixa telecomandado**. Brasil – Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI), nº do pedido PI 0404045-7 B1, 2004.
- REHMAN, Abdul; JINGDONG, Luan; KHATOON, Rafia; HUSSAIN, Imran. **Modern Agricultural Technology Adoption its Importance, Role and Usage for the Improvement of Agriculture**. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, vol. 16, nº 2, p. 284-288, 2016.
- RIBEIRO, A.; FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C.; DORADO, J.; PÉREZ-RUIZ, M.; CONESA-MUÑOZ, J.; LÓPEZ-GRANADOS, F.; PEÑA, J. M.; RABATEL, G.; GONZALEZ-DE-SANTOS, P. **A fleet of aerial and ground robots: a scalable approach for autonomous site-specific herbicide application**. Precision Agriculture '15, p. 167- 173, 2015.
- RODRIGUES, Denílson Eduardo. **Fontes alternativas de energias utilizadas na propulsão de micro trator agrícola para o processamento de café em terreiro**. 94 páginas. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2005.
- SASAKI, R. S. **Sistema eletrônico para captura de gotas visando aumentar a eficiência na pulverização eletrostática**. 85 páginas. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2012.
- SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E. **Redes de comunicação serial em máquinas agrícolas: uma revisão**. Revista Brasileira de Agroinformática, vol. 8, nº 1, p. 17-35, 2006.
- SHERIDAN, T. B. **Telerobotics**. Automatica, vol. 25, nº 4, p. 487-507, 1989.
- SHIMAKURA, Sílvia Emiko. **CEE-003 Estatística II – Universidade Federal do Paraná**. Disponível em: < <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>>. Acesso em: 01/09/2016.
- SILVEIRA, Paulo R. da; SANTOS, Winderson E. **Automação e Controle Discreto**. São Paulo: Érica, 2009.

- STEFFEN, M. A.; WILL, J. D.; MURAKAMI, N. **Use of virtual reality for teleoperation of autonomous vehicles**. *In*: American Society of Agricultural and Biological Engineers Biological Sensorics Conference, 2008.
- STENTZ, Anthony; WELLINGTON, Carl; HERMAN, Herman; STAGER, David; DIMA, Cristian. **A System for Semi-Autonomous Tractor Operations**. *Autonomous Robots*, vol. 13, p. 87-104, 2002.
- TEWARI, Virendra Kumar. **Application of Microcontroller Interfaced with DGPS for Variable Rate Fertilizer Applicator**. *In*: Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers. ASABE, 2015.
- TURNIGY – Turnigy Power Systems. **Site Institucional**. Disponível em: <<http://www.turnigy.com/>>. Acesso em: 01/09/2016.
- VARELLA, Carlos Alberto Alves; KHOURY Jr., Joseph Kalil. **Estabilidade de Tratores Agrícolas de Pneus**. IT 154 - Motores e Tratores. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.
- VIGANO, Leopoldo L. S.; RAETANO, Carlos G. **Assistência de ar e volumes de aplicação na deposição de calda e no controle do arroz vermelho (*Oryza sativa* L.)**. *Engenharia Agrícola*, vol. 27, n° 3, p. 734-741, 2007.
- VIRGINIA AND WEST VIRGINIA COOPERATIVE EXTENSION SERVICES. **Spray Bulletin for Commercial Tree Fruit Growers**. Morgantown: West Virginia University, 1989.
- WATTHANAWISUTH, N.; TONGROD, N.; KERDCHAROEN, T.; TUANTRANONT, A. **Real-time monitoring of GPS-tracking tractor based on ZigBee multi-hop mesh network**. *In*: Electrical Engineering Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference on. IEEE, 2010.
- WIDDEN, M. B.; BLAIR, J. R. **A new automatic tractor guidance system**. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 17, n° 1, p. 10-21, 1972.
- WILSON, J. N. **Guidance of agricultural vehicles – a historical perspective**. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 25, p. 3-9, 2000.
- ZHANG, C.; NOGUCHI, N.; YANG, L. **Leader-follower system using two robot tractors to improve work efficiency**. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 121, p. 269–281, 2016.
- ZHIQIANG, Xi; ZHILI, Zhou. **Design of Powershift Transmission Control System for Tractor Based on DSP**. *In*: 2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies (ACCT). IEEE, 2015.

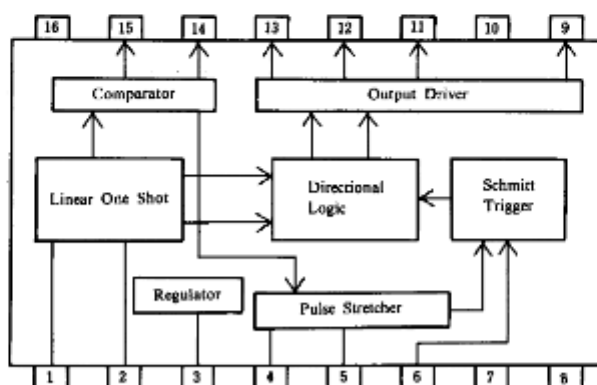
**NJM2611****SERVO MOTOR CONTROLLER****■ GENERAL DESCRIPTION**

The **NJM2611** is an integrated circuit to be applied on servo motor of radio controlled operation. Wide range of operating voltage, and the **NJM2611** has the feature of internal circuit of maintaining constant voltage which helps stabilizing from fluctuation caused by voltage source and the ambient temperature.

■ PACKAGE OUTLINE**NJM2611D****NJM2611M****■ FEATURES**

- Wide Operating Voltage
- Setting up the dead band by the internal constant
- Internal Output NPN Power Transistor
- Internal Constant Voltage Circuit
- Package Outline
- Bipolar Technology

DIP16, DMP16

■ BLOCK DIAGRAM**NJM2611D / M**



VN3SP30-E

Automotive fully integrated H-bridge motor driver

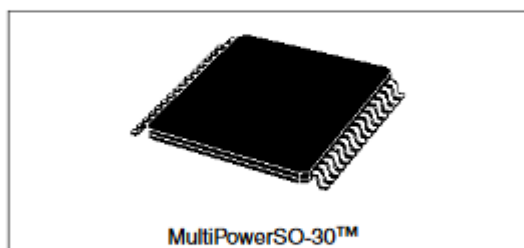
Features

Type	$R_{DS(on)}$	I_{out}	V_{CCmax}
VN3SP30-E	45mΩ max (per leg)	30A	40V

- Output current: 30A
- 5V logic level compatible inputs
- Undervoltage and overvoltage shutdown
- Overvoltage clamp
- Thermal shut down
- Cross-conduction protection
- Linear current limiter
- Very low standby power consumption
- PWM operation up to 10 kHz
- Protection against loss of ground and loss of V_{CC}
- Package: ECOPACK®

Description

The VN3SP30-E is a full-bridge motor driver intended for a wide range of automotive applications. The device incorporates a dual monolithic high-side driver (HSD) and two low-side switches. The HSD switch is designed using STMicroelectronics proprietary VIPower™ M0-3 technology that efficiently integrates a true Power MOSFET with an intelligent signal/protection circuit on the same die.



The low-side switches are vertical MOSFETs manufactured using STMicroelectronics proprietary EHD ("STripFET™") process. The three circuits are assembled in a MultiPowerSO-30 package on electrically isolated lead frames. This package, specifically designed for the harsh automotive environment, offers improved thermal performance thanks to exposed die pads. Moreover, its fully symmetrical mechanical design provides superior manufacturability at board level. The input signals IN_A and IN_B can directly interface with the microcontroller to select the motor direction and the brake condition. Pins $DIAG_A/EN_A$ or $DIAG_B/EN_B$, when connected to an external pull-up resistor, enable one leg of the bridge. They also provide a feedback digital diagnostic signal. The normal condition operation is explained in The speed of the motor can be controlled in all possible conditions by the PWM up to kHz. In all cases, a low level state on the PWM pin will turn off both the LS_A and LS_B switches. When PWM rises to a high level, LS_A or LS_B turn on again depending on the input pin state.

Table 1. Device summary

Package	Order codes	
	Tube	Tape & reel
MultiPowerSO-30	VN3SP30-E	VN3SP30TR-E