GIOVANA TRIPOLONI TANGERINO

Sistemas de sensoriamento embarcado para uso em controle de aplicações de insumos agrícolas à taxa variável.

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

Área de concentração: Manufatura
Orientador: Ricardo Yassushi Inamasu

São Carlos

2009

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

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

T164s

Tangerino, Giovana Tripoloni
Sistemas de sensoriamento embarcado para uso em controle de aplicações de insumos agrícolas à taxa variável / Giovana Tripoloni Tangerino ; orientador Ricardo Yassushi Inamasu. -- São Carlos, 2009.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

1. Sensor *on-the-go*. 2. Máquinas agrícolas. 3. Agricultura de precisão. 4. Instrumentação. 5. VRT. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira GIOVANA TRIPOLONI TANGERINO.

Dissertação defendida e julgada em 08/10/2009 perante a Comissão Julgadora:

Aprovada

Prof. Dr. **RICARDO YASSUSHI INAMASU (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **MARCELO BECKER**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **JOÃO DE MENDONÇA NAIME**
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedicatória

Ao meu pai, meu exemplo.

À minha mãe, carinho incondicional.

Aos meus irmãos, amor e força independente da distância.

Aos meus amigos, meu tesouro.

Agradecimentos

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

Ao CNPq pelo apoio financeiro. À USP e à EESC pelo suporte no desenvolvimento do mestrado. À EMBRAPA, Usina São Martinho, Jacto, Terrena pelo apoio no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Yassushi Inamasu, pela orientação e apoio.

Ao Prof. Dr. Arthur José Viera Porto pelas oportunidades oferecidas por meio do Laboratório de Simulação e Controle do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP.

Aos amigos do departamento de Engenharia Mecânica pela amizade, apoio e colaboração em todos os momentos, Beth, Cláudio e Vera.

Ao Prof. Dr. Rafael Vieira de Sousa por ter me recebido como aluna de iniciação científica, pela orientação, apoio e amizade.

Aos amigos do Laboratório de Simulação e Controle, que muitas vezes eram família pelo companheirismo e amizade em tantas horas de trabalho e convívio diário. Aos amigos da pós-graduação do departamento de Engenharia Elétrica pela amizade tão repleta de alegria e companheirismo. Aos tantos amigos conquistados nessa etapa de minha vida e que são parte essencial do que sou, exemplo do que almejo me tornar, riqueza para ser cultivada por toda vida. Monica, Galanzinho (Robson), Duzão, Rubens, Rafinha, Sakai, Bruno, Fernando, Luciano, David, Chin, Márley, Moussa, Suetake, Marceleza, Marcel, Raphael, Daiane, Lito, Renata, Roberta, Alexandre, Denis, Cris, Michellita, Silmarita, e todos aqueles que não foram citados, mas fazem parte da minha vida.

Às amigas Michelle, Débora, Caju (Fernanda), Mônica, e Nathy, que tornaram a minha estadia em São Carlos repleta de vida, alegria e companheirismo, com muitas risadas, muita

pipoca, filminhos e horas de estudo na Rep. Pipoca, e que me deram tantas oportunidades de crescimento através do convívio, com respeito pelas diferenças, com paciência e conselhos.

Aos amigos Moussa, Márley, Suetake, Galanzinho, Marceleza,, Caju, Michelle e Débora pela ajuda essencial na etapa final deste trabalho.

Aos meus pais, Edson e Teresa, aos meus irmãos, Edson Filho, Tatiana e Natália, à minha família Serginho, Priscila, Talita e Gustavo, pelo exemplo, apoio, incentivo, pelo amor incondicional, por serem fonte de minha força para seguir, por serem parte da essência que me construiu, minhas lembranças, minha raiz.

“A oportunidade de vivenciar a si mesmo de modo diferente está sempre disponível”.

Yongey Mingyur Rinpoche

Resumo

TANGERINO, G.T. **Sistemas de sensoriamento embarcado para uso em controle de aplicações de insumos agrícolas à taxa variável**. São Carlos, 123 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

O desenvolvimento de sistemas com capacidade de unir ferramentas tecnológicas é de grande importância para oferecer apoio à Agricultura de Precisão e estimular a criação de grupos interdisciplinares para obter resultados favoráveis à produtividade agrícola. O objetivo desse trabalho é estudar as aplicações de sensoriamento embarcado em máquinas agrícolas, explorando a interface da agricultura com a computação e as engenharias mecânica e elétrica por meio de conceitos e tecnologias de sistemas de medidas. Foram desenvolvidos dois sistemas de sensoriamento embarcados. No primeiro realizou-se coleta de informações sobre refletância e altura das plantas em cultura de cana-de-açúcar. No segundo realizou-se coleta de informações e controle de aplicação de fertilizantes à taxa variável baseado em informações de refletância em cultura de milho. Utilizou-se os sensores Crop Circle (medidas de refletância para monitoramento de *status* da planta), Sonar (medida de altura de plantas) e GPS (Sistema de Posicionamento Global), com os quais foram realizados ensaios para determinar possíveis fontes de erro em uma operação agrícola. Os sistemas desenvolvidos cumpriram o papel de integradores de conhecimento, possibilitando observações práticas sobre necessidades, falhas e acertos no desenvolvimento de sistemas embarcados para uso em aplicações agrícolas.

Palavras chave: Sensor *on-the-go*, máquinas agrícolas, agricultura de precisão, instrumentação, VRT.

Abstract

TANGERINO, G.T. **On board sensing system to control variable rate agricultural inputs.** São Carlos, 123 p. Dissertation (Master of Science) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2009.

The development of systems able to join different technological tools is very important in order to provide support for Precision Agriculture and it stimulates the creation of interdisciplinary teams to obtain favorable results to increase agricultural productivity. The main goal of this work is to study applications of embedded sensing systems in agricultural machines, exploring the interface between computer science, mechanical, electrical, and agricultural engineering using concepts and technologies of measurement systems. It was developed two on board sensing systems. The first system collected the data of crop reflectance and plant height in sugar cane growing area. The second one controlled the variable rate fertilizer distribution based on reflectance of maize crop. Were used the sensors Crop Circle (reflectance to monitor the status of the plant), Sonar (plant height) and GPS (Global Positioning System), which were applied to detect some possible error sources during field operation. The systems developed fulfilled the role of integrating knowledge, providing practical observations about the needs, failures and successes in developing embedded systems for use in agricultural production.

Keywords: On-the-go sensor, agricultural machinery, precision agriculture, instrumentation, VRT.

Lista de figuras

Figura 1.1. Elementos de um sistema embarcado para controle de aplicações agrícolas. Fonte: Prof. Dr. Ricardo Inamasu. 22

Figura 3.1. Distância x Sonar. 44

Figura 3.2. (a) Cor dos papeis utilizados como alvo; (b) Sensores posicionados para a coleta de dados. 45

Figura 3.3. (a) Fundo preto de cartolina; (b) e (c) Faixas de alvo de diferentes larguras posicionadas para a coleta de dados. 46

Figura 3.4. Distância do sensor ao alvo: medida vs real. 48

Figura 3.5. Distância do sensor ao alvo: original vs corrigido. 49

Figura 3.5. Influência da distância da cor, textura e distância do sensor Crop Circle ao alvo. 50

Figura 3.6. Influência da largura do alvo sobre os sensores Crop Circle e Sonar. 52

Figura 4.1. Esquemático de distribuição das variedades de cana-de-açúcar em parcelas e blocos. 58

Figura 4.2. Representação de uma das parcelas. 59

Figura 4.3. Esquema do sistema embarcado no experimento em cana-de-açúcar. 60

Figura 4.4. Equipamento agrícola utilizado no experimento em cana-de-açúcar. 61

Figura 4.5. Adaptação dos sensores ao equipamento agrícola utilizado no experimento em cana-de-açúcar. 62

Figura 4.6. Tela inicial de configuração de portas seriais. 63

Figura 4.7. Diagrama do laço de repetição principal do software para o experimento em cana-de-açúcar. 64

Figura 4.8. Diagrama do bloco de leitura do *software* para o experimento em cana-de-açúcar. 65

Figura 4.9. Diagrama do bloco de gravação do *software* para o experimento em cana-de-açúcar. 66

Figura 4.10. (a) Painel principal do *software* dedicado; (b) Detalhe do programa em execução. 66

Figura 4.11. Área experimental em milho. 69

Figura 4.12. Esquema do sistema embarcado no experimento em milho. 70

Figura 4.13. Uniport 3000 NPK utilizado no experimento em milho..... 71

Figura 4.14. Fotos da adaptação dos sensores ao trator. 72

Figura 4.15. Controle do mecanismo de aplicação (a) início comandado pelo usuário; (b) espera do sistema; (c) produto sendo aplicado..... 74

Figura 4.16. Diagrama do laço de repetição principal do *software* utilizado no experimento com milho. 76

Figura 4.17. Diagrama do bloco de controle da dose de aplicação do *software* utilizado no experimento com milho. 77

Figura 4.18. Diagrama do bloco de comunicação com o controlador NPK do *software* utilizado no experimento com milho. 78

Figura 5.1. Dados de NDVI do sensor Crop Circle no experimento em cana-de-açúcar. 81

Figura 5.2. Dados de altura da planta do sensor Sonar em vinte variedades de cana-de-açúcar. 81

Figura 5.3. Médias por blocos de aplicação e data para (a) NDVI e (b) altura das plantas..... 83

Figura 5.4. NDVI da faixa 1 linha 1 sentido de ida. 86

Figura 5.5. NDVI da faixa 2 linha 1 no sentido de volta. 86

Figura 5.6. Curvas de valor de dose desejada e valor de dose aplicada para faixa 1: taxa variável. (a) ida e (b) volta. 89

Figura 5.7. Curvas de valor de dose desejada e valor de dose aplicada para faixa 3: taxa fixa em 400kg/ha. (a) ida e (b) volta. 90

Figura 5.8. Curvas de valor de dose desejada e valor de dose aplicada para faixa 4: dividida em doses de 400, 300 e 200 kg/ha. (a) ida e (b) volta..... 91

Figura 6.1. Elementos de um sistema embarcado. 95

Figura A.1. (a) NDVI da faixa 1 linha 1; (b) NDVI da faixa 1 linha 2..... 113

Figura A.2. (a) NDVI da faixa 2 linha 1; (b) NDVI da faixa 2 linha 2..... 114

Figura A.3. NDVI da faixa 3 nas linha 1 e 2. 115

Figura A.4. (a) NDVI da faixa 4 linha 1; (b) NDVI da faixa 4 linha 2..... 116

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Tipos de papeis utilizados como alvo. 45

Tabela 3.2 – Média dos dados coletados para cada distância pelo sensor Sonar. Sendo q_r a distância real do sensor ao alvo, e q_o a distância medida pelo sensor. 47

Tabela 3.3 – Coeficiente de correlação entre dados com iluminação e no escuro. 52

Tabela 3.4 – Dados do sensor Crop Circle para diferentes larguras de alvo. 53

Tabela 4.1 – Variedades de cana-de-açúcar. 58

Tabela 4.2 – Datas relacionadas ao experimento: plantio, adubação, cortes e coleta de dados. 59

Tabela 4.3 – Altura dos sensores para coleta de dados. 62

Tabela 5.1 – Resultados de NDVI, médias por blocos e datas. 79

Tabela 5.2 – Resultados de NDVI, médias por blocos de aplicação e datas. 82

Tabela 5.3 – Resultados de altura da planta, médias por blocos aplicação e datas. 82

Tabela 5.4 – Médias de produtividade por blocos. 84

Tabela A.1 – Médias dos resultados de NDVI e altura da planta para cada data de coleta de dados e para cada parcela. 105

Tabela A.2 – Resultados de produtividade da Usina São Martinho. 107

Lista de siglas

AP Agricultura de Precisão

ASPRS *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

CAN *Controller Area Network*

DGPS *Differential Global Positioning System*

DoD Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América

GNSS *Global Navigation Satellite Systems*

GPS *Global Positioning System*

IAF Índice de Área Foliar

ISO11783 *Tractors and machinery for agriculture and forestry – Serial control and communications data network*

N Nitrogênio

NDVI *Normalized Difference Vegetation Index*

NPK Controlador eletrônico de adubação

PSD *Position Sensing Detector*

RFAA Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida

R_{NIR} I*nfrared Band Reflectance*

R_{VIS} V*isible Band Reflectance*

SA *Selective Avaiability*

SIG Sistema de Informação Geográfica

VRT *Variable Rate Technology* (Tecnologia de Aplicação de Insumos à Taxa Variada)

Sumário

1. Introdução 21
1.1. Justificativa 21
1.2. Objetivos 23
1.3. Estrutura do Trabalho 23

2. Revisão Bibliográfica 25
2.1. Tecnologia para agricultura 25
2.1.1. Sensoriamento na agricultura 27
2.2. Trabalhos relacionados 29
2.2.1. Controle 29
2.2.2. Gerenciamento da informação 29
2.2.3. Sensores 31

3. Instrumentação 37
3.1. Crop Circle 37
3.2. Sensores de medida de distância 38
3.3. GPS 40
3.4. Caracterização dos sensores 42
3.4.1. Teste 1: distância x Ultrassom 43
3.4.2. Teste 2: distância, cor, textura x Crop Circle 44
3.4.3. Teste 3: iluminação 45
3.4.4. Teste 4: largura do alvo 45
3.5. Resultados 47

4. Desenvolvimento experimental 55
4.1. Experimento em cana-de-açúcar 55
4.1.1. Objetivo 56
4.1.2. O experimento 57
4.1.3. Sistema embarcado 60
4.2. Experimento em milho 67
4.2.1. Objetivo 68
4.2.2. O experimento 68
4.2.3. Sistema embarcado 69

5. Resultados e discussões 79
5.1. Experimento em cana-de-açúcar 79
5.2. Experimento em milho 84

6. Conclusões 93

7. Referências 97

APÊNDICES 103

ANEXOS 117

1. Introdução

1.1. Justificativa

Este trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos na Universidade de São Paulo, e apresenta características interdisciplinares nas áreas de eletrônica, automação e agronomia. Tem relação com a eletrônica, pois faz uso de embasamento teórico provindo da formação acadêmica em Engenharia Elétrica. Tem relação com agronomia por ser a área de aplicação do sistema desenvolvido e por contar com o apoio e a orientação provindos da Embrapa Instrumentação Agropecuária.

Pereira (2008) destaca bem a importância da "fusão do conhecimento de várias áreas da ciência [...] e técnicas de estimação para obtenção de resultados favoráveis à produtividade agrícola", ressaltando a necessidade de um grupo interdisciplinar "para obtenção de resultados melhores nas pesquisas que envolvem a integração de vários setores da produção agrícola" estabelecendo "[...] conexões ou envolvendo padrões conhecidos definidos por outras áreas da ciência".

A Agricultura de Precisão (AP) se estabelece como uma concentradora de necessidades que busca reunir tecnologias e procedimentos para otimizar sistemas de produção (MOLIN, 2004) que impulsionam o desenvolvimento de tecnologias. E apesar de já existirem diversos sensores comerciais para uso em aplicações agrícolas, ainda existe a necessidade de mais fontes de informação disponíveis e que auxiliem no gerenciamento de uma plantação. Ter à disposição um maior número de ferramentas para detecção das características da plantação pode resultar em decisões mais acertadas de ações de intervenção na cultura. Nesse sentido, a pesquisa acadêmica assume papel importante por ter a capacidade de interligar diversas áreas

de interesse, como computação, mecânica, eletrônica e agronomia, e assim proporcionar oportunidades de desenvolvimento e pesquisa em conjunto de interesses.

O uso de uma quantidade maior de sensores pode ser favorável à aplicações de AP, mas é importante ressaltar a necessidade de transformar números em informação útil. Nesse aspecto, muitas áreas de pesquisa ainda tem muito a contribuir e evoluir, tanto individualmente (pesquisas com fusão de sensores, redes de comunicação, padronizações, *softwares* dedicados, etc.), quanto interdisciplinarmente (por exemplo, a determinação de padrões agronômicos de comportamento de culturas baseado na informação de sensores).

O desenvolvimento de sistemas com capacidade de unir ferramentas tecnológicas revela-se de grande importância e utilidade para oferecer apoio à AP, por exemplo, o desenvolvimento de um sistema, que aproveite uma operação de aplicação de insumos que já seria realizada, equipado com múltiplos sensores de monitoração e atuadores embarcados que permitam o gerenciamento da aplicação. Assim, uma ação rotineira pode passar a ter a capacidade de realizar controle de aplicação à taxa variada e em tempo-real, resultando em economia de tempo e insumos.

A Figura 1.1 ilustra alguns dos elementos que podem fazer parte de um sistema embarcado para controle de aplicações agrícolas: sensores, *softwares* de controle, redes de comunicação, equipamentos e controladores de máquinas agrícolas.

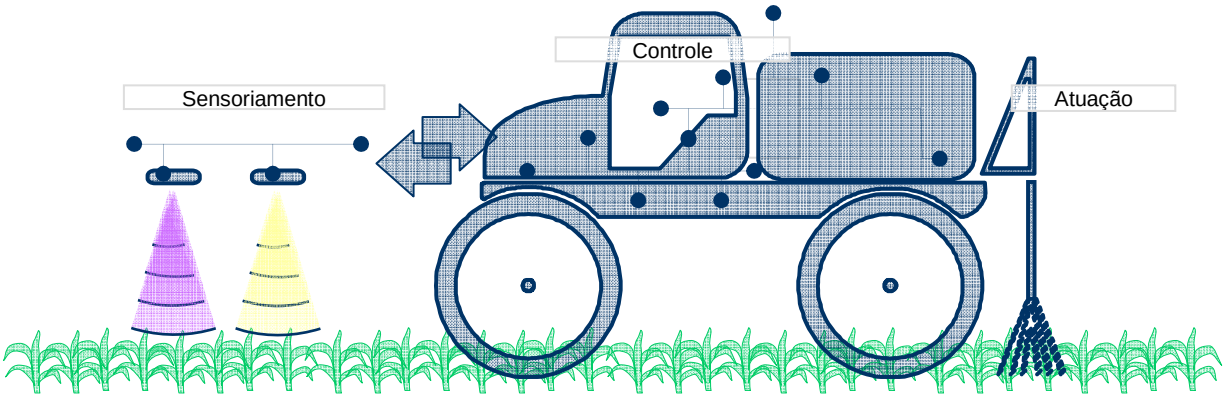


Figura 1.1. Elementos de um sistema embarcado para controle de aplicações agrícolas. Fonte: Prof. Dr. Ricardo Inamasu.

Os sensores são responsáveis por monitorar o *status* da planta e coletar as informações necessárias para direcionar uma tomada de decisão sobre o gerenciamento da plantação. Para aplicações em tempo-real e à taxa variável, o *software* de controle deve ser capaz de receber os dados dos sensores, interpretar, armazenar e controlar a aplicação. É desejável que o sistema tenha capacidade de tráfego de informação de forma rápida e eficiente. A máquina agrícola utilizada na aplicação deve estar apta mecânica e eletronicamente para receber comandos e executar a ação em tempo-real.

1.2. Objetivos

O objetivo desse trabalho é estudar as aplicações de sensoriamento embarcado em máquinas agrícolas, explorando a interface da agricultura com a engenharia mecânica por meio de conceitos e tecnologias de sistemas de medida. O trabalho assim, explora sensores de distância, sensores ópticos, sensores de posicionamento geográfico, equipamentos e controladores de máquinas agrícolas, sistemas embarcados e *softwares* de controle. O trabalho fornece exemplos práticos para o desenvolvimento de sistemas de sensoriamento embarcado para uso em monitoramento de *status* da planta e controle de aplicações agrícolas à taxa variável.

1.3. Estrutura do Trabalho

Os próximos capítulos desta dissertação estão organizados da seguinte forma:

- No Capítulo 2, é feita a revisão bibliográfica sobre temas relacionados com tecnologias aplicadas na agricultura;
- O Capítulo 3 descreve o funcionamento dos sensores utilizados no trabalho;

- No Capítulo 4, são descritos os dois experimentos realizados em campo;
- O Capítulo 5 apresenta resultados e discussões;
- O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

Uma das principais motivações deste trabalho é mostrar a crescente importância do uso de tecnologias em sistemas embarcados que venham auxiliar no desenvolvimento da agricultura brasileira. Este capítulo traz uma revisão bibliográfica sobre o uso de tecnologia em agricultura, com destaque para Agricultura de Precisão. Faz uma revisão sobre sensoriamento e trabalhos existentes na literatura, com destaque para os sensores que foram utilizados nessa pesquisa.

2.1. Tecnologia para agricultura

Committee (1997) destaca que a tomada de decisão humana possui maior probabilidade de estar associada a erros de interpretação de dados devido ao tempo decorrido entre a execução da tomada de decisão e seu resultado, em conjunto com a complexidade do ecossistema que gera dificuldades na compreensão da causa/efeito em uma zona de manejo. Essa interferência de erros humanos pode ser "[...] significantemente reduzida com o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de tecnologias" (PEREIRA, 2008).

Zhang, Wang e Wang (2002) afirmam que "os sistemas de produção agrícola tem se beneficiado da incorporação de avanços tecnológicos inicialmente desenvolvidos para outras indústrias", favorecendo a abordagem de uma agricultura de alta eficiência e sustentável, através da convergência de várias tecnologias, tais como, Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* – GPS), Sistema de Informação Geográfica (SIG), componentes computacionais miniaturizados, controle-automático, avanço no processamento de informação e telecomunicações.

A Agricultura de Precisão (AP) busca fazer em grande escala o que os pequenos agricultores já faziam em suas lavouras há séculos, que é usar o conhecimento detalhado da

cada pedaço particular de sua lavoura para determinar a ação correta de aplicação ou de intervenção buscando reduzir custos e obter boa colheita (MOLIN, 1997). Em produções com uso de AP são esperados impactos na rentabilidade dos produtores e benefícios ambientais para o público (ZHANG; WANG; WANG, 2002).

Molin (1997) ressalta a necessidade de esclarecer AP como filosofia de trabalho e não como ferramenta. Dessa forma, os sensores fazem parte do grupo de ferramentas que permitem o uso de AP. Por exemplo, o GPS é uma sofisticada ferramenta de trabalho e também a responsável pela grande expansão da AP.

Molin (2004) usa a definição de Swinton e Lowenberg-Debor (1998) para AP:

> Agricultura de Precisão é uma forma de gestão ou de gerenciamento da produção agrícola; é um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que as lavouras e os sistemas de produção sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores nela envolvidos.

Schueller (1992 apud MOLIN, 1997) diz que o conceito de agricultura de precisão requer para sua adoção um conjunto bastante complexo de tecnologias, dentre elas: 1. Sensoriamento. 2. Manipulação de dados. 3. Controle. 4. Localização. 5. Informação geográfica.

Molin (2003) destaca alguns dos motivos pelos quais a AP ainda não se tornou uma prática comum e usual no Brasil, sendo que entre eles destacam-se: a falta de informação devido ao processo ainda estar em um estágio inicial, “[...] pouco domínio dos conceitos de variabilidade espacial da produção e de suas causas [...]”, “[...] a mensuração da relação entre custo e benefício é bastante complexa e intuitiva [...]”, o processo de elaboração de mapas ainda não está dominado e a automatização da etapa de amostragem e caracterização de solo e plantação ainda é um desafio.

Uma das grandes oportunidades para o uso de Agricultura de Precisão da forma como é idealizada, tratando variabilidade espacial da plantação para obter maior produtividade e

menor influência do manejo ao meio, reside no detalhamento das informações espaciais da plantação ainda em tempo de realizar intervenção na cultura (TANGERINO, 2008). As ações de sensoriamento são executadas com o objetivo de fornecerem dados que coordenem as ações de intervenção (por exemplo, aplicação de fertilizantes, correção e preparo do solo), para tentar alcançar a homogeneidade da lavoura.

Métodos VRT (*Variable Rate Technology*), em português Tecnologia de Aplicação de Insumos à Taxa Variada, são tecnologias para controle localizado da plantação, que nada mais são do que aplicadores capazes de variar espacialmente as taxas de aplicação de insumos. Esse controle de variação pode ser feito com base nas informações coletadas e centralizadas em mapas com georreferenciamento, ou com base nas informações provindas de sensores que permitam análises em tempo-real das características da plantação (PEREIRA, 2008).

Segundo Zhang, Wang e Wang (2002), gerenciamento de variabilidade baseado em mapas geralmente é mais fácil de implementar devido às tecnologias disponíveis, tais como GPS, sensoriamento remoto, monitores de produtividade e amostragem de solo. Sistemas baseados em mapas são os mais utilizados, pois a "maioria dos sensores *on-the-go* para monitorar a área, solo e variabilidade são muito caros, não são suficientemente precisos, ou não estão disponíveis". Um gerenciamento baseado em sensores mede as propriedades desejadas, tais como propriedades do solo e planta, usando sensores de tempo-real em um modo *on-the-go* com controle dos aplicadores de taxa variada baseado nessas medidas. Para a abordagem baseada em sensores, um dispositivo de posicionamento não é sempre necessário.

2.1.1. Sensoriamento na agricultura

> Cientistas observam a natureza, fazem medições, e depois tentam aceitar ou rejeitar hipóteses referentes a esses fenômenos. A coleta de dados pode ocorrer diretamente no campo (chamada de coleta de dados *in situ* ou *in loco*) ou a alguma distância

> remota do objeto em apreço (referida como *sensoriamento remoto* do ambiente) (JENSEN, 2009).

Molin (1997) define sensoriamento como uma técnica que "[...] consiste em medir com a devida precisão as quantidades que definem a variabilidade e que normalmente dizem respeito à cultura e ao solo".

Segundo Colwell[1] (1983 apud JENSEN, 2009):

> Sensoriamento remoto foi formalmente definido pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS - *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) como: a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de um objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro que não esteja em contato físico ou íntimo com o objeto ou fenômeno em estudo.

No trabalho de Hatfield et al. (2008) foi feita uma extensa revisão bibliográfica sobre sensoriamento remoto, no qual afirmam que deve haver uma expansão no conhecimento sobre informações agronômicas vindas de dados de sensoriamento remoto, além do surgimento de algoritmos inovadores para explorar tais dados. Eles sugerem algumas soluções e perspectivas para direções de pesquisa futuras:

> 1) Necessidade de entendimento maior sobre o conteúdo da informação vinda de dados colhidos por sensores remotos. 2) Necessidade de aperfeiçoar algoritmos de obtenção de informação agronômica para que assim possam ser expandidos através do espaço e do tempo. 3) Necessidade de quantificar os erros associados com a recuperação de parâmetros agronômicos no uso de sensoriamento remoto. 4) Necessidade de simplificar os algoritmos usados para sensoriamento remoto de parâmetros agronômicos.

Em Molin (2003) sensoriamento direto é definido como "[...] a técnica de se determinar características de corpos apenas colocando-se um sensor em contato com eles". O sensoriamento *on-the-go* é um tipo de sensoriamento direto no qual o sensor está embarcado

---

[1] Colwell, R.N. **Manual of remote sensinsg**. 2 ed. Ed., Falls Church: ASP&RS. 1983.

na máquina que está realizando a operação agrícola. Sensoriamento com aplicações em tempo-real são possíveis em sistemas com sensoriamento direto *on-the-go,* que estejam preparados para fornecer informações para a ação de aplicação no momento da passagem da máquina sobre o campo.

Na próxima seção são apresentados trabalhos encontrados na literatura que estão relacionados com os elementos considerados importantes no desenvolvimento de um sistema em AP, dá-se destaque principalmente para trabalhos com uso de sensores diretos e *in situ* na coleta de informações para uso agronômico.

2.2. Trabalhos relacionados

Zhang, Wang e Wang (2002) destacam em sua revisão que "enquanto os agrônomos exercem seu papel de liderança no desenvolvimento de AP, os engenheiros têm trabalho para fornecer tecnologias necessárias para implementar práticas de AP". Destacam o desenvolvimento de sensores, controles, tecnologias de sensoriamento remoto e gerenciamento da informação. Afirmam que sistemas robustos, de baixo custo e, preferencialmente, em tempo-real, são necessários para a implementação de várias tecnologias de AP.

2.2.1. Controle

Na área de controle Zhang, Wang e Wang (2002) destacam trabalhos relacionados com aplicadores à taxa variada (VRT), guiagem automática com uso de DGPS (*Differential Global Positioning System*), sistemas de colheita robotizados e sistemas em rede.

2.2.2. Gerenciamento da informação

Um dos grandes desafios atuais é o gerenciamento da grande quantidade de informação que um sistema de AP pode gerar. Existe uma "[...] grande necessidade de ferramentas

especificamente concebidas para armazenamento de dados, processamento gestão e análise", além de uma "[...] forte necessidade padronização de troca de dados". O Sistema de Informação Geográfica (SIG) trabalha com gerenciamento da informação baseada em geração de mapas. Alguns dos *softwares* disponíveis no mercado atualmente são: ARCVIEW, IDRISI e SURFER. O SIG, apesar de ser muito utilizado, muitas vezes pode trazer poucas contribuições para AP, pois alguns *softwares* disponíveis no mercado podem ser caros e muitas vezes usam plataformas computacionais que os fazendeiros não possuem (ZHANG; WANG; WANG, 2002).

Uso conjunto de sensores

Segundo Luo e Kay (1989) a integração e/ou fusão de múltiplos sensores traz quatro potenciais vantagens: redundância, complementaridade, economia de tempo (*timeless*) e de custo da informação. Informações redundantes fornecidas por um grupo de sensores ou um único sensor ao longo do tempo reduzem a incerteza global, aumentando a precisão com que os elementos são percebidos pelo sistema, e podem servir para aumentar a confiabilidade no caso de erro ou falha de sensor. Informações complementares de múltiplos sensores permitem que sejam percebidos elementos no ambiente que seriam impossíveis de se perceber usando apenas a informação de cada sensor operando em separado. A economia de tempo (*timeless*) no processo é obtida com o uso dos vários sensores fornecendo informações com uma velocidade maior do que apenas um sensor forneceria. O custo total de um sistema integrado de multisensores é menor que o utilizado em apenas um sensor.

Luo et al. (2002) afirmam que existe uma diferença conceitual entre integração de sensores e fusão de sensores; a integração de sensores é um conceito mais abrangente ligado ao nível de arquitetura de sistema e controle, relacionado com a ligação física de um grupo de *n* sensores com dados sendo modelados para participar dessa integração; enquanto que fusão

de sensores está mais ligada a questões matemáticas e estatísticas para combinações da informação dos sensores. “Fusão de dados lida com teorias, algoritmos e ferramentas utilizadas para processar múltiplas fontes de dados, gerando um dado de saída que é, de alguma forma, melhor quando comparado com os dados de entrada individualmente” (NAKAMURA, 2007).

Comunicação / padronização (Isobus)

Nesse contexto, as redes embarcadas possibilitam a incorporação de sistemas computacionais em equipamentos e dispositivos e facilitam o uso de sensores e dispositivos de entrada e saída de sinais. Baseado no protocolo CAN (*Controller Area Network*), está sendo desenvolvido o padrão ISO11783 – *Tractors and machinery for agriculture and forestry – Serial control and communications data network* (ISO 11783, 2009) – que tem como propósito prover um padrão aberto para interconexão de sistemas eletrônicos embarcáveis através de um barramento que, por sua vez, é um conjunto formado por fios, conectores e dispositivos de potência para promover a interconexão de dispositivos e permitir a comunicação de dados entre estes (Sousa, 2002).

2.2.3. Sensores

Dentre os trabalhos encontrados na literatura sobre o uso de sensores em agricultura, tem destaque o trabalho de Molin (1997) no qual é feita uma revisão sobre os sensores encontrados no mercado para a época em que o artigo foi escrito. Ele cita o uso de potenciômetros, células de carga, emissores e receptores de luz e infravermelho para sensoriamento direto sobre colheita de grãos, beterraba, batata e amendoim; sensores de umidade complementando os dados de colheita de grãos; radar e sensor de intensidade de radiação para medir fluxo de forragem picada; célula de carga para medir massa de feno agregada ao fardo; sensores de cor refletida e sensores de reflexão de luz visível e

infravermelha para avaliar conteúdo de carbono do solo a partir da retirada de amostras em campo e análise em laboratório (eliminar erros relacionados com a iluminação natural); sensores de indução eletromagnética para detecção de índice de salinidade do solo e determinação de profundidade da camada de impedimento do solo; e potenciômetro rotativo e sensores fotoelétricos para medir população de plantas de milho.

Refletância, índices e NDVI

Muitos dos sensores mais utilizados hoje em dia buscam relacionar refletância foliar com índices vegetativos das culturas, tais como área foliar, cobertura vegetal, biomassa, tipo de cultura, estado nutricional e rendimento (HATFIELD et al. 2008). Índices de vegetação "são medidas radiométricas adimensionais, as quais indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde" (JENSEN, 2009).

"Todos os objetos acima do zero absoluto (-273ºC ou 0 K) emitem energia eletromagnética", sendo que o sol "representa a fonte inicial da maioria da energia eletromagnética registrada pelos sistemas de sensoriamento remoto" (JENSEN, 2009). O conhecimento sobre como a radiação solar interage com a vegetação é necessário para interpretar e processar dados agronômicos de sensoriamento remoto e outras pesquisas. Folhas de planta geralmente tem refletância baixa na região espectral visível devido a grande absorção pela clorofila, uma refletância relativamente alta na infravermelha próxima devido à dispersão interna e nenhuma absorção foliar, e uma refletância relativamente baixa do infravermelho além de 1,3 micrometro devido à grande absorção pela água.

A refletância de um dossel de plantas é similar, mas modificado pela desuniformidade de incidência de radiação solar, estrutura da planta, área da folha, sombras e reflexões de fundo (KNIPLING, 1970). A forma como a planta é vista depende de sua interação com a radiação, sendo que a qualidade e intensidade de energia refletida ou emitida pelo alvo dependem de

uma série de variações tais como: geometria, morfologia e composição química da folha, tipo de solo, influência climática, etc.

Um índice de vegetação ideal deve (RUNNING et al., 1994; HUETE; JUSTICE, 1999 apud JENSEN 2009):

> – maximizar a sensibilidade a parâmetros biofísicos das plantas, preferencialmente de uma forma linear, para uma grande amplitude de condições de vegetação e para facilitar a validação e a calibração do índice;
>
> – ser acoplável a algum parâmetro biofísico mensurável, tais como biomassa, Índice de Área Foliar (IAF), ou Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (RFAA, ou APAR, em inglês), para fins de validação e de controle de qualidade.

Rouse et al. (1974) desenvolveram o Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*), que é relação entre a diferença sobre a soma do fluxo radiante refletivo no infravermelho próximo (R_{NIR} - I*nfrared Band Reflectance*) e o fluxo radiante refletivo no vermelho (R_{VIS} - V*isible Band Reflectance*). O NDVI fornece informações sobre a biomassa da vegetação ou sobre Índice de Área Foliar (IAF).

$$NDVI = \frac{(RNIR - RVIS)}{(RNIR + RVIS)} \qquad (1)$$

O NDVI é um índice de vegetação importante porque (JENSEN, 2009):

> – permite que mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e na atividade da vegetação possam ser monitoradas;
>
> – a razão reduz muitas formas de ruídos multiaplicativos (diferenças de iluminação solar, sombras de nuvens, algumas atenuações atmosféricas, algumas variações topográficas) presentes em múltiplas bandas de imagens de múltiplas datas.

As desvantagens do NDVI são (HUETE et al., 2002; WANG et al., 2005 apud JENSEN, 2009):

> – sendo um índice baseado em razão, é não-linear e pode ser influenciado por efeitos ruidosos aditivos, tais como radiância de trajetória atmosférica;

– o NDVI é altamente correlacionado com o IAF; entretanto, esta relação pode não ser tão forte durante períodos de máximo IAF; aparentemente devido à saturação do NDVI quando o IAF é muito alto (WANG et al., 2005);

– O NDVI é muito sensível a variações do substrato sob o dossel. Os valores de NDVI são particularmente altos com substratos mais escuros.

Solari (2006) descreve um estudo completo sobre o uso de sensores ativos de refletância em plantações de milho, comparando os sensores Crop Circle (HOLLAND, 2008), Green Seeker e SPAD. O autor conclui que os sensores podem ser usados para predizer a disponibilidade de nitrogênio (N) para a cultura. Inamasu et al. (2006) sugerem que o NDVI medido pelo Crop Circle pode identificar a deficiência de N em culturas de cana-de-açúcar com consequente uso em controle de tempo-real em aplicação de fertilizante.

Frasson (2007) fez uma revisão bibliográfica abrangente sobre estudos realizados em diferentes culturas, tais como milho (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; BLACKMER et al., 1996), trigo (STONE et al., 1996), feijão (THAI et al., 1998), algodão (SUI et al., 2005) e citrus (MIN; LEE, 2005), que relacionam NDVI e índice de clorofila com índices vegetativos e que "[...] mostraram um grande potencial do uso de análise espectral para estimar a quantidade de nitrogênio nas culturas".

Frasson (2007) realizou experimentos em cana-de-açúcar utilizando sensor óptico ativo buscando avaliar o comportamento do NDVI para diferentes variedades de cana-de-açúcar, identificar níveis de nitrogênio e diagnosticar falhas de plantio. Utilizou o sensor Green Seeker Hand HeldTM, da empresa NTech Industries (NTECH, 2009). Povh (2007) avalia o comportamento do NDVI com o sensor Green Seeker para culturas em cereais.

Sensores de ultrassom

Aziz et al. (2004) ressaltam que medições não destrutivas das fases de crescimento vegetal e da altura da planta podem ser úteis para práticas mais eficientes de gestão de culturas. Aziz

et al. (2004) apresentam estudos sobre a tecnologia de sensor ultrassônico como uma abordagem para a caracterização da planta milho, com o objetivo de desenvolver um sistema que poderia ser usado em operações de sensoriamento de variações na Agricultura de Precisão.

Aziz et al. (2004) citam em seu trabalho diversos estudos feitos com ultrassom para finalidades agrícolas. Entre eles: Sudduth et al. (1998) comparam dois métodos, medidas de largura de planta local com ultrassom e com GPS e concluíram que sensores ultrassônicos são mais baratos e podem fornecer medidas diretas de largura sem todo o processamento de dados que o método do GPS exige; Kataoka et al. (2002) mostram que o sensor de ultrassom tem bom desempenho para medidas de altura de milho e soja comparado com o sensor de distância baseado em laser, Sui et al. (1989) desenvolveram um sistema de medidas baseado em microcomputador usando módulos de ultrassom para fornecer estimativas precisas e consistentes de volume de planta, largura máxima, largura média e altura para variedades em formato de arbusto como algodão e soja.

Regunathan e Lee (2005) usam sensor ultrassônico em conjunto com câmera colorida para identificar e determinar o tamanho de frutas cítricas. O sensor é usado para determinar a distância entre a fruta e a câmera. O erro na estimação do tamanho das frutas pode ser causado por imprecisões nas medidas do ultrassom.

Zaman e Salyani (2004) afirmam que sensores ultrassônicos podem ser usados para quantificar e mapear volume de árvores, sendo úteis para planejar o gerenciamento específico de um arvoredo e estimar rendimentos agrícolas e fazem um estudo dos efeitos da densidade da folhagem e da velocidade sobre a medição do volume das árvores de citrus. Zaman et al. (2005) usaram um sistema formado por sensores ultrassônicos e DGPS (*Differential Global Positioning System*) para fazer medidas do tamanho das árvores e para assim gerar um mapa de prescrição para aplicação variada de fertilizante nitrogenado. Zaman et al. (2006) afirmam

que o mapeamento do dossel de árvores a partir de um sistema automatizado com sensores ultrassônicos é barato, bastante simples e pode ser utilizado para estimar o rendimento das frutas no arvoredo para práticas de gerenciamento localizado.

Martì et al. (2006) desenvolveu um projeto corporativo com a participação de diversas instituições e universidades da Espanha, com a finalidade de desenvolver um sistema de controle de pulverizador para aplicação de pesticidas em pomares. Utilizou sensores ultrassônicos detectando a presença árvores para a regulação dinâmica e em tempo-real do fluxo do produto lançado. Esse sistema trabalha em conjunto com o circuito hidráulico e tem uma válvula elétrica liga/desliga em cada lado da máquina que interrompe o fluxo de produto se o sensor não detecta a árvore.

Scotford e Miller (2004, 2005) têm utilizado sensor de refletância em conjunto com sensor de altura para determinar densidade de perfilho e índice de área foliar em milho de inverno. Seus trabalhos relacionaram a refletância com altura de milho concluíram a validade da união dos sensores.

3. Instrumentação

Neste capítulo é feita uma descrição das características dos sensores utilizados em campo, com análise de princípios de funcionamento e de construção. Na sequência são descritos alguns testes que foram realizados com os sensores com a intenção de calibração para utilização no sistema.

3.1. Crop Circle

Sensores de refletância usam a propriedade de que as plantas absorvem a luz visível e refletem uma porção da luz infravermelha devido a propriedades estruturais da planta. A luz refletida é detectada pelo sensor e utilizada para fazer cálculos de biomassa vegetativa que é diretamente proporcional à biomassa da planta (HOLLAND, 2008). Dentre os sensores de refletância para uso *in situ*, Green Seeker e Crop Circle são recentes no mercado e explorados para estudos agronômicos e pesquisas para uso em Agricultura de Precisão.

Neste trabalho foi utilizado o sensor Crop Circle modelo ACS-210 da Holland Scientific, que é um sensor ativo de refletância que fornece informações sobre índices vegetativos da planta. Apresenta uma grande vantagem sobre outros sensores radiométricos tradicionais por possuir uma fonte própria que emite luz na faixa de comprimento de onda do visível ao infravermelho próximo (NIR).

O ACS-210 tem como emissor de luz (Red/NIR) um vetor de leds (diodos emissores de luz) policromáticos modulados, que emitem ondas de luz na banda de 650 nm a 880 nm. Para fotodetecção usa um conjunto de fotodiodos de silício com faixa espectral de 320nm a 1100nm. Possui dois detectores de luz: um na faixa de 400 nm a 680 nm e outro na faixa de 800 nm a 1100 nm.

Segundo o manual de instruções (HOLLAND, 2008), o Crop Circle pode fazer medidas estando posicionado a uma distância de 0,3 m a 2,13 m do alvo, e deve estar posicionado a uma distância de 0,5 m à 0,91 m para medidas ótimas. A temperatura de operação indicada é de 0 a 50ºC.

Esse sensor fornece seus dados via comunicação serial (RS232) e permite que a taxa de comunicação seja configurada. Para esta aplicação foi configurado para transmitir seus dados a uma taxa de 10Hz e com *baud rate* de 38400 bits por segundo por meio da comunicação serial.

As informações adquiridas pelo sensor são: R_{NIR} (*Infrared Band Reflectance*), R_{VIS} (*Visible Band Reflectance*), e o Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Índice*).

3.2. Sensores de medida de distância

Dentre os diversos sensores para medidas de distância disponíveis no mercado destacam-se os sensores a *laser* e ultrassônicos, que fazem uso de propriedades físicas de propagação de luz ou som para realizar o cálculo de distâncias. O sensor de distância do tipo PSD (*Position Sensing Detector*), é usado em robôs industriais, em sistemas de auto-foco de câmeras fotográficas e em sistemas de estacionamento de carros. Usa o método de triangulação, no qual existe um ponto de emissão de luz e um ponto de recepção. A luz emitida e a luz refletida formam ângulos que, conhecidas as medidas dos ângulos e dos lados do triângulo formado, tornam possível determinar através de cálculos trigonométricos o comprimento que indica a distância procurada entre sensor e objeto. O emissor pode ser um LED (*light emitting diode*) ou uma lâmpada, o receptor é um componente foto sensível tal como fototransistor, fotodiodo ou LDR (*light dependent resistor*).

O primeiro Sonar foi construído em 1917 pelo físico francês Paul Langevin, com a finalidade de localizar submarinos alemães. Sensores de ultrassom usam princípios físicos de emissão, propagação e reflexão de ondas para fazer suas medidas de distância. É possível calcular o tempo decorrido para um pulso sonoro percorrer um trajeto a partir de sua emissão direcionada a um alvo até a recepção do seu eco refletido. Conhecido esse tempo, sabendo a velocidade de propagação do som (aproximadamente 340 m/s) e usando a relação: velocidade = distância / tempo, chega-se à medida da distância entre o sensor e o obstáculo. Sensores de ultrassom emitem sinal em forma de cone, com largura da ordem de 10º a 15º. A existência desse cone é um aspecto favorável à utilização de sensor de ultrassom em sensoriamento *in situ* e *on-the-go*, pois, diferente de sensores laser que identificam alvos quase pontualmente, a faixa coberta por esse cone pode representar melhor o que seria o perfil da plantação.

No trabalho de Sousa et al. (2005) foi feita uma caracterização de sensor de ultrassom para ambientes agrícolas, ou seja, ambientes abertos e menos estruturados, utilizando o sensor de ultrassom modelo 6500 da Polaroid. Seus resultados mostraram que esse sensor é capaz de ser utilizado para fins de aplicação em ambiente agrícola.

Os sensores *laser* usam a mesma propriedade de propagação de ondas, agora para luz (velocidade de propagação de 300.000 km/s, aproximadamente). Esses sensores emitem um feixe de luz que é um cilindro com diâmetro da ordem de milímetros, por isso muitas vezes sensores *laser* são associados a mecanismos de varredura que permitem cobrir áreas mais largas. Também existem sensores de distância a *laser* que funcionam por triangulação, baseados em reflexão da luz e que fazem os cálculos de distância a partir dos ângulos formados entre o sensor, o raio infravermelho emitido por este e o raio retornado pela reflexão no objeto.

Para este trabalho fez-se a opção de uso de sensor de ultrassom por apresentar características de baixo custo, robustez e simplicidade de implantação. Foi utilizado o módulo

de série 6500 da SensComp (SENSCOMP, 2009) que é capaz de controlar os transdutores eletrostáticos da Polaroid/SensComp. Permite medir distâncias de 15 cm a 10 m com um erro absoluto de ±1%, preparado para operar entre as temperaturas 0º e 40ºC. É composto por uma pastilha cerâmica (elemento emissor/sensor) que é conectada a um circuito transdutor que disponibiliza os sinais de transmissão de dados ao circuito controlador (SOUSA et al., 2005).

Para uso desse módulo foi desenvolvido um circuito de controle composto por microcontrolador PIC18F258 programado em linguagem C, capaz de enviar o comando de inicialização na freqüência aproximada de dez pulsos por segundo. O circuito controlador é responsável por enviar o comando de inicialização que aciona o envio do pulso sonoro pelo elemento emissor. O elemento sensor detecta o eco desse pulso sonoro. O tempo decorrido desde a inicialização até a chegada do sinal de eco é proporcional à distância entre o sensor e o alvo, calculada a partir da velocidade do som (340 m/s a 15 ºC). Para eliminar ruídos de sinal existe um delay de 2,38 milisegundos após o disparo inicial. Se for desejado medidas menores do que 40,54 cm deve ser executado o controle de uma entrada específica do módulo que pode ser feito apenas se o disparo não for detectado como ruído.

O sensor de ultrassom foi configurado para fornecer seus dados por comunicação serial (RS232) com taxa de comunicação de aproximandamente 10 mensagens por segundo e *baud rate* de 9600. As mensagens enviadas pelo circuito controlador ao computador contêm a informação do tempo decorrido desde a emissão do pulso até sua recepção.

3.3. GPS

Um Sistema de Satélites para Navegação Global (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*) é o termo genérico para definir sistemas de localização geográfica baseados em informações de satélites, que permitem determinar coordenadas de localização de um receptor (latitude, longitude e altitude). Apenas os sistemas americano e russo, GPS e Glonass,

respectivamente, estão em uso atualmente. Em implantação existem os sistemas europeu e chinês, Galileo e Compass, respectivamente.

O Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*), disponível no Brasil, é controlado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (DoD, 2009) e foi criado a partir da década de 1970 com intuitos bélicos. Até o ano de 2000, no sinal do GPS existia um erro de disponibilidade seletiva (SA – *Selective Avaiability*), que era um erro aleatório inserido pelo DoD para limitar o uso por forças inimigas em situações de guerra.

O sistema GPS é composto por segmento espacial, de controle e de usuário. O segmento espacial é composto por constelação de 28 satélites, divididos em seis órbitas espaçadas de 60º e levam 12 horas para dar uma volta na terra. O segmento de controle é composto por uma estação de controle, estações de monitoramento espalhadas pelo mundo e antenas de retransmissão do sinal da estação mestre para os satélites. Essas estações são responsáveis pela monitoração e correção das órbitas dos satélites. O segmento de usuário é composto pelo receptor, responsável pela captação dos sinais emitidos por pelo menos 4 satélites para determinar coordenadas e tempo.

Apesar da alta tecnologia envolvida, existem fatores que interferem na acurácia do sistema GPS. Algumas das fontes de erros são: relógio do satélite, relógio receptor, órbita dos satélites, refração, reflexão e disponibilidade seletiva. Somados, esses erros podem causar erro de até 50m em 80% dos casos, e erros de 100m em 20% dos casos (MOLIN, 2003). Como a distância é calculada pelo tempo que o sinal do satélite leva para chegar ao receptor, uma das fontes de erro mais significativo é a mudança da densidade do meio de transmissão do sinal que é a ionosfera.

Para eliminar esses erros existem diferentes alternativas de correção diferencial do sinal de GPS, chamada DGPS, que chegam a diminuir o somatório de erros para 3 a 6 metros. Por

exemplo, a correção por pós-processamento é baseada na informação de um receptor fixado em base de posição conhecida e de um receptor capaz de armazenar dados, que, após a operação de campo para coleta de dados, têm as informações das duas fontes cruzadas. Existem algumas empresas que oferecem o serviço de correção DGPS através de satélite de comunicação geoestacionário, disponibilizado através de pagamento anual. Esse tipo de serviço permite correção em tempo-real.

Na agricultura o GPS pode ser usado em mapas de produtividade, coleta de amostras de solo, aplicação localizada de insumos, acompanhamento e registro georreferenciado de eventos da lavoura, orientação de aviões e máquinas agrícolas para aplicação em faixas paralelas através de barra de luz, no acompanhamento da lavoura e demarcação de eventos em geral (MOLIN, 2003).

O receptor GPS utilizado nesse trabalho foi o modelo Ag-114 da Trimble (TRIMBLE, 2009), habilitado para receber sinal diferencial (DGPS) com taxa de transmissão de 1Hz, transmitindo padrões NMEA de mensagem GGA e VTG com *baud rate* de 4800 bits por segundo via comunicação serial.

3.4. Caracterização dos sensores

O *Método de Medição* utilizado para calibrar um instrumento representa uma situação ideal, difícil de alcançar na prática, pois existem parâmetros que interferem no processo que são difíceis de controlar. Já um *Processo de Medição* representa uma situação real, que é a realização física do *Método de Medição*. Em um processo de calibração é impossível certificar um instrumento com uma precisão maior do que a referência utilizada, por isso a escolha do padrão de medida a ser utilizado interfere na precisão desejada na calibração do instrumento. Doebelin (2004) afirma que “[...] uma regra seguida frequentemente é que o

sistema de calibração deve ter um total de incerteza quatro vezes melhor do que a unidade sob teste [...]”.

Os sensores utilizados nesse trabalho têm características de desempenho estático, pois medem quantidades pontualmente constantes e que variam lentamente com o tempo. Numa calibração estática todas as entradas são mantidas constantes, exceto uma, que é variada sobre uma faixa de valores constantes, o que provoca variação da saída sobre uma faixa de valores também constantes. Repetindo-se esse procedimento para cada uma das entradas de interesse desenvolve-se uma família de relações estáticas de entrada-saída. Através de superposição adequada de cada um dos efeitos individuais é possível então descrever o comportamento estático do instrumento (DOEBELIN, 2004).

As entradas que serão mantidas sobre controle devem ser escolhidas entre as que mais contribuam para o erro global do instrumento, das outras, que não serão controladas, espera-se que tenham efeitos muito pequenos sobre o instrumento. O fato de existirem entradas que não são possíveis de serem controladas, mesmo que tenham efeito pequeno sobre o instrumento, contribui para que num *Processo de Medida* as leituras de saída não sejam sempre as mesmas, mesmo se repetido diversas vezes sob condições tidas como idênticas (DOEBELIN, 2004).

Os testes descritos a seguir foram realizados com a intenção de identificar a influência que algumas das entradas consideradas importantes poderiam causar nos resultados coletados pelo sistema. Foram feitos testes avaliando a interferência da distância do sensor ao alvo, da iluminação ambiente, da cor, textura e largura do alvo.

3.4.1. Teste 1: distância x Ultrassom

O objetivo desse teste é determinar a curva de calibração do Sonar com base na distância do sensor ao alvo. A temperatura média durante o experimento foi registrada em 21,9^{o}C e a umidade do ar 47,5%. A distância do sensor ao alvo foi variada em intervalos de valores

crescentes de 5cm, partindo de 0,30m e chegando a 1,30m. O sensor Sonar fornece aproximadamente 10 dados por segundo. Para cada posição do sensor, o tempo de coleta de dados foi cronometrado em torno de 10 segundos, garantindo para todas as posições a coleta de ao menos 100 dados. A Figura 3.1 mostra como foi montado esse experimento: os sensores apoiados em uma base que possibilitava seu deslocamento vertical conforme a distância desejada do alvo.

Figura 3.1. Distância x Sonar.

3.4.2. Teste 2: distância, cor, textura x Crop Circle

O segundo teste foi realizado com o sensor Crop Circle e teve como objetivos: identificar o quanto a distância do sensor ao alvo pode interferir sobre os resultados fornecidos; e identificar a influência da coloração e textura do alvo.

A temperatura média durante o experimento foi registrada em 19,0^{o}C e a umidade do ar 43%. A distância do sensor ao alvo foi variada em intervalos de valores crescentes. As distâncias utilizadas foram 0,30 m, 0,40 m, 0,50 m, 0,60 m, 0,70 m, 0,80 m, 0,90 m, 1,00 m 1,10 m e 1,70 m. O sensor Crop Cricle fornece aproximadamente 10 dados por segundo. Para cada posição do sensor, o tempo de coleta de dados foi cronometrado em torno de 10 segundos, garantindo para todas as posições a coleta de ao menos 100 dados. Para cada uma dessas posições, foram utilizados 9 alvos, que eram papéis de diferentes cores e texturas (Figura 3.2 (a)). Na Tabela 3.1 estão descritos quais foram os papeis utilizados. A Figura 3.2 (b) mostra os sensores posicionados para a coleta de dados.

Figura 3.2. (a) Cor dos papeis utilizados como alvo; (b) Sensores posicionados para a coleta de dados.

Tabela 3.1 – Tipos de papeis utilizados como alvo.

	Tipo de papel
P1	cartão preto
P2	cartão branco
P3	cartão verde
P4	cartão amarelo
P5	cartão vermelho
P6	camurça branca
P7	camurça verde
P8	camurça amarela
P9	camurça vermelha

3.4.3. Teste 3: iluminação

O terceiro teste tinha como objetivo verificar se a utilização de diferentes fontes de iluminação poderia causar alterações na saída do sensor de refletância.

Foi utilizado o mesmo procedimento do teste 2, que foi realizado com repetição para iluminação artificial com lâmpadas fluorescentes e sem iluminação.

3.4.4. Teste 4: largura do alvo

O teste 4 foi realizado com o objetivo de verificar o quanto a diferença de largura do alvo, que passa sobre o feixe de detecção dos sensores, pode interferir nos resultados. A intenção era simular uma situação real em campo na qual pode ocorrer de o sensor não estar alinhado

com a planta, ou seja, detectando apenas uma parte da planta, o que representaria uma largura menor do que a da planta.

A temperatura média durante o experimento foi registrada em 20,7^{o}C e a umidade do ar 55%. Foram utilizadas tiras de papel cartolina de diferentes larguras para representar a largura das plantas. O tempo de coleta de dados foi cronometrado em torno de 10 segundos, garantindo para todas as larguras a coleta de ao menos 100 dados. Foi utilizado um papel preto como fundo (Figura 3.3 (a)) e como alvo foram utilizados papéis cartolina verde cortados em tiras de diferentes larguras (0,5 cm, 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm, 4 cm, 4,5 cm, 5 cm). A distância do sensor ao alvo foi mantida constante em 70 cm e a distância do alvo ao papel de fundo foi mantida constante em 8,5 cm. As Figuras 3.3 (b) e (c) exemplificam alvos de diferentes larguras da forma como foram utilizados.

(a)

(b) (c)

Figura 3.3. (a) Fundo preto de cartolina; (b) e (c) Faixas de alvo de diferentes larguras posicionadas para a coleta de dados.

3.5. Resultados

Nesta sessão são apresentados os resultados dos testes de caracterização dos sensores realizados nesse trabalho.

Influência da distância do sensor ao alvo para o Sonar

A Tabela 3.2 mostra a média dos dados coletados pelo sonar para todas as distâncias do sensor ao alvo.

Tabela 3.2 – Média dos dados coletados para cada distância pelo sensor Sonar. Sendo q_r a distância real do sensor ao alvo, e q_o a distância medida pelo sensor.

qr (m)	qo (m)
0,30	0,51
0,35	0,43
0,40	0,43
0,45	0,48
0,50	0,53
0,55	0,58
0,60	0,63
0,65	0,68
0,70	0,73
0,75	0,78
0,80	0,83
0,85	0,88
0,90	0,92
0,95	0,98
1,00	1,02
1,05	1,07
1,10	1,12
1,20	1,22
1,30	1,32

No gráfico da Figura 3.4, a curva vermelha tracejada indica a distância real do sensor ao alvo (q_r) e a curva azul representa distância medida pelo sensor (q_o).

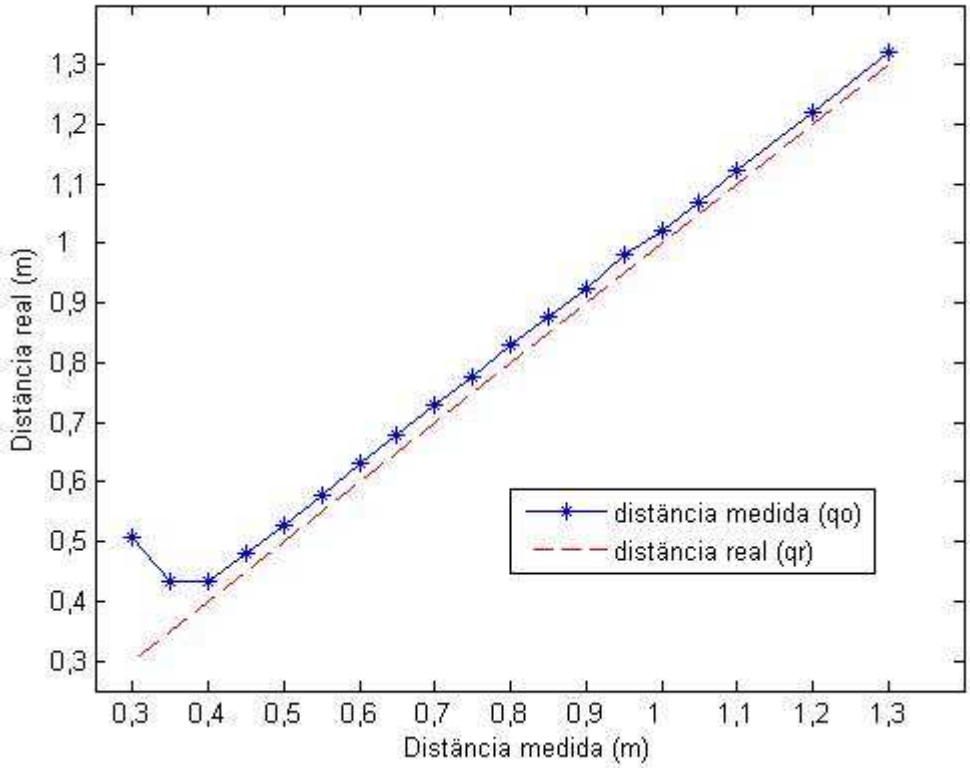


Figura 3.4. Distância do sensor ao alvo: medida vs real.

Baseado no método de mínimos quadrados estimou-se a equação de reta que define a relação entre valor coletado e valor real. Através desse processo de calibração é possível remover o *bias* (erro sistemático) e definir a imprecisão do sensor numericamente. A equação de reta é definida como na equação 2 abaixo:

$$q_0 = mq_i + b \qquad (2)$$

sendo q_i = entrada do sistema,

q_0 = saída do sistema,

m = inclinação da reta,

e b = intersecção da reta com o eixo vertical.

Para os dados coletados nesse experimento obteve-se m=0,987 e b=0,037. O desvio padrão obtido foi $s_{qi}=0,0005$ metros (DOEBELIN, 2004). Assumindo a distribuição como

Gaussiana, que diz que a probabilidade das leituras situarem-se dentro de ±3σ de μ é de 99,7%, obtém-se a seguinte equação característica de calibração do sonar:

$$q_i = \frac{(q_0 - 0,037)}{0,987} \tag{3}$$

O gráfico da Figura 3.5 mostra a curva corrigida, com os valores dos dados originais e os valores dos dados corrigidos. A curva em azul representa os dados originais, e a curva verde representa os dados já tratados com base na equação 3. Observa-se que os dados de distância medida com valores inferiores a 0,40 metros estão comprometidos devido a características construtivas do sensor, conforme descrito no item 3.2. Esse comportamento sugere que tais dados sejam descartados.

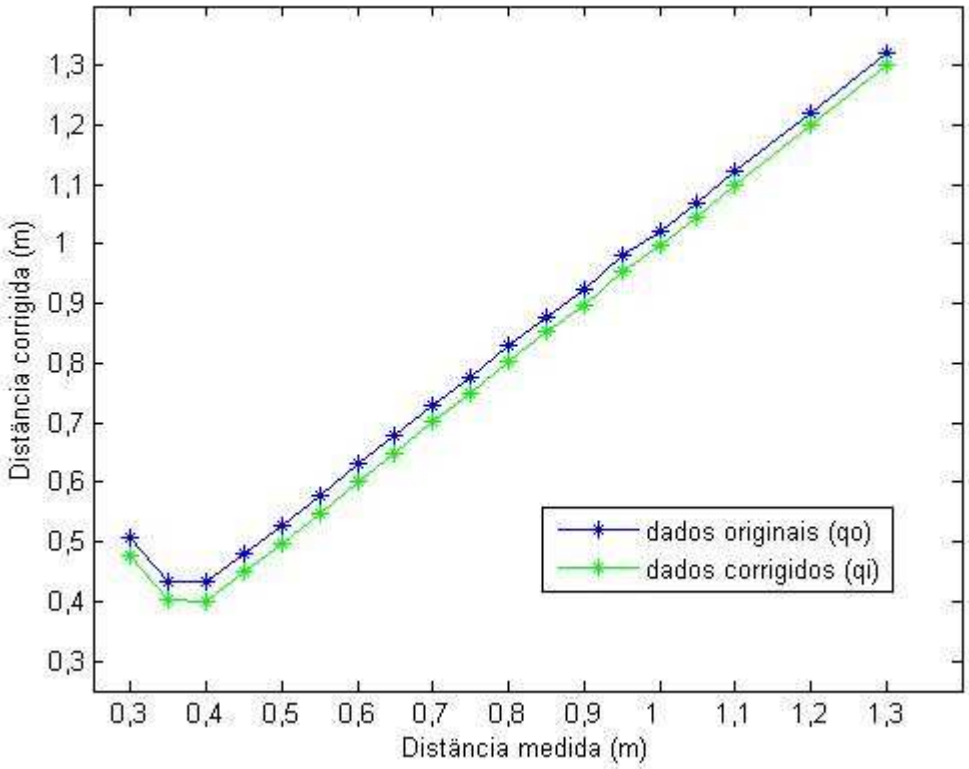


Figura 3.5. Distância do sensor ao alvo: original vs corrigido.

Influência da cor, textura e distância do sensor Crop Circle ao alvo

Pelo gráfico da Figura 3.5, observa-se que tanto coloração, textura e distância do sensor ao alvo causam alterações na saída do sensor. A pigmentação da cor, a textura da superfície e a distância do sensor ao alvo relacionada com a superfície não uniforme (superfície ideal de Lambertain = superfície com difusão de luz) interferem nos resultados.

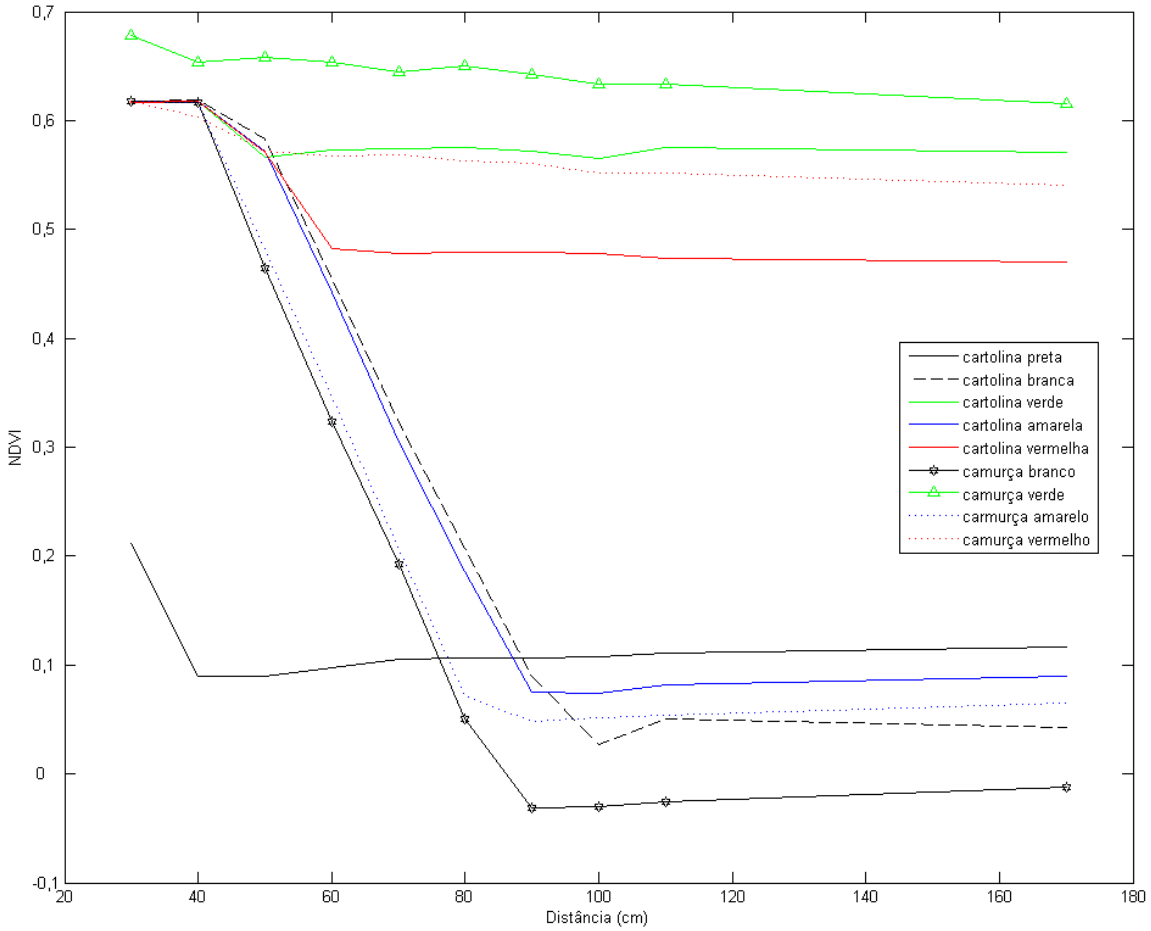


Figura 3.5. Influência da distância da cor, textura e distância do sensor Crop Circle ao alvo.

A influência da distância pode ser observada principalmente nas cores amarela e branca nas faixas de distância de 40 a 90 cm. Segundo informações fornecidas pelo fabricante (comunicado pessoal)[2] o sensor Crop Circle é programado para ter ganho alto, ou seja, para

[2] FRANCIS, D. Mensagem recebida via email em 23 jul. 2009.

ter vasta faixa de trabalho em campo, e como conseqüência em curtas distâncias ocorre saturação, especialmente com alvos não absorventes. O sensor usa fonte de luz âmbar e a super saturação some à longas distâncias, como pode ser visto claramente para as superfícies branca e amarela principalmente porque elas refletem e não absorvem boa parte da luz âmbar.

Pela análise do gráfico, pode-se concluir que para as cores branca e amarela o sensor fornece os resultados corretos quando está a mais de um metro de distância do alvo, para a cor verde e preta distâncias menores já podem ser consideradas corretas. Quando o sensor está posicionado a uma distância maior do que um metro do alvo, se ocorrer uma variação de distância para mais do que um metro, essa variação não altera consideravelmente os dados (até o limite máximo). Caso o sensor esteja posicionado a menos de um metro do alvo, e ocorrer uma variação da distância, essa variação causa mudanças nos dados (para as cores branca e amarela). O ideal seria que não ocorressem variações da distância do sensor ao alvo, principalmente em distância menores do que um metro do alvo. Dados coletados a distâncias maiores que um metro sofrem menor influência de uma variação de distância.

Influência da iluminação ambiente no sensor Crop Circle

A Tabela 3.3 indica os coeficientes de correlação entre os dados coletados no escuro e os dados coletados com iluminação artificial de lâmpada fluorescente.

O coeficiente de correlação é uma medida da tendência e da força da relação linear entre duas variáveis. Os resultados mostram que não existe influência da iluminação sobre os dados dos sensor.

Tabela 3.3 – Coeficiente de correlação entre dados com iluminação e no escuro.

	Tipo de papel	Coeficiente de correlação
P1	cartão preto	0,9986
P2	cartão branco	1,0000
P3	cartão verde	0,9985
P4	cartão amarelo	1,0000
P5	cartão vermelho	0,9998
P6	camurça branca	1,0000
P7	camurça verde	1,0000
P8	camurça amarela	1,0000
P9	camurça vermelha	1,0000

Influência da largura do alvo

O gráfico da Figura 3.6 apresenta os resultados dos testes realizados para determinar a influência da largura do alvo sobre os sensores Crop Circle e Sonar.

Pela análise do gráfico, podemos concluir que o sensor Sonar sofre pouca influência da largura do alvo, desde que, a menos uma parte do alvo esteja sobre o cone de detecção. Já o sensor Crop Circle apresenta variação dos dados conforme ocorre variação da largura do alvo.

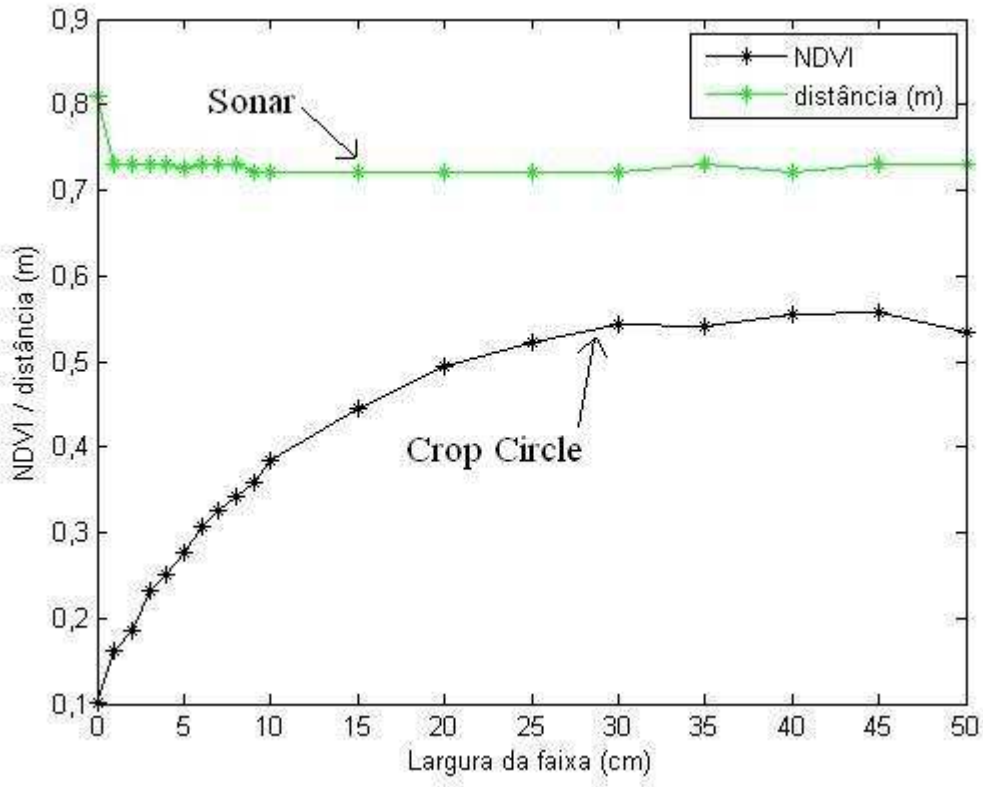


Figura 3.6. Influência da largura do alvo sobre os sensores Crop Circle e Sonar.

A tabela 3.4 mostra os valores de NDVI para cada largura de alvo representados no gráfico da figura 3.6. O sensor Crop Circle posicionado a 70 cm do alvo, tem a base do cone de detecção de aproximadamente 50 cm. Considerando que um alvo com largura de 50 cm abrange todo o feixe emitido pelo sensor na situação do teste, pode-se considerar que o valor de NDVI obtido para esse caso é o valor correto a ser medido. Comparando esse valor com todas as outras medidas é possível observar, por exemplo, que alvos com largura menor do que 25 cm apresentam uma diferença no valor do NDVI maior do que 7% do valor tido como correto, e para alvos com largura menor do que 10 cm essa diferença chega a ser maior do que 30%. Então, essa diferença de largura do alvo deve ser levada em consideração na análise dos dados, pois pode interferir na precisão da informação sendo coletada. Por exemplo, em situações de campo na qual o sensor pode ter um deslocamento com pequenas variações de direção, ou seja, deixar de atingir o alvo por completo, podendo resultar numa perda de qualidade da informação.

Tabela 3.4 – Dados do sensor Crop Circle para diferentes larguras de alvo.

Distância (cm)	NDVI
0	0,015
1	0,1614
2	0,1855
3	0,2313
4	0,2515
5	0,2767
6	0,3070
7	0,3265
8	0,3414
9	0,3590
10	0,3836
15	0,4442
20	0,4948
25	0,5216
30	0,5429
35	0,5418
40	0,5560
45	0,5581
50	0,5339

4. Desenvolvimento experimental

Os capítulos anteriores buscaram fornecer informações teóricas sobre os elementos que seriam de grande importância na composição de um sistema com capacidade para aplicações agrícolas à taxa variável e em tempo-real. Este capítulo descreve os sistemas que foram desenvolvidos durante esse trabalho de mestrado, e que são fonte de importantes observações práticas sobre necessidades, falhas e sucessos, encontradas num sistema agrícola que faça uso de tecnologia.

Foram realizados dois experimentos em campo. O primeiro, foi realizado na fazenda Barrinha de propriedade da Usina São Martinho, localizada no município de Pradópolis, estado de São Paulo, com cultura de cana-de-açúcar. E o segundo, foi realizado no município de Patrocínio, estado de Minas Gerais, com cultura de milho. Salienta-se que o escopo do presente trabalho é o sistema de sensores aplicado no experimento agronômico em campo, e o resultado agronômico não fez parte da dissertação por envolver temas e assuntos demasiadamente abrangentes que tornariam necessário um aprofundamento em áreas de conhecimento muito distantes da engenharia. Apresenta-se, portanto uma descrição geral para que se possa evidenciar o contexto da aplicação do sistema desenvolvida nesse trabalho.

4.1. Experimento em cana-de-açúcar

A realização desse experimento tornou-se viável devido à participação da Usina São Martinho que concedeu uma área experimental agrícola para analisar a correspondência da informação fornecida pelos sensores de refletância e altura com produtividade em culturas de cana-de-açúcar, em uma parceria com a Embrapa Instrumentação Agropecuária.

A usina São Martinho (SÃO MARTINHO, 2009) é umas das maiores processadoras de cana do mundo, tem moagem aproximada de 7 milhões de toneladas de cana por safra e colhe

cerca de 90% de sua cana com máquinas. Fornecer apoio ao desenvolvimento de técnicas que facilitem o manejo da cultura pode ser de grande interesse para uma empresa com uma produção dessa magnitude. Fato que vem ao encontro dos interesses da Embrapa, que tem como missão "viabilizar soluções de pesquisa, desenvolvimento e inovação para a sustentabilidade da agricultura, em benefício da sociedade brasileira" (EMBRAPA, 2009).

A cana-de-açúcar tem dominado a paisagem do Estado de São Paulo nos últimos anos em decorrência do aumento de produção de álcool combustível. É plantada usando-se o colmo da planta, que dá origem a uma nova planta e se desenvolve formando touceiras. Tem capacidade de produção de 4 a 5 anos, quando a produtividade diminui e então é feita a reforma do canavial. A colheita é chamada de corte: "cana planta" é a cana de primeiro corte, "cana soca" de segundo corte e "ressoca" do terceiro corte em diante. O ciclo da cana pode ser de 12 meses ("cana-de-ano") ou de 18 meses ("cana-de-ano-e-meio"), dependendo da época do plantio, setembro-outubro ou janeiro-abril, respectivamente. Variedades precoces, média e tardia são aquelas em que a maturação da cana ocorre no início, meio ou fim da safra, respectivamente.

4.1.1. Objetivo

O nitrogenado (N) é um dos componentes do fertilizante utilizado em plantação de cana mais significativo economicamente, é derivado de petróleo e o seu uso racional é requerido para sustentabilidade da lavoura. É conhecido que a quantidade de clorofila nas folhas, bem como crescimento da planta, tem boa correlação com a quantidade de N no solo na forma disponível às plantas, principalmente se outras variáveis como umidade do solo estiverem constantes. A literatura (HATIFIELD et al., 2008) mostra que NDVI nas folhas das plantas possui uma boa correlação com a quantidade de clorofilas.

O experimento realizado na fazenda Barrinha teve como objetivo geral (envolvendo Usina São Martinho e Embrapa) levantar a resposta de NDVI com a quantidade de N aplicada no solo e com a variedade da cana-de-açúcar. O objetivo específico, relacionado com o trabalho de mestrado, foi desenvolver um sistema embarcado de sensoriamento capaz de coletar informações sobre refletância e altura das plantas em cultura de cana-de-açúcar. O sistema fornece informações que podem ser utilizadas na determinação de relações entre NDVI, altura da planta e produtividade, com o intuito de guiar trabalhos futuros que busquem utilizar sensores para auxiliar nas decisões sobre ações de manejo de cultura.

Foi montado um sistema embarcado em máquina agrícola para coleta de dados composto por dois sensores, Crop Circle e Sonar, ligados a um computador central com capacidade de armazenamento de dados em arquivos de texto. A análise de dados foi realizada por pós-processamento para comparação com a informação de produtividade obtida após a colheita.

4.1.2. O experimento

A área experimental era composta por 20 diferentes variedades de cana-de-açúcar, que foram repetidas e distribuídas aleatoriamente em 3 blocos, resultando num total de 60 parcelas. Em cada bloco foram aplicadas diferentes quantidades de fertilizante nitrogenado: 0, 60 e 120 kilogramas de nitrogênio por hectare (kg/ha). A Tabela 4.1 lista as 20 variedades utilizadas com suas numerações de parcela para cada bloco. E a Figura 4.1 ilustra as disposições dos blocos e como as parcelas foram distribuídas.

Tabela 4.1 – Variedades de cana-de-açúcar.

PARCELA			
BLOCO 01 - 0 kg/ha	BLOCO 02 - 60 kg/ha	BLOCO 03 – 120 kg/ha	VARIEDADE
1	2	3	RB72454
4	5	6	SP80-1816
7	8	9	SP80-1842
10	11	12	SP80-3280
13	14	15	IACSP936006
16	17	18	RB867515
19	20	21	CT91-3767
22	23	24	CT92-1852
25	26	27	CT92-1882
28	29	30	CT92-1891
31	32	33	CT92-1894
34	35	36	CT93-1574
37	38	39	CT93-3532
40	41	42	CTC15
43	44	45	CT94-1209
46	47	48	CT94-3049
49	50	51	CT94-3116
52	53	54	CT94-3165
55	56	57	CT94-3206
58	59	60	CT94-3218

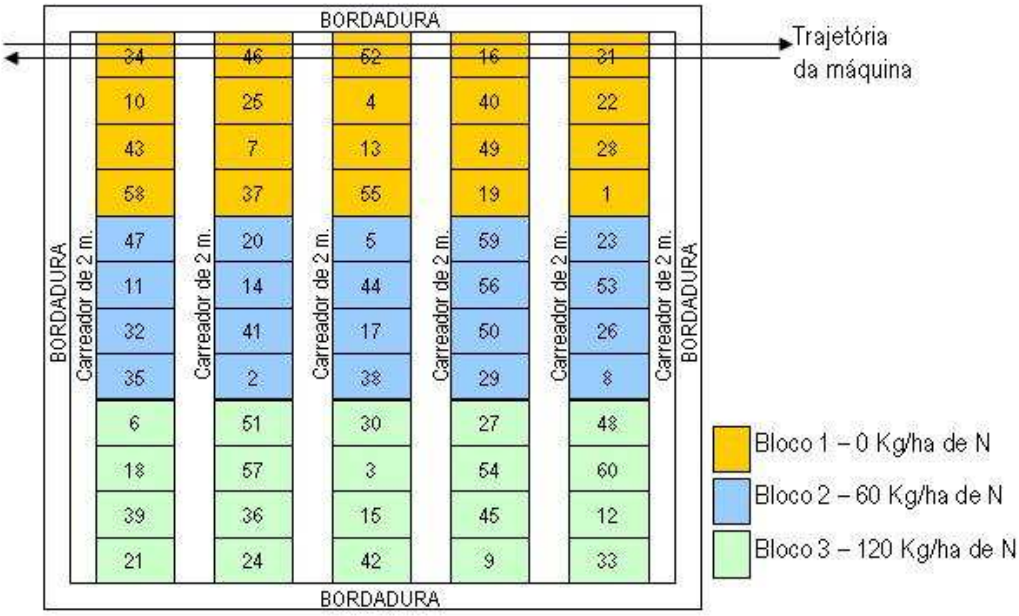


Figura 4.1. Esquemático de distribuição das variedades de cana-de-açúcar em parcelas e blocos.

Cada parcela era composta por 4 linhas, chamadas sulcos, de 15 m de comprimento e espaçadas em 70 cm uma da outra. As duas linhas externas de cada lado são chamadas de borda. O trator seguiu sua rota nas duas linhas centrais, fazendo o caminho de ida em uma linha e o de volta em outra (Figura 4.2). Em cada ida ou volta o trator passava por cinco parcelas consecutivas. Ou seja, para coletar os dados do campo inteiro o trator precisava fazer 24 passagens pela plantação, sendo 12 conjuntos, com as mesmas parcelas, que se repetiam em ida e volta.

O trator levava em média 12 segundos para passar por cada parcela de 15 metros, resultando numa velocidade aproximada de 1,25m/s.

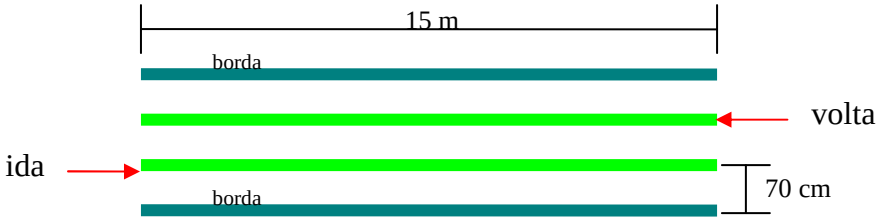


Figura 4.2. Representação de uma das parcelas.

As datas relacionadas com a execução do experimento estão listadas na Tabela 4.2. O plantio foi realizado em outubro de 2004. As coletas de dados foram realizadas depois do terceiro corte e foram repetidas em seis datas diferentes.

Tabela 4.2 – Datas relacionadas ao experimento: plantio, adubação, cortes e coleta de dados.

Data	Ação
19/10/2004	Plantio
20/10/2005	Primeiro corte
19/09/2006	Segundo corte
28/09/2007	Terceiro corte
13/11/2007	Adubação
23/11/2007	Coleta de dados 1
07/12/2007	Coleta de dados 2
21/12/2007	Coleta de dados 3
04/01/2008	Coleta de dados 4
18/01/2008	Coleta de dados 5
01/02/2008	Coleta de dados 6

4.1.3. Sistema embarcado

O sistema embarcado (Figura 4.3) foi elaborado para permitir monitoração da plantação com registro em arquivos de texto com dados coletados a partir de sensoriamento *on-the-go*. Era composto pelos sensores Crop Circle e Sonar, pelo trator responsável pelo deslocamento na plantação e por um computador central (*notebook*) equipado com um *software* dedicado. A comunicação entre sensores e computador foi do tipo serial RS232, com auxílio de conversores serial/USB e hub USB.

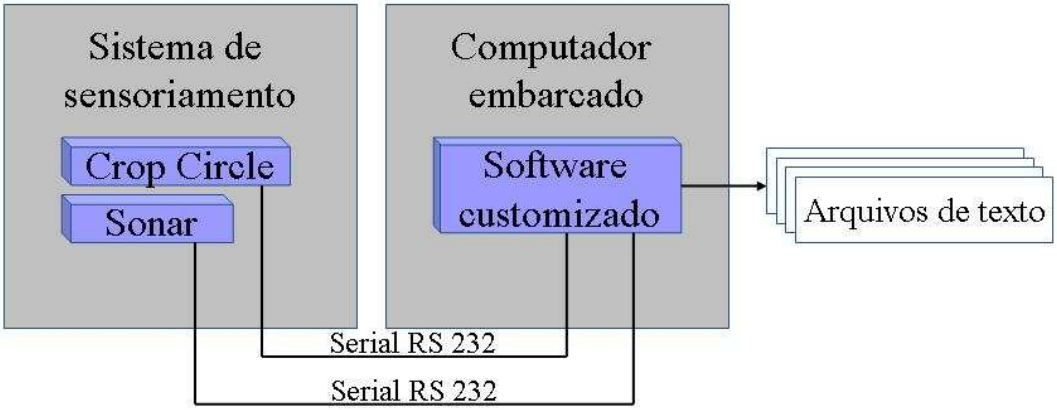


Figura 4.3. Esquema do sistema embarcado no experimento em cana-de-açúcar.

Sistema mecânico

A máquina agrícola usada neste sistema foi disponibilizada pela Usina São Martinho (Figura 4.4). Apelidada de Trâmpulo, é um trator adaptado em forma de pórtico, o que permite sua entrada na plantação de cana quando esta já apresenta estado avançado de crescimento, ou seja, quando já está muito alta. Foi adaptada pela usina com a função de aplicação de agrotóxicos líquidos.

Figura 4.4. Equipamento agrícola utilizado no experimento em cana-de-açúcar.

Sistema de sensoriamento

No sistema para cana-de-açúcar foram usados dois sensores: Crop Circle e Sonar, responsáveis pela coleta de informação sobre refletância e altura das plantas, respectivamente. Com o auxílio de barras de ferro, os dois sensores foram presos ao trator de forma que, conforme o trator se movimentava pelas linhas da plantação, os sensores ficaram posicionados acima das plantas (Figura 4.5). Esse ajuste permitiu o deslocamento dos sensores num plano paralelo ao plano do chão, e com os feixes de detecção sendo emitidos perpendicularmente a esse deslocamento.

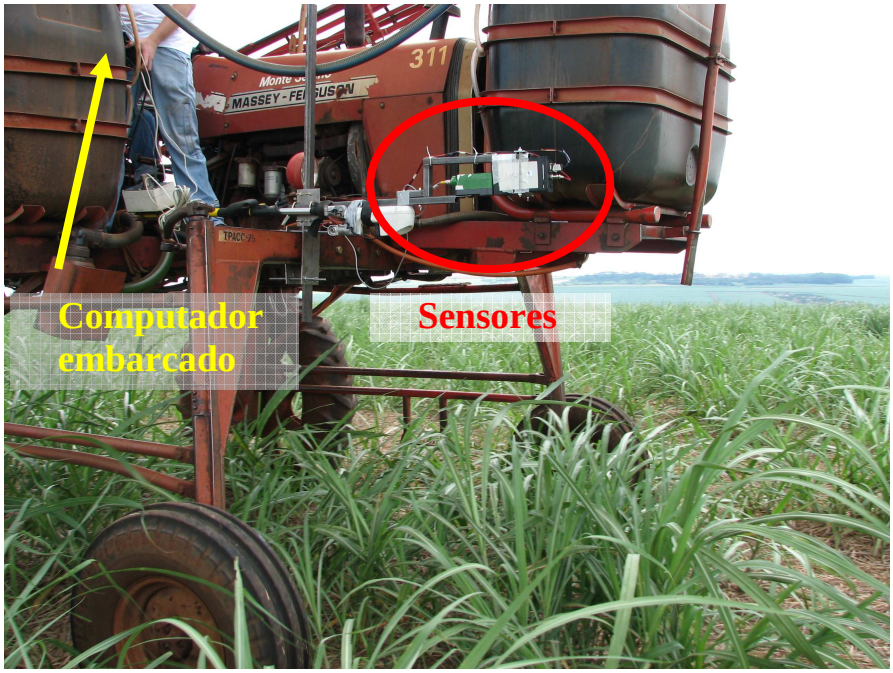


Figura 4.5. Adaptação dos sensores ao equipamento agrícola utilizado no experimento em cana-de-açúcar.

Para cada data de coleta de dados, os sensores foram ajustados em diferentes alturas, levando-se em consideração o crescimento da plantação com o tempo. O objetivo dessa adaptação era obedecer aos limites de funcionamento dos sensores, respeitando as faixas de distância adequadas que o sensor deveria estar do alvo (de 50 cm a 91 cm para o Crop Circle e de 40 cm a 10 m para o Sonar). A Tabela 4.3 indica a altura em relação ao chão, em metros, em que os sensores foram posicionados no trator para cada coleta.

Tabela 4.3 – Altura dos sensores para coleta de dados.

Data	Ação	Altura dos sensores (m)
23/11/2007	Coleta de dados 1	1,4
07/12/2007	Coleta de dados 2	1,7
21/12/2007	Coleta de dados 3	1,9
04/01/2008	Coleta de dados 4	2,2
18/01/2008	Coleta de dados 5	2,4
01/02/2008	Coleta de dados 6	2,5

Software dedicado

O *software* dedicado para o sistema foi desenvolvido em ambiente Labview, que é uma plataforma de desenvolvimento da National Instruments, baseada em elementos gráficos (NATIONAL, 2009). Foi desenvolvido para o experimento em cana-de-açúcar, com a especificação de que deveria ser capaz de coletar dados dos sensores Crop Circle e Sonar e armazená-los em arquivos de texto para posteriores análises.

O programa foi desenvolvido para acoplar até quatro sensores: 1 Crop Circle, 2 sonares e 1 GPS, mas no decorrer do experimento foram utilizados apenas 1 Crop Circle e 1 Sonar. O passo inicial de funcionamento do *software* é a configuração das portas seriais de comunicação ligadas aos sensores. A Figura 4.6 mostra a tela de configuração das portas seriais que serão usadas por cada sensor.

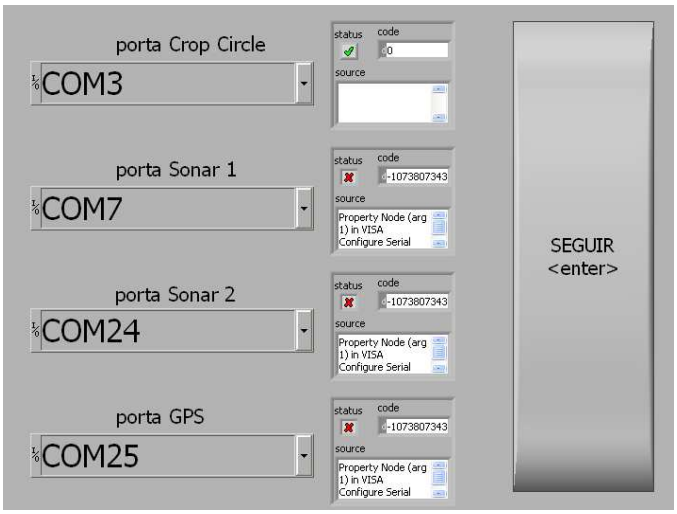


Figura 4.6. Tela inicial de configuração de portas seriais.

A estrutura principal do programa é mostrada na Figura 4.7 através de um diagrama. Feita a declaração e inicialização de variáveis, as sub-rotinas responsáveis pela leitura dos dados dos sensores e pela gravação desses dados em arquivos de texto passam a ser executados até que ocorra um comando de parada executado pelo usuário.

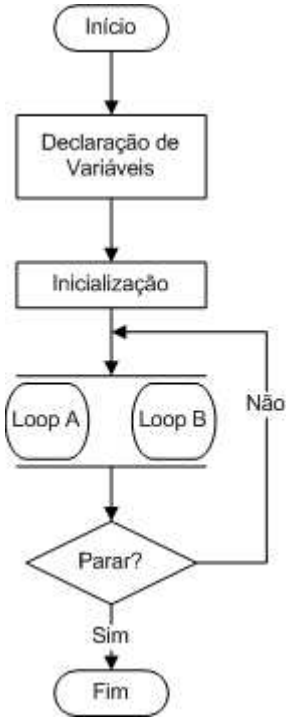


Figura 4.7. Diagrama do laço de repetição principal do software para o experimento em cana-de-açúcar.

Cada sensor tem um bloco responsável pela leitura de sua respectiva porta serial. Primeiro é verificado se existe algum dado no *buffer* de entrada da porta serial. Se a porta serial estiver vazia, o programa continua verificando-a repetidamente até que exista um dado e quando isso ocorrer é feito seu recebimento. Como cada sensor disponibiliza a informação em formato diferente um do outro, cada bloco foi dedicado para receber cada mensagem de forma específica, desmontá-la e guardar apenas a informação desejada em variáveis locais que serão utilizadas para o processo de gravação em arquivo. A Figura 4.8 representa um desses blocos.

Figura 4.8. Diagrama do bloco de leitura do *software* para o experimento em cana-de-açúcar.

Paralelo aos blocos de leitura também é executado repetidamente o bloco de gravação dos dados em arquivo de texto (Figura 4.9). O usuário é responsável por determinar o início da gravação dos dados em arquivo. Autorizada a gravação, o *software* faz a leitura das variáveis locais onde estão armazenados temporariamente os dados de leitura dos sensores e então grava essa informação em arquivo. Os processos de leitura das variáveis com os dados e de gravação são executados em “fila”, ou seja, é lido o dado de um sensor por vez e gravado em seu respectivo arquivo. Para cada sensor em uso é criado um arquivo de texto diferente para armazenamento de dados. Quando o usuário executa o comando que determina o fim da gravação em arquivo, então o contador utilizado para identificação de parcelas é incrementado em uma unidade.

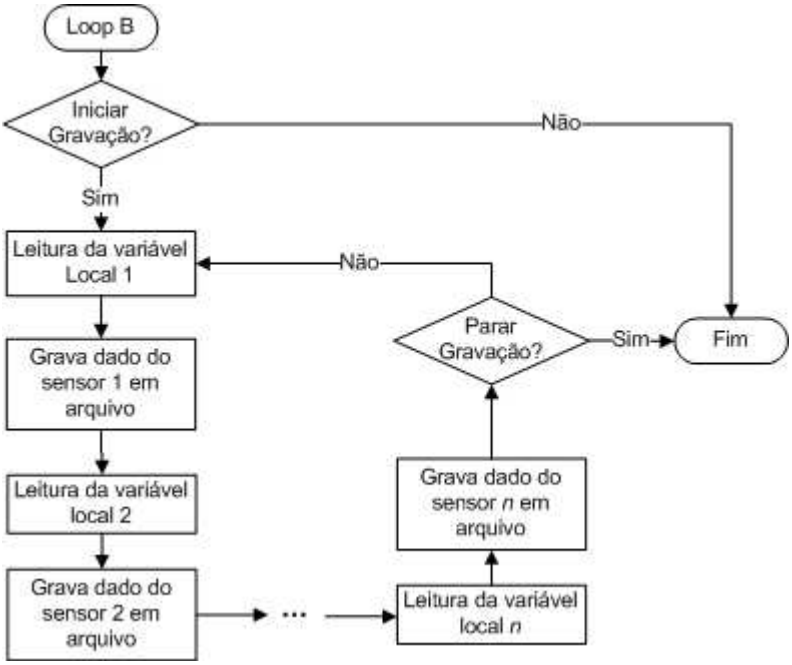
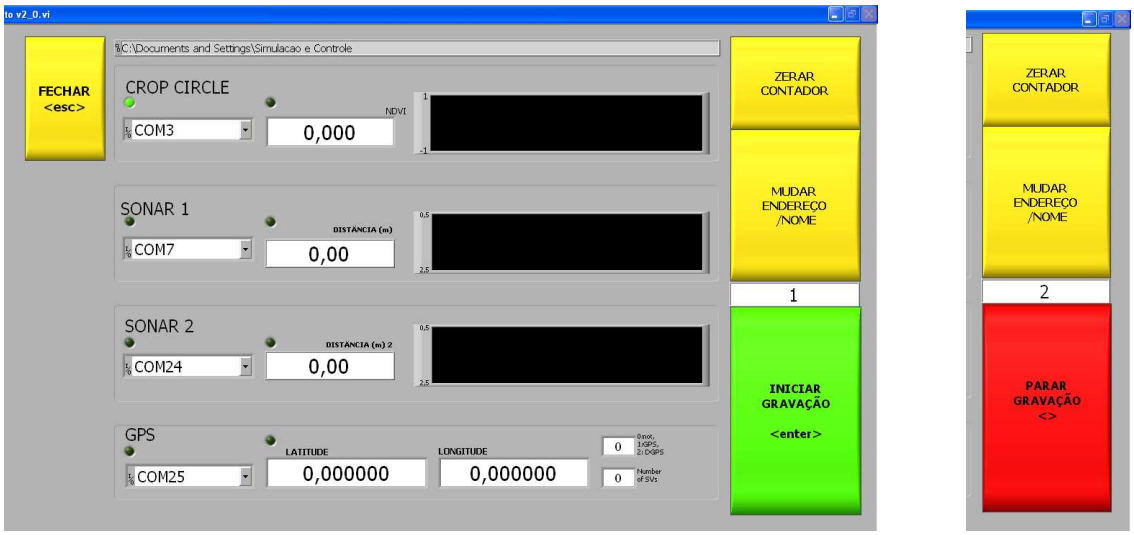


Figura 4.9. Diagrama do bloco de gravação do *software* para o experimento em cana-de-açúcar.

Na Figura 4.10 (a), é mostrado o painel principal do *software* dedicado. Na Figura 4.10 (b), é mostrado um detalhe da aparência do botão de gravação quando este está em execução.



(a) (b)

Figura 4.10. (a) Painel principal do *software* dedicado; (b) Detalhe do programa em execução.

Para cada sensor é gerado um arquivo de texto. O usuário tem a opção de escolher o local onde esse arquivo vai ser gravado e um complemento no seu nome, que é gerado contendo

três informações: dia em que o dado foi coletado, complemento definido pelo usuário e nome do sensor. Por exemplo, para os dados coletados no dia 04/01/2008, com o trator passando pela primeira linha de parcelas, apenas no movimento de ida, o arquivo do Crop Circle recebe o nome "2008_01_04 - 1a - CropCircle.txt" e o arquivo do sonar recebe o nome "2008_01_04 - 1a - Sonar.txt". Como, no campo todo, existiam 12 linhas de parcelas, os complementos foram numerados de 1 a 12, mais as letras a ou b para diferenciar ida ou volta, respectivamente.

Os arquivos do sensor Crop Circle reúnem as seguintes informações separadas por vírgula: instante da coleta do dado (hora, minuto e segundo), valor do contador controlado pelo usuário, valor de NDVI, valor de R_{NIR} e valor de R_{VIS}.

Os arquivos do sensor Sonar reúnem as seguintes informações separadas por vírgula: instante da coleta do dado (hora, minuto e segundo), valor do contador controlado pelo usuário, valor da distância do sensor ao alvo.

4.2. Experimento em milho

O segundo experimento foi realizado em cultura de milho na fazenda Bom Jardim no município Patrocínio, em Minas Gerais em uma parceria entre pesquisadores da Embrapa Milho e Sorgo, Embrapa Instrumentação Agropecuária, Jacto e Terrena.

A Terrena Agronegócios atua desde 2004 "na prestação de serviços de agricultura de precisão, mantendo parceria com a Embrapa na difusão desta tecnologia para a região do cerrado mineiro" (TERRENA, 2009).

A Jacto é uma empresa nacional que iniciou seus trabalhos produzindo polvilhadeiras. Hoje forma um grupo que produz implementos agrícolas, tais como pulverizadores de barra, colhedora de café e adubadoras. O grupo Jacto tem como característica cultural o "trabalho

permanente com pesquisa e desenvolvimento tecnológico aplicados à produção" (JACTO, 2009).

Nesse experimento estiveram envolvidas a Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas, MG) e Embrapa Instrumentação Agropecuária (São Carlos, SP).

4.2.1. Objetivo

O objetivo da parceria entre as empresas envolvidas era estudar estratégias de manejo de fertilidade do solo utilizando técnicas de Agricultura de Precisão, com a exploração das características espectrais dos pigmentos foliares (principalmente clorofila) para utilizar as plantas de milho como indicadores de disponibilidade de nitrogênio no solo com o uso de sensores. O objetivo específico, relacionado com o trabalho de mestrado, foi desenvolver um sistema embarcado de sensoriamento e controle para aplicação de fertilizante à taxa variável baseado em informações de refletância das plantas de milho, com a coleta de informações georeferrenciadas em modo *on-the-go*.

4.2.2. O experimento

O experimento foi conduzido em uma propriedade agrícola do Município de Patrocínio sobre cultivo de milho, com data de plantio de 04/11/2007. Era composto por quatro áreas de tratamento, cada uma com 9000m^2, formadas por 20 linhas de plantio e 70.000 plantas/ha. Cada faixa tinha 600m de comprimento, com espaçamento entre as linhas de 0,75m.

Foram utilizados quatro tratamentos diferentes para cada uma das quatro faixas (Figura 4.11): aplicação de Nitrato de amônio (32-00-00) à taxa variável, um tratamento controle ou testemunha (0 kg/ha), aplicação de N na dose de 400 kg/ha de forma convencional e aplicação em uma faixa dividida em doses de 400, 300 e 200 kg/ha.

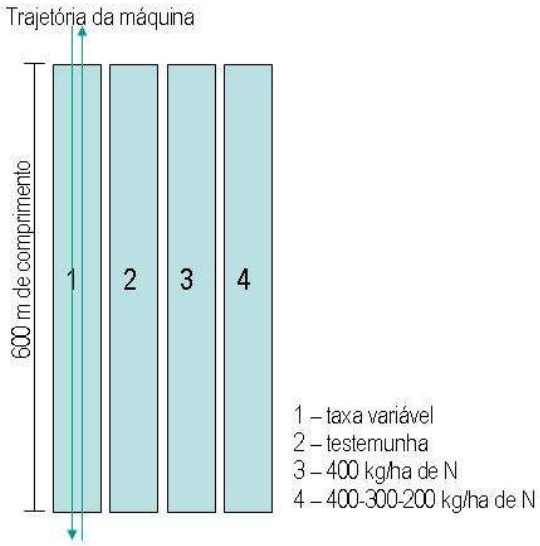


Figura 4.11. Área experimental em milho.

O experimento foi dividido em três etapas: coleta, processamento e aplicação. Na primeira, foi realizada a coleta dos dados com os sensores embarcados, realizada no dia 13 de dezembro de 2007. Na segunda etapa foi realizado um processamento dessa informação coletada para determinar as taxas de fertilizantes que seriam utilizadas. Na terceira etapa, realizada no dia 14 de dezembro de 2007, foi feita a aplicação do fertilizante nitrogenado com base nos dados processados.

Na etapa de coleta de dados o sensor Crop Circle e o receptor GPS foram acoplados ao trator utilizado. Dentre as vinte linhas contidas em cada faixa de tratamento, foram escolhidas duas para serem monitoradas, com o equipamento realizando o movimento de ida e volta em cada linha.

4.2.3. Sistema embarcado

O sistema embarcado foi desenvolvido para permitir monitoração e controle de aplicação de insumos à taxa variável. Era composto por um sensor Crop Circle, um GPS, um trator Uniport 3000 NPK e por um computador central equipado com *softwares* dedicados (Figura 4.12). A comunicação entre sensores e computador foi do tipo serial RS232. Foram

desenvolvidos dois *softwares* dedicados, um para sensoriamento com aquisição dos dados e outro para controle de aplicação.

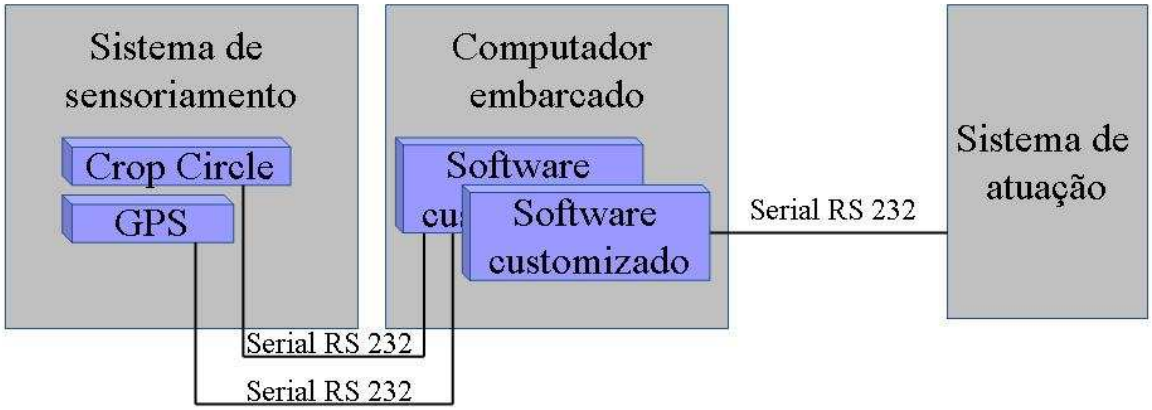


Figura 4.12. Esquema do sistema embarcado no experimento em milho.

Sistema mecânico

A máquina agrícola utilizada no experimento foi o equipamento Uniport 3000 NPK canavieiro (Figura 4.13), que faz aplicação de adubo sólido granulado. Pode operar em velocidade de até 18km/h. Possui um vão livre de 1,25 metros de altura que permite a entrada em plantações maiores. Tem um sistema de regulagem de bitola, que pode variar de 2,62 a 3,22 metros, e que busca evitar a compactação do solo e pisoteio na linha da plantação. A barra de aplicação de fertilizantes tem capacidade de até 9 linhas, podendo operar também com 3 ou 6 linhas. Tem 8,05 metros de comprimento, altura total de 3,7 metros, distância entre eixos de 3,91 metros e largura de 3,20 metros com barras e bitola fechadas.

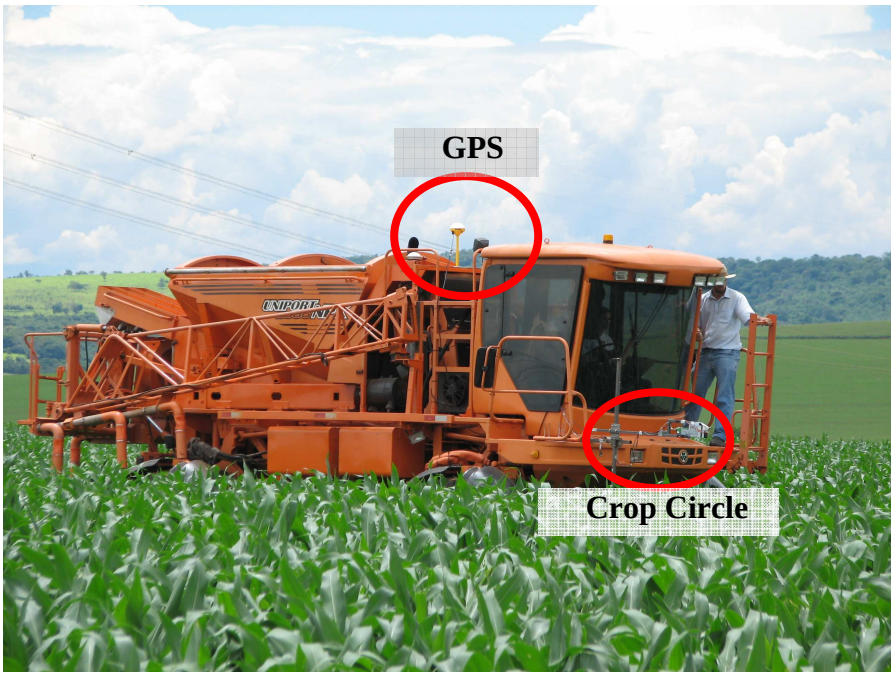
Figura 4.13. Uniport 3000 NPK utilizado no experimento em milho.

Sistema de sensoriamento

No experimento com milho, foram utilizados os sensores Crop Circle e GPS. O sensor GPS foi posicionado sobre o teto do trator para uma melhor captação dos satélites. O sensor Crop Circle foi adaptado na parte da frente do trator com auxílio de barras de ferro, que o deixaram com um alcance maior do que a dianteira da máquina, resultando em um comprimento total de 9,25 metros de equipamento (trator mais sensor embarcado). A forma como o sensor foi embarcado permitiu que se deslocasse num plano paralelo ao plano do chão, passando por cima do topo das plantas e com os feixes de detecção sendo emitidos perpendicularmente a esse deslocamento (Figura 4.14).

(a)

(b)



(c)

Figura 4.14. Fotos da adaptação dos sensores ao trator.

Sistema de controle de aplicação

O equipamento Uniport possui um sistema de elevada uniformidade para distribuição de fertilizantes através de fluxo de ar. O controlador eletrônico de adubação, chamado NPK, pode ser acionado por controle manual para aplicação convencional em taxa fixa, ou pode fazer aplicação com taxas variáveis ou fixas seguindo mapas de fertilidade do solo com orientação georeferrenciada.

O controlador NPK possui um protocolo próprio de comunicação baseado em comunicação serial com tráfego de caracteres ASCII. O protocolo enviado pelo computador que está controlando a aplicação deve conter: um campo de identificação, a quantidade de caracteres usadas na frase, o valor da dose desejada e um *checksum*. O controlador está preparado para enviar valores de doses de no máximo 9990 kg/ha e mínimo de 1 kg/ha. A resposta do NPK ao computador que o está controlando contém: um campo de identificação, a quantidade de caracteres contidos na frase, o valor da dose que está sendo enviada no momento e um *checksum*. O NPK apenas envia dados após receber a frase de comando.

Existe um tempo de resposta desde o momento em que é enviado o comando pelo usuário ou computador com a dose desejada até o momento em que o produto atinge o alvo, ou seja, o chão. Testes em campo mostraram que esse tempo de resposta é aproximadamente 3 segundos, sendo que 1 segundo é atribuído ao sistema hidráulico e 2 segundos ao tempo que o insumo leva para sair da máquina e atingir o chão. O comando de início da aplicação deve ser acionado pelo usuário assim que a parte da frente do trator entra na plantação. O *software* então é o responsável por fazer o controle do instante correto do acionamento do sistema mecânico de aplicação levando em consideração os tempos de resposta da máquina.

A Figura 4.15 representa o comportamento do sistema levando em consideração os fatores para controle da aplicação. Quando o trator atinge o ponto A (Figura 4.15 (a)), o usuário deve acionar o comando de início da aplicação. O sistema fica então responsável por considerar os atrasos envolvidos para acionar o mecanismo. Para chegar no ponto C o equipamento leva no total 4 segundos ao percorrer 8 metros (comprimento do equipamento) à uma velocidade de 2m/s. Como o tempo de resposta do equipamento é de 3 segundos, então o mecanismo deve ser acionado após 1 segundo do comando de início (equipamento está no ponto B e percorreu 2 metros) (Figura 4.15 (b)) para que o produto atinja o chão quando o aplicador, que fica no fim da máquina, chegar ao início da plantação (Figura 4.15 (c)).

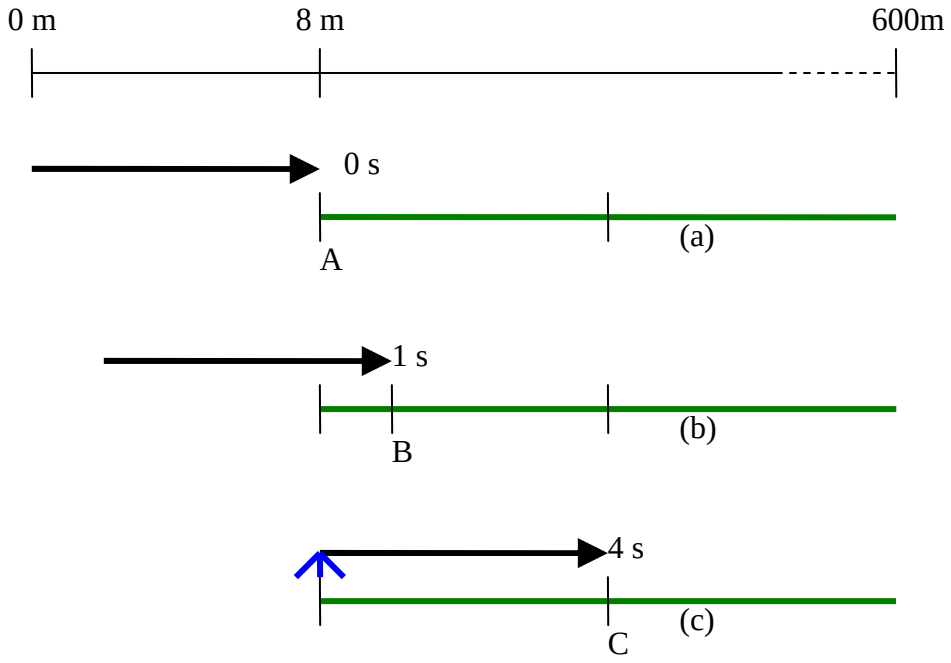


Figura 4.15. Controle do mecanismo de aplicação (a) início comandado pelo usuário; (b) espera do sistema; (c) produto sendo aplicado.

Software dedicado – coleta de dados

Foi utilizado o ambiente Labview para o desenvolvimento de dois *softwares* dedicados: o primeiro de aquisição de dados de sensoriamento e o segundo para controle de aplicação.

O primeiro *software* dedicado era responsável pela coleta de dados do sensor Crop Circle e do GPS. A estrutura do programa é a mesma do sistema do experimento em cana-de-açúcar representado pelos diagramas das Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. A diferença que existe está no processo de gravação, no qual é criado um arquivo de texto a mais que contém a junção dos dados dos dois sensores sincronizados no tempo. Esse arquivo de texto é utilizado no processamento dos dados para determinação da dose a ser aplicada.

Processamento de dados

O processamento dos dados foi realizado utilizando-se os arquivos gerados pelo *software* de coleta de dados. Foi utilizada a informação de localização do GPS e de refletância do Crop Circle. Os valores de localização fornecidos pelo GPS foram utilizados para calcular a distância percorrida pelo trator desde o início até o fim da linha, gerando um vetor de aplicação (VtA) com aproximadamente 600 pontos equivalente a cada metro da linha de plantação que está sendo manipulada. A análise dos dados para determinação da dose a ser aplicada foi realizada de forma empírica com base na observação dos dados de NDVI coletados. Em cada um dos pontos do VtA foi registrado a dose a ser aplicada daquela localização. Esse vetor foi gravado em formato de arquivo de texto para ser utilizado pelo programa responsável pelo controle da aplicação

Software dedicado – controle de aplicação

O segundo *software* era responsável pelo controle da aplicação do fertilizante à taxa variável a partir da informação gerada no processamento dos dados da coleta realizada pelos sensores em campo.

A estrutura principal do programa de aplicação é mostrada na Figura 4.16 através de um diagrama. Primeiro é realizada a declaração e inicialização das variáveis do programa, e também a leitura do arquivo de texto que contém a informação com os valores de doses a serem aplicadas. Esses dados são transformados novamente em um vetor numérico (VtA) para ser usado no controle de aplicação. As sub-rotinas de controle de aplicação passam a ser executadas até que ocorra um comando de parada executado pelo usuário.

Figura 4.16. Diagrama do laço de repetição principal do *software* utilizado no experimento com milho.

Na sub-rotina de controle da dose de aplicação (Figura 4.17), o usuário determina se a taxa a ser aplicada será automática ou manual. No caso de entrada manual, o *software* carrega o vetor dos dados de aplicação repetidamente com o valor escolhido pelo usuário. Caso seja automática, o vetor utilizado será aquele que foi carregado no laço principal com valores determinados no processamento de dados, o VtA. Para início da aplicação é esperado comando de início feito pelo usuário, o *software* então é responsável pelo controle do tempo de envio da taxa correta levando em consideração o tempo de resposta do equipamento desde o comando até a aplicação chegar ao chão no local desejado. O valor da dose que deve ser aplicada naquele momento é carregado em uma variável local (Vdose) que será usada na sub-rotina de comunicação serial com o controlador NPK.

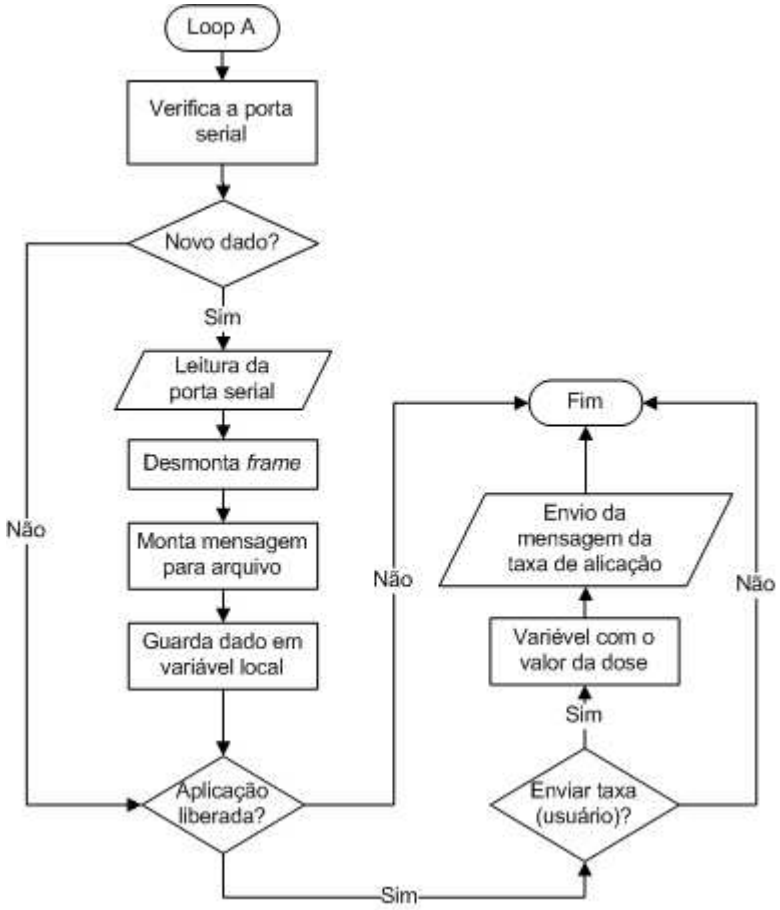


Figura 4.17. Diagrama do bloco de controle da dose de aplicação do *software* utilizado no experimento com milho.

A sub-rotina de comunicação com o controlador NPK (Figura 4.18) verifica se existe algum dado de entrada na porta serial. Caso existam dados de entrada é realizada sua leitura, com armazenamento em arquivo de texto. Para o envio de comandos de dose ao controlador é verificado se o usuário permitiu a ação e se a aplicação está liberada, caso os dois sejam afirmativos a variável local, Vdose, que contém o valor da dose a ser aplicada é usada e o comando enviado.

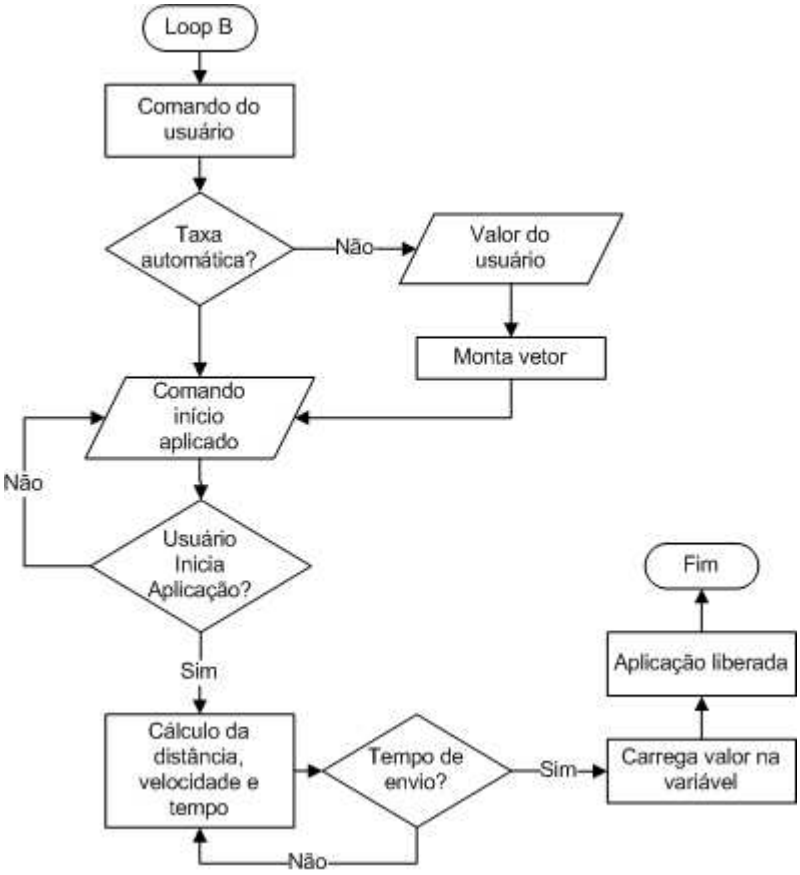


Figura 4.18. Diagrama do bloco de comunicação com o controlador NPK do *software* utilizado no experimento com milho.

5. Resultados e discussões

5.1. Experimento em cana-de-açúcar

Coleta de dados

Os dados coletados pelo *software* dedicado para o sensoriamento foram salvos em arquivos de texto para uso na etapa de análise de dados. Foram gerados ao todo 288 arquivos com informações dos sensores Crop Circle e Sonar.

Por exemplo, a Tabela 5.1 contém a informação do sensor Crop Circle para a data de coleta D1 (23/11/2007) com dados de NDVI da primeira parcela, da primeira linha, no movimento de ida. No total são dados de 2 sensores, 60 parcelas com 2 repetições, em 6 datas de coleta, ou seja, no experimento total foram geradas 1440 tabelas como esta.

Tabela 5.1 – Resultados de NDVI, médias por blocos e datas.

0,396	0,408	0,421	0,388	0,399	0,410
0,387	0,452	0,427	0,349	0,352	0,435
0,405	0,470	0,415	0,368	0,344	0,442
0,412	0,452	0,412	0,375	0,342	0,469
0,398	0,424	0,387	0,430	0,354	0,478
0,391	0,411	0,437	0,463	0,364	0,496
0,377	0,405	0,425	0,512	0,389	0,455
0,387	0,425	0,446	0,476	0,382	0,416
0,376	0,422	0,426	0,379	0,434	0,382
0,373	0,387	0,426	0,36	0,508	0,382
0,389	0,359	0,440	0,335	0,564	0,397
0,364	0,384	0,438	0,337	0,544	0,418
0,353	0,454	0,428	0,346	0,469	0,468
0,343	0,474	0,392	0,384	0,439	0,466
0,350	0,509	0,380	0,412	0,411	0,397
0,368	0,531	0,411	0,438	0,447	0,387
0,357	0,551	0,456	0,449	0,456	0,413
0,357	0,525	0,455	0,447	0,444	0,520
0,377	0,469	0,391	0,457	0,446	0,512

Vale destacar a importância de utilizar formas de gerenciamento de dados mais eficientes, que facilitem o armazenamento e processamento de dados, principalmente se existir

necessidade de processamento em tempo-real, situação que exige rapidez no tráfego de informações.

Em relação à forma de comunicação de dados, pode-se destacar que a comunicação RS232, apesar de ter funcionado bem para a finalidade do experimento, pode se tornar não adequada para sistemas mais complexos, principalmente por não ser multiponto e nem robusta para aplicações embarcadas. Uma rede multiponto é aquela em que os nós podem ser interligados usando-se apenas um circuito tronco.

Existem soluções tecnológicas e conceituais que não foram exploradas nesse trabalho de mestrado mas que apresentam grande potencial para geração de soluções no desenvolvimento de sistemas para aplicações agrícolas, dentre elas pode-se destacar sistemas distribuídos, banco de dados, fusão de sensores, padronização em máquinas agrícolas, entre outras.

O gráfico da Figura 5.1 representa os valores de NDVI da coleta das seis datas de incursão em campo, no qual cada linha representa cada uma das vinte variedades de cana-de-açúcar utilizadas no experimento (ver Tabela 4.1). Nesse gráfico, não se fez distinção entre os blocos de doses de aplicação de fertilizantes. Aparentemente todas as variedades nas últimas datas de coleta de dados indicam que os valores de NDVI passam a convergir para valores próximos.

O gráfico da Figura 5.2 representa os valores de altura das plantas da coleta das seis datas de incursão em campo, no qual cada linha representa cada uma das vinte variedades de cana-de-açúcar utilizadas no experimento (ver Tabela 4.1). O gráfico indica, como o esperado, o crescimento das plantas conforme o passar do tempo.

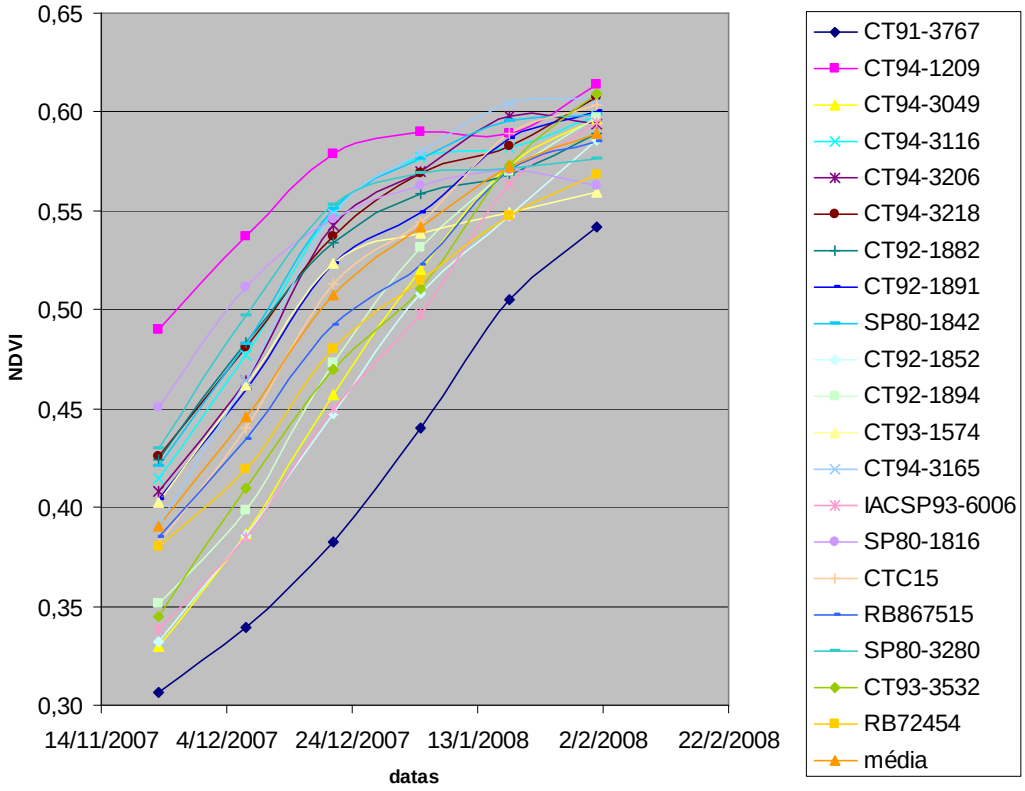


Figura 5.1. Dados de NDVI do sensor Crop Circle no experimento em cana-de-açúcar.

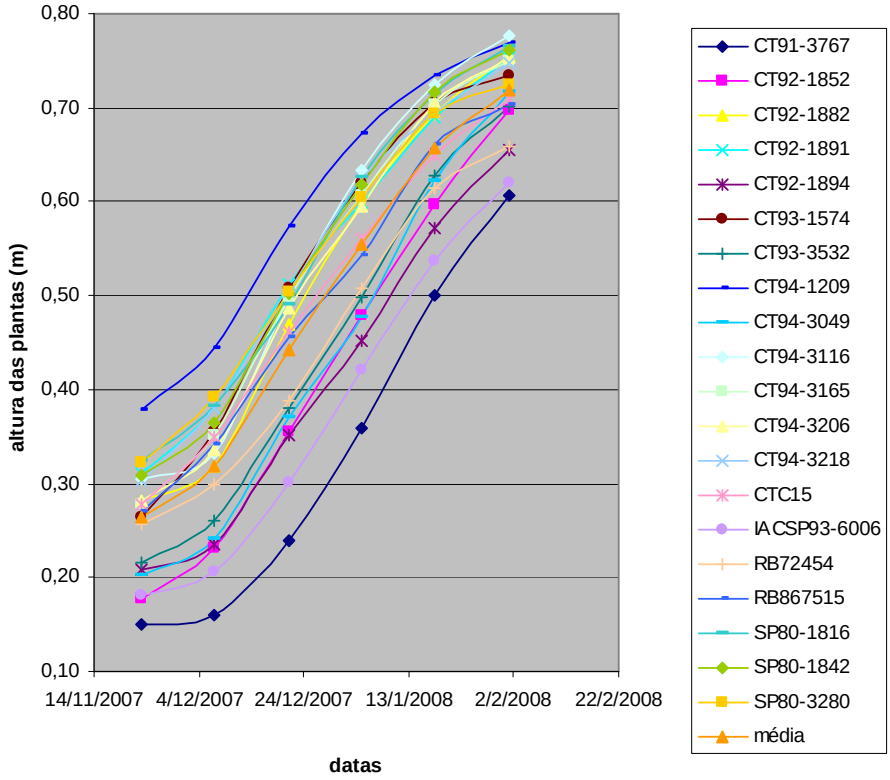


Figura 5.2. Dados de altura da planta do sensor Sonar em vinte variedades de cana-de-açúcar.

As Tabelas 5.2 e 5.3 indicam as médias de NDVI e de altura da planta, respectivamente, para cada uma das seis datas de coleta de dados. Ambas consideram todas as variedades de um mesmo bloco de aplicação de fertilizantes (ver Figura 4.1) como sendo uma média total, totalizando os três blocos de aplicação. No Apêndice A.1, encontra-se uma tabela com as médias de NDVI e altura das plantas para cada parcela em todas as datas de coleta de dados.

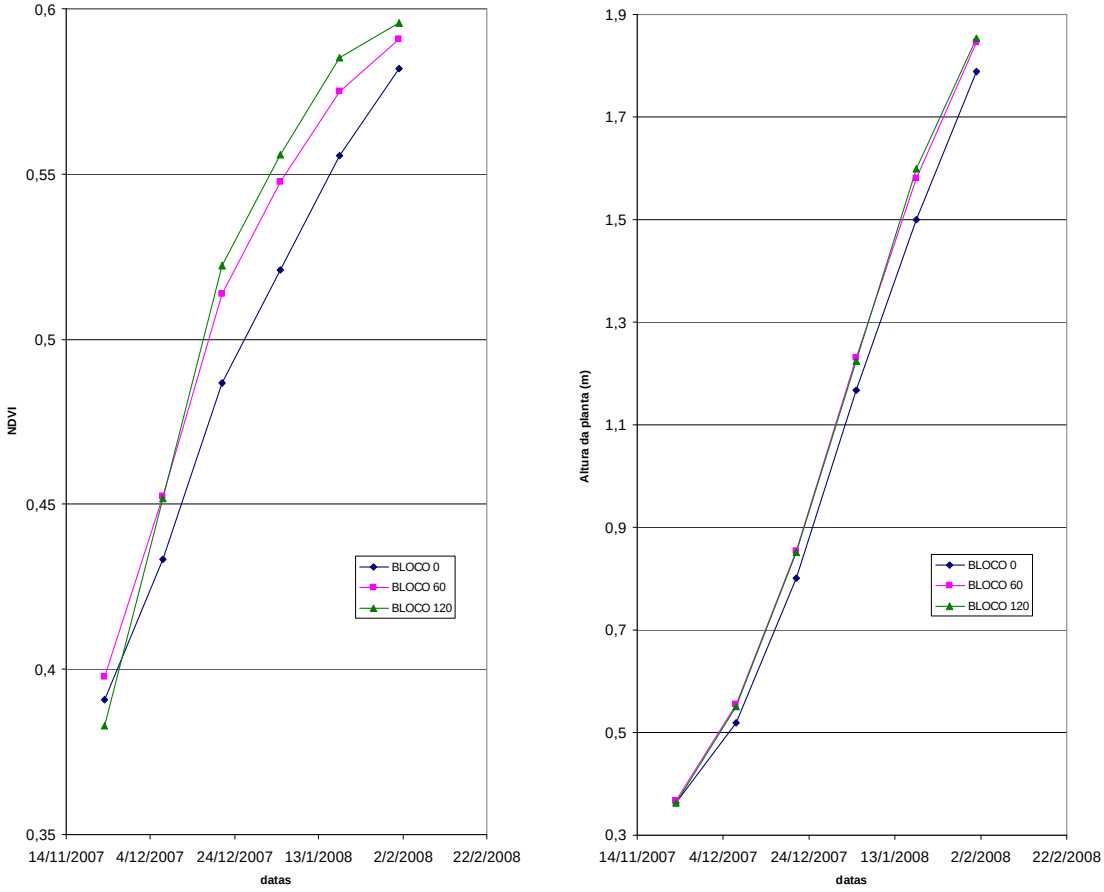
Tabela 5.2 – Resultados de NDVI, médias por blocos de aplicação e datas.

BLOCO	NDVI					
(kg/ha de N)	Data 1	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5	Data 6
0	0,394	0,437	0,490	0,523	0,559	0,583
60	0,401	0,457	0,520	0,551	0,579	0,592
120	0,397	0,454	0,570	0,562	0,588	0,597

Tabela 5.3 – Resultados de altura da planta, médias por blocos aplicação e datas.

BLOCO	ALTURA (m)					
(kg/ha de N)	Data 1	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5	Data 6
0	0,37	0,53	0,81	1,18	1,51	1,78
60	0,38	0,57	0,87	1,24	1,59	1,84
120	0,37	0,56	0,87	1,24	1,61	1,85

Os gráficos das Figuras 5.3 (a) e (b) são representações das Tabelas 5.2 e 5.3. Pelos gráficos das Figuras 5.3 (a) e (b), para NDVI e altura das plantas, respectivamente, nota-se que as culturas com maior dose de aplicação tiveram índices maiores, fato que destaca uma das vantagens do uso de sensores embarcados que é possibilitar a identificação de comportamentos da cultura antes mesmo da colheita.



(a) (b)

Figura 5.3. Médias por blocos de aplicação e data para (a) NDVI e (b) altura das plantas.

Produtividade de cana-de-açúcar

Nesta sessão são apresentados os resultados de produtividade fornecidos pela Usina São Martinho. O objetivo de mostrar os dados de produtividade agrícola obtidos no experimento é ilustrar a utilidade dos dados obtidos pelo sensor. Como o estudo de vários parâmetros agronômicos que interferem ou influem nos resultados de produtividade agronômica não faz parte do escopo desse trabalho não serão realizadas aqui as considerações da obtenção do resultado.

A Tabela 5.4 mostra a média por blocos de dose de aplicação dos resultados de produtividade gerados pelas análises agronômicas realizados pela usina São Martinho. Os

índices utilizados para determinar a qualidade de cana-de-açúcar foram: Brix, Pol, PBU, Fibra, PC, Pureza, AR Caldo, AR Cana, ATR, TCH, TPH. Entende-se por qualidade de cana-de-açúcar a concentração total de açúcares (sacarose, glicose e frutose) recuperáveis no processo industrial, expressa em kg por tonelada de cana. As definições dos índices podem ser encontradas no Manual de Instruções da CONSECANA – Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (CONSECANA, 2009), sendo que no Apêndice B é feita uma breve explicação sobre o significado dos índices citados acima baseada nesse manual. No Apêndice A.2 encontra-se a tabela completa dos resultados de produtividade para cada parcela.

Tabela 5.4 – Médias de produtividade por blocos.

	NDVI	Altura	Brix	Pol	PBU	Fibra	PC	Pureza	AR Caldo	AR Cana	ATR	TCH	TPH
bloco 0	0,583	1,781	20,09	17,83	134,78	11,66	15,18	88,59	0,60	0,51	149,26	83,47	12,65
bloco 60	0,592	1,837	20,35	18,15	135,97	11,75	15,43	89,09	0,58	0,49	151,50	81,48	12,49
bloco 120	0,597	1,850	20,41	18,21	140,63	12,13	15,38	89,11	0,58	0,49	150,99	81,04	12,40

ATR é o açúcar total recuperável e pode ser relacionado com a produtividade de cana. As seguintes relações são possíveis:

1 kg de açúcar = 0,997 x 1,05263 = 1,0495 kg de ATR.

1 litro de álcool anidro corresponde a 1,7651 kg de ATR

1 litro de álcool hidratado corresponde a 1,6913 kg de ATR

5.2. Experimento em milho

Coleta de dados

Assim como no experimento em cana-de-açúcar, os dados coletados pelo *software* dedicado para o sensoriamento foram salvos em arquivos de texto para uso na etapa de processamento. Foram gerados ao todo 34 arquivos com informações dos sensores de

refletância e do GPS. Os gráficos do Apêndice C, mostram os valores de NDVI monitorados ao longo do percurso de cada linha nas faixa de aplicação percorrida pelo sistema.

A velocidade de deslocamento do equipamento era de aproximadamente 2m/s, a capacidade de coleta de 1 dado por segundo em um percurso de 600 metros. Assim, foram coletados aproximadamente 300 pontos por linha de plantio. Mudanças na velocidade de deslocamento do equipamento podem mudar significantemente a taxa de amostragem obtida no experimento: velocidades maiores causam uma quantidade menor de dados coletados.

Como mostrado na Figura 4.11 o experimento era composto por quatro faixas, em cada faixa eram coletados dados de duas linhas de plantio, repetindo-se para cada linha o movimento de ida e de volta. O gráfico da Figura 5.4 apresenta os dados coletados para a faixa 1, linha de plantio 1 no movimento de ida. A curva vermelha indica os dados originais. Para a construção da curva azul foi realizada uma operação de média dos pontos vizinhos a partir dos dados originais. Esse tratamento simples dos dados permite uma visualização mais clara de características que possam ajudar ao usuário realizar uma interpretação da plantação, tais como identificação de locais onde exista a necessidade de uma quantidade maior de fertilizante nitrogenado e outras partes que necessitem uma quantidade menor. A Figura 5.5 exemplifica um caso em que os dados permitem visualizar claramente uma falha no meio da plantação.

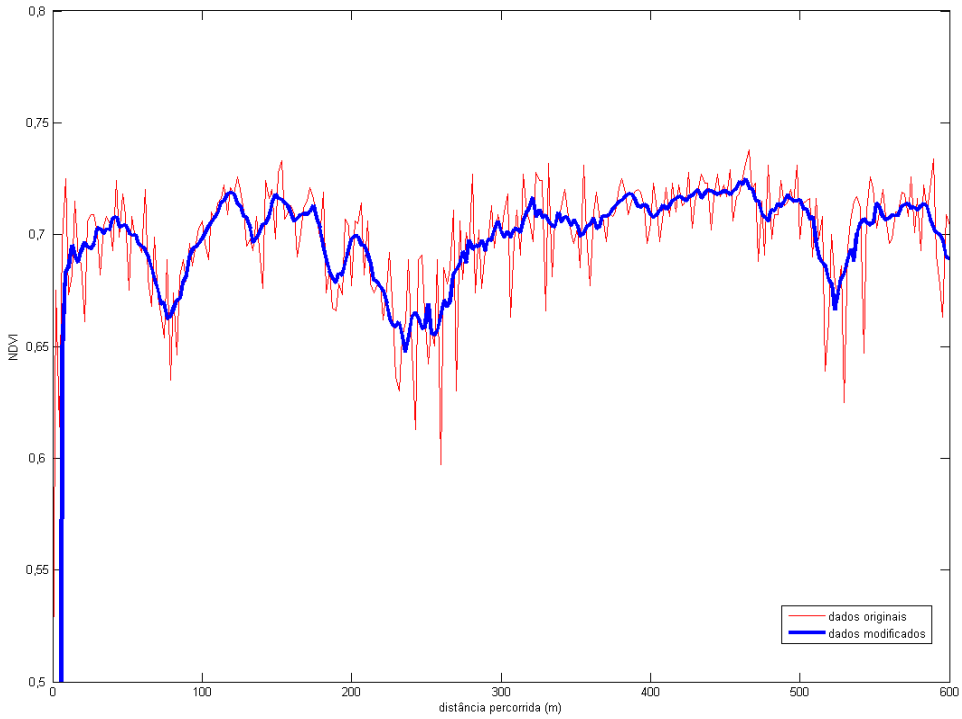


Figura 5.4. NDVI da faixa 1 linha 1 sentido de ida.

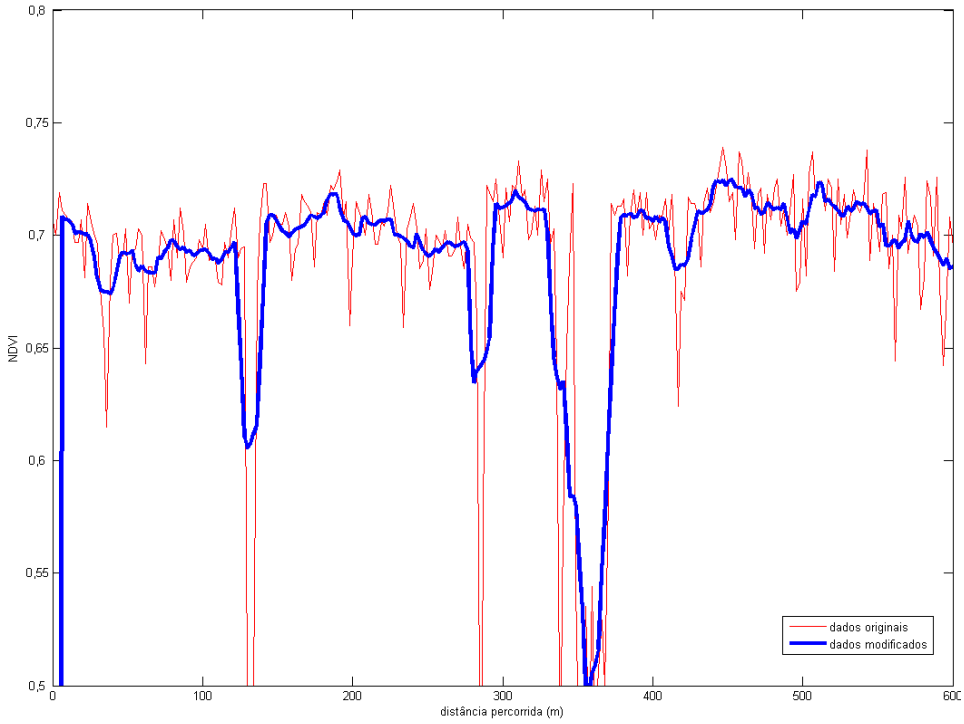


Figura 5.5. NDVI da faixa 2 linha 1 no sentido de volta.

Curvas de aplicação

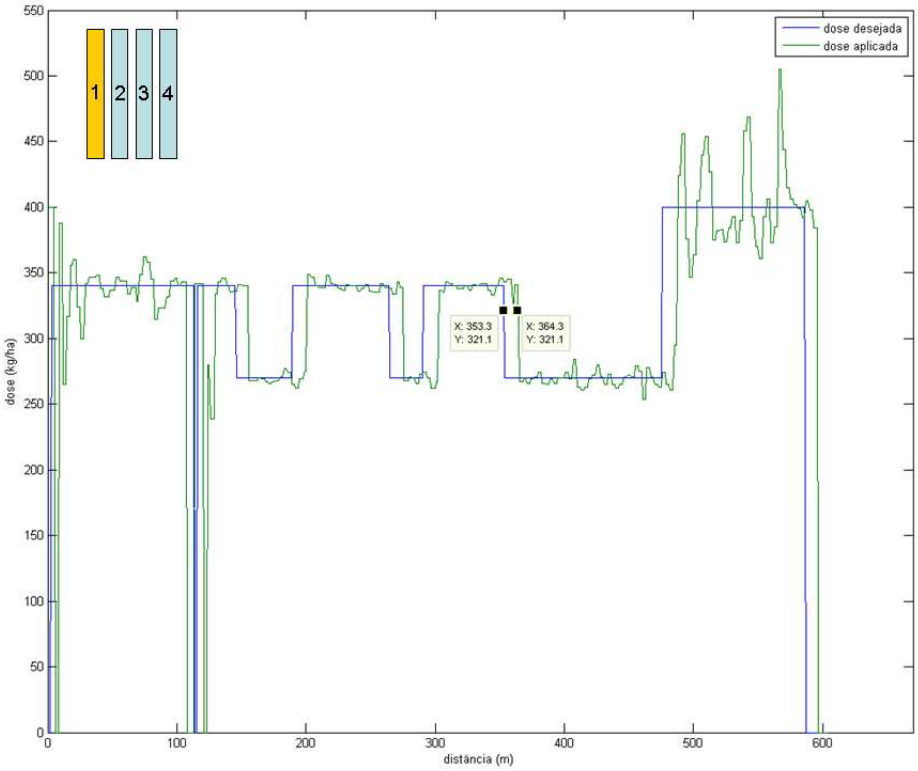
A etapa de aplicação de insumos ocorreu em momento diferente da etapa de coleta de dados, pois o sistema não estava preparado para fazer o processamento dos dados em tempo-real. Para que uma ação em tempo-real aconteça é necessário que o sistema esteja preparado para fazer interpretações agronômicas e tomar decisões a partir dos dados coletados pelos sensores embarcados.

Os gráficos das Figuras 5.6 a 5.8 mostram os resultados da aplicação. A curva em azul é a curva da dose desejada e a curva em verde é a dose real aplicada. Pela relação que existe entre a velocidade de deslocamento e os tempos de respostas da máquina, o esperado é que exista uma diferença de 6 metros entre o momento do envio do comando até a dose ser aplicada (velocidade de deslocamento de 2m/s e com 3 segundos de tempo de resposta da máquina). Pela análise dos gráficos, a distância percorrida desde o acionamento até a máquina indicar que está aplicando a dose desejada é de 10 metros. Essa diferença de 4 metros, entre o esperado e o real, pode estar relacionada com uma velocidade maior do que a estabelecida. Os resultados mostram que além de levar em consideração os tempos de resposta seria mais confiável inserir no controle a velocidade de deslocamento do equipamento e além disso, usar os dados de posicionamento georreferenciado sem transformá-los em medidas de distância.

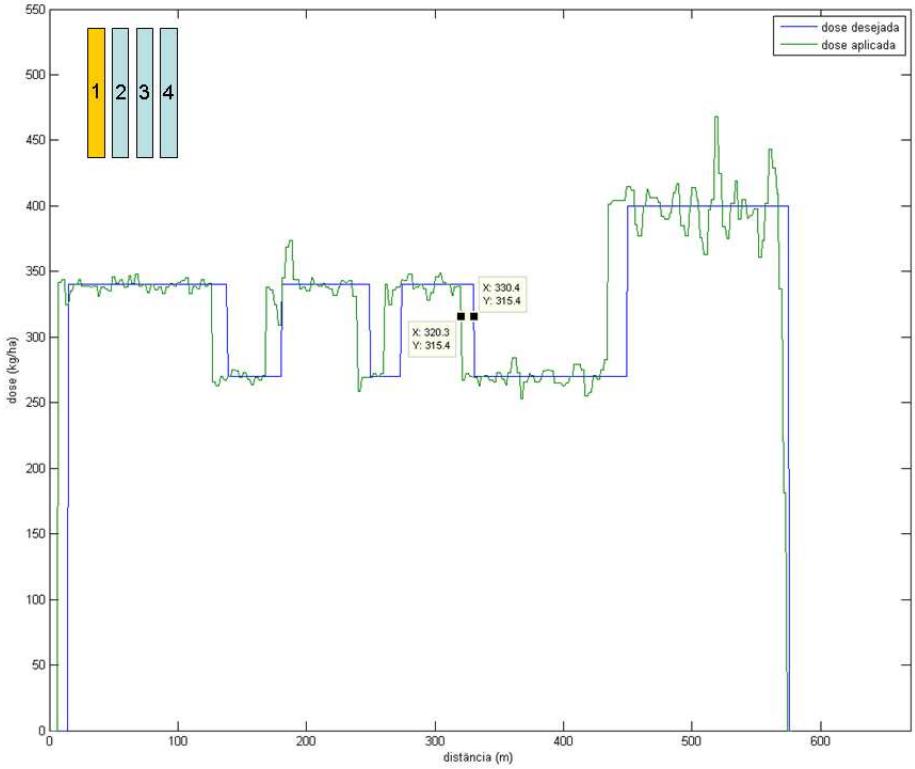
Os gráficos da Figura 5.6 (a) e (b) mostram os valores para faixa 1, que recebeu a dose em taxa variada, os gráficos da Figura 5.7 (a) e (b) para a faixa 3, que recebeu a dose fixa em 400 kg/ha e os gráficos da Figura 5.8 (a) e (b) para a faixa 4 que foi dividida em doses de 400, 300 e 200 kg/ha. (a) e (b) representam os movimentos de ida e volta, respectivamente, do trator nas diferentes linhas da plantação.

Nos gráficos da Figura 5.6 (a) e (b), observa-se que as doses sendo aplicadas à taxa variável variavam entre 270, 340 e 400 kg/ha. O mecanismo de aplicação apresentou instabilidade na aplicação de altas doses, como a 400 kg/ha. No movimento de ida o sistema

teve uma parada próxima aos 100 metros, decorrente de problemas mecânicos do aplicador (gráfico da Figura 5.6 (a)). No gráfico da Figura 5.8 (b), na parte da faixa destinada à aplicação de 200 kg/ha ocorreu um erro no mecanismo do aplicador que resultou em uma aplicação menor do que a desejada.

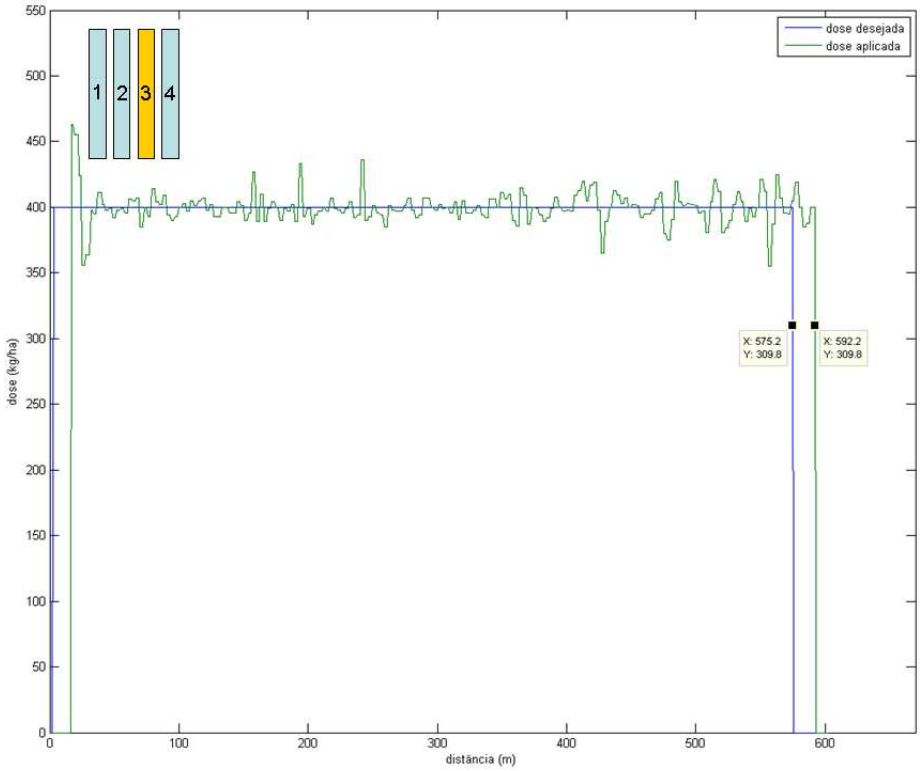


(a)

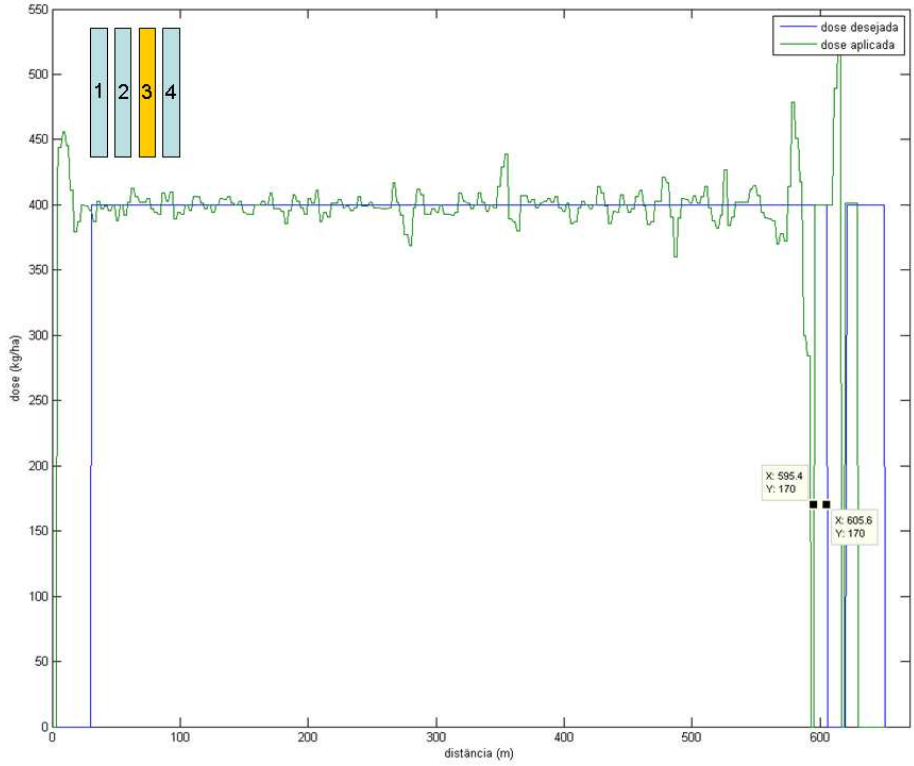


(b)

Figura 5.6. Curvas de valor de dose desejada e valor de dose aplicada para faixa 1: taxa variável. (a) ida e (b) volta.

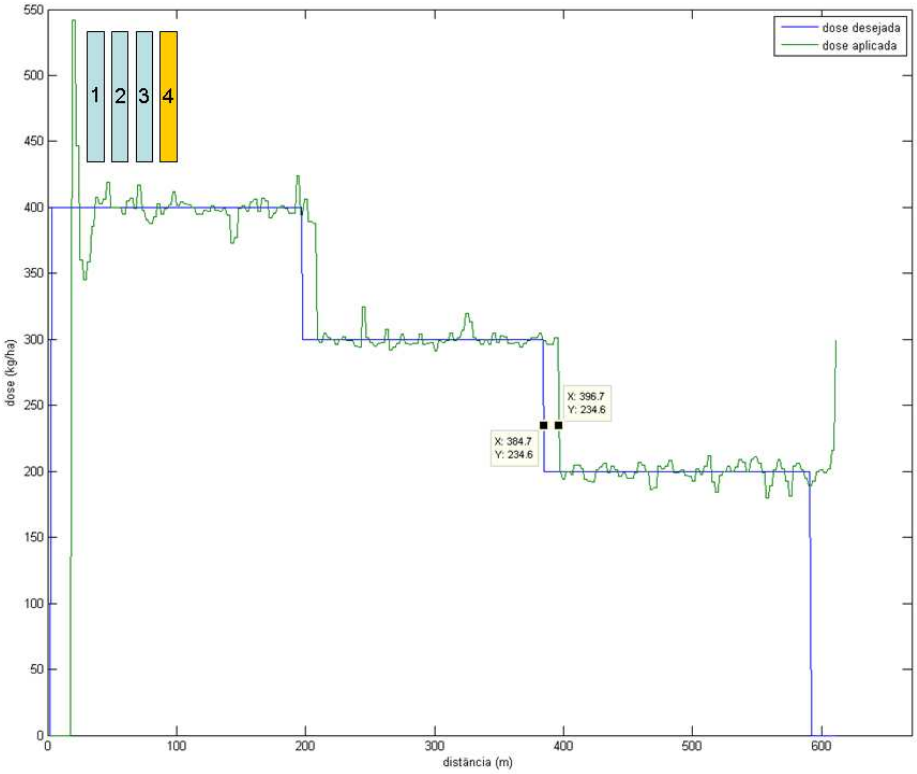


(a)

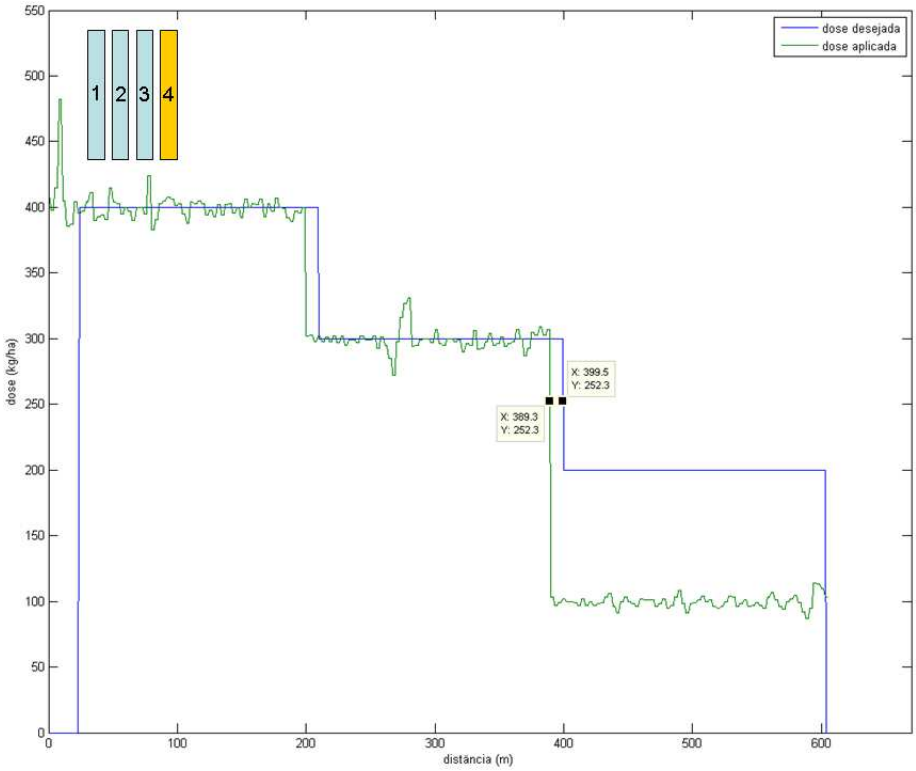


(b)

Figura 5.7. Curvas de valor de dose desejada e valor de dose aplicada para faixa 3: taxa fixa em 400kg/ha. (a) ida e (b) volta.



(a)



(b)

Figura 5.8. Curvas de valor de dose desejada e valor de dose aplicada para faixa 4: dividida em doses de 400, 300 e 200 kg/ha. (a) ida e (b) volta.

6. Conclusões

Os sistemas desenvolvidos neste trabalho vêm enriquecer a área de pesquisa de tecnologias, proporcionando observações práticas sobre necessidades, falhas e acertos no desenvolvimento de sistemas embarcados para uso em aplicações agrícolas.

O trabalho destaca a necessidade de calibração dos sensores e identificação de fatores que possam interferir nos resultados de coleta de informação. Os dois sensores avaliados foram o sensor de distância Sonar e o sensor de refletância Crop Circle. Os testes de calibração mostram que o sensor Crop Circle é susceptível a fornecer resultados diferentes quando ocorre variação da distâncias do sensor ao alvo e da largura do alvo. O sensor Sonar não sofre variações relacionadas com a distância e largura do alvo desde que uma parte do alvo esteja sobre o alcance do cone do sensor. Nenhum deles sofre influência devido a variações de iluminação. Procedimentos de medidas devem buscar identificar situações reais que podem vir a ser fontes de erro (mudanças de distância do sensor ao alvo, deslocando do sensor fora do eixo da plantação, posicionamento, sensores descalibrados, erro intrínseco do sensor quando o veículo em cruzeiro o faz movimentar) para então evitá-los ou ao menos considerá-los nas medidas, através de calibração.

No experimento realizado em cana-de-açúcar destacam-se principalmente os resultados relacionados com armazenamento de dados. É visto que o uso conjunto de sensores pode trazer vantagens de redundância, complementaridade, economia de tempo e de custo da informação. Esse experimento mostrou a necessidade de uso de formas de gerenciamento de dados mais eficientes, que facilitem o armazenamento e processamento de dados. Além disso reforçou a necessidade do uso de padrões de comunicação rápidos. Os resultados levam a concluir que o uso de sensores embarcados possibilita a identificação de comportamentos da cultura ainda em tempo de execução de ações de intervenção.

No experimento em milho destaca-se a identificação de características do equipamento agrícola a serem consideradas na elaboração de um sistema de controle. A velocidade de deslocamento da máquina está relacionada com a escolha da taxa de amostragem desejada e com a resolução do sistema de aplicação, quanto maior a velocidade, com menor resolução o sistema atua e também é menor a taxa de amostragem. Para que o sistema de controle aplique taxas em doses e em locais corretos devem ser considerados os tempos de respostas do equipamento (acionamento mecânico, tempo decorrido até o insumo chegar ao chão, etc.), velocidade de deslocamento da máquina e devem ser usadas informações de localização georreferenciadas.

O uso de máquinas agrícolas adaptadas em pórtico para a coleta dados apresenta vantagens tais como: permitir que os dados sejam coletados já com a planta muito alta; tornar o trabalho mais rápido; permitir um controle melhor de velocidade; e inserir padronização no movimento de coleta, reduzindo erros grosseiros e sistemáticos que possam interferir nos resultados.

A coleta de dados com os sensores embarcados na máquina agrícola traz vantagens principalmente relacionadas com a redução de tempo gasto para coleta de informação e diminuição de fontes de erros sistemáticos.

A Figura 6.1 resume os elementos básicos que compõem um sistema embarcado de controle de aplicações agrícolas. O desenvolvimento de *softwares* dedicados com capacidade de integração desses elementos é essencial para viabilizar a existência de sistemas de controle de aplicação em tempo-real.

Figura 6.1. Elementos de um sistema embarcado.

Os resultados dos experimentos em cana-de-açúcar e em milho reforçam a necessidade de integração de capacidades entre diferentes áreas de pesquisa para se atingir um objetivo comum que é prover sistemas de auxílio à Agricultura de Precisão. Apesar da importância e do desenvolvimento da área agrícola, relacionada com produção de matéria prima para energia limpa e renovável, alimentação e cuidados ao meio ambiente, verificou-se poucos trabalhos em sensoriamento e controle em aplicações agrícola com enfoque da engenharia. Essa deficiência deve ser ultrapassada para que, em conjunto de esforços, ferramentas disponíveis sejam bem aproveitadas e novas soluções sejam criadas com o intuito de viabilizar o desenvolvimento agrícola de forma racional e eficiente.

7. Referências

AZIZ, S.A.; STEWARD, B.L.; BIRREL, S.J. (2004) Ultrasonic Sensing for corn plant canopy characterization. ASAE Paper No. 041120, Ottawa, Ontario, Canada.

BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. (1994). Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.25, n.9/10, p. 1791-1800.

BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S.; VARVEL, G.E.; WATER-SHEA, E.A. (1996). Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.1-5.

COMMITTEE ON ASSESSING CROP YIELD: SITE-SPECIFIC FARMING, INFORMATION SYSTEMS, AND RESEARCH OPPORTUNITIES (1997). **Precision Agriculture in the 21st Century**: Geospatial and information technologies in crop management. Washington DC: National Academy Press.

CONSECANA (2009). Manual de instruções. Disponível em: <http://www.orplana.com.br/manual_2006.pdf>. Acesso em 28 jul. 2009.

DOD (2009). U. S. Department of Defense (Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América) Disponível em: <http://www.defenselink.mil/>. Acesso em: fev. 2009.

DOEBELIN, E.O. (2004). **Measurement systems:** application and design. 5. New York: McGraw-Hill. 1078 p.

EMBRAPA (2009). Website institucional. Disponível em: <www.embrapa.br>. Acesso em: 15 jul. 2009.

FRASSON, F.R. (2007). **Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar**. 76p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

FUNARO, V.M.B. et al. (2004). **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP**: documento eletrônico e impresso. São Paulo: SIBi-USP. 110 p.

HATFIELD, J.L.; GITELSON, A.A.; SCHEPERS, J.S.; WALTHALL, C.L. (2008). Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. **Agronomy Journal,** v. 100, p. s117-s131.

HOLLAND SCIENTIFIC (2008). Fabricante do sensor óptico Crop Circle. Disponível em: <www.hollandscientific.com>. Acesso em: 20 mar. 2008.

HUETE, A.R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, G. (2002).Overview of the dariometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213.

HUETE, A.R.; JUSTICE, C. (1999). MODIS Vegetation índex (MOD13) Algorithm theoretical basis document. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/LAND/#vegetation-indices, 129p.

INAMASU, R.Y.; SOUSA, R.V.; PORTO, A.J.V.; FORTES, C.; LUCHIARI, A.; SCHEPERS, J.S.; SHANAHAN, J.F.; FRANCIS, D.D. (2006). Acesso ao Estado Nutricional da Cana-de-Açúcar por meio de Sensor Ativo de Refletância. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2006, São Pedro. Anais... São Pedro: Esalq/Usp. 8 p.

ISO 11783 (2009). Standard: Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network. Composed by 14 partsDisponível em: <www.iso.org>. 2009.

JACTO (2009). fabricante de implementos agrícolas. Website institucional. Disponível em: < www.jacto.com.br>. Acesso em: 15 jul. 2009.

JENSEN, J.R. (2009). **Sensoriamento remoto do ambiente:** uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução da segunda edição. São José dos Campos, SP: Parêntese. 598 p.

KATAOKA, T.; OKAMOTO, H.; KANEKO, T.; HATA, S. (2002). Performance of crop height sensing using ultra sonic sensor and laser beam sensor. ASAE Paper No. 021184. Chicago, Il.

KNIPLING, E.B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment.**

LUO, R.C.; KAY, M.G. (1989). Multisensor integration and fusion in intelligent systems. **IEEE Transactions on systems, man and cybernetics**, v.19, n.5, sep./oct.

LUO, R.C.; YIH, C.C.; SU, K.L. (2002). Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions. **IEEE Sensors Journal**, v.2, n.2, apr. 2002.

MARTÍ, S.P.; POLO, J.R.; MOYA, E.G.; MONTEROLA, L.V.; AGUSTÍ, E.A. (2006). Optimizing pesticide spray application in tree crops. SAE Paper No. 061128. Portland, Oregon.

MIN, M.; LEE, W.S. (2005). Determination of significant wavelengths and prediction on nitrogen content for citrus. **Transacions of the ASAE**, St. Joseph, v.48, n.2, p.455-461.

MOLIN, J.P. (1997). Agricultura de precisão. Parte I: o que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola,** v. 17, n. 2, p. 97-107, dez. 1997.

MOLIN, J.P (2003). **Agriculutra de Precisão**: o gerenciamento da variabilidade. Piracicaba: o autor, 2001, reimpressão, 2003. 83 p.

MOLIN, J.P. (2004). Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Esalq/Usp.

NATIONAL (2009). Instruments. Website institucional. Disponível em: < http://www.ni.com>. Acesso em: 15 jul. 2009.

NAKAMURA, E.F. (2007). **Fusão de dados em redes de sensores sem fio**. 206 páginas. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NTECH (2009). Industries, Inc. Ukiah, CA, fabricante do sensor Green Seeker. Website institucional. Disponível em: <www.ntechindustries.com>. Acesso em: 15 jul. 2009.

PEREIRA, R. R. D. (2008). **Protocolo ISO 11783**: Procedimentos para comunicação serial de dados com o Controlador de Tarefas. 188 páginas. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

POVH, F.P. (2007). **Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais**. 86 páginas. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

REGUNATHAN, M.; LEE, W.S. (2005). Citrus fruit identification and size determination using machine vision and ultrasonic sensors. ASAE Paper No. 053017. Tampa, Florida, USA.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 3010-3017.

RUNNING. S.W.; JUSTICE, C.O.; SOLOMONSON, V.; HALL, D.; BARKER, J.; KAUFMANN, Y,J.; STRAHLER, A.H.; HUETE, A.R.; MULLER, J.P.; VANDERBILT, V.; WAN, Z.M.; TEILLET, P.; CARNEGGIE, D. (1994). Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **Intl. Journal of Remote Sensing**, v.15(17), p. 3587-3620.

SÃO MARTINHO (2009). Usina de cana-de-acúcar Website institucional. Disponível em: <www.saomartinho.ind.br>. Acesso em: 15 jul. 2009.

SCHUELLER, J.K. (1992). A review and integration analysis of spatially-variable control of crop production. **Nutrient Cycling in Agroecosystems,** v. 33, n. 1, p. 1-34, out. 1992.

SCOTFORD, I.M.; MILLER, P.C.H. (2005). Applications os spectral reflectance techniques in northern european cereal production: a review. **Biosystems Engineering**, v. 90, n. 3, p. 235-250.

SCOTFORD, I.M.; MILLER, P.C.H. (2004). Combination of spectral reflectance and ultrasonic sensing to monitor the growth of winter wheat. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 1, p. 27-38.

SCOTFORD, I.M.; MILLER, P.C.H. (2004). Estimating tiller density and leaf area index of winter wheat using spectral reflectance and ultrasonic sensing techniques. **Biosystems Engineering**, v. 89, n. 4, p. 395-408.

SCOTFORD, I.M.; MILLER, P.C.H. (2005). Vehicle mounted sensors for estimating tiller density and leaf area index (LAI) of winter wheat. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., Uppsala, Sweden. p 201-207.

SOLARI, F. (2006). **Developing a crop based strategy for *on-the-go* nitrogen management in irrigated cornfields**. 157p. Thesis (PhD in Agronomy) – University of Nebraska, Lincon.

SENSCOMP (2009). Global components, Inc. Fabricante de sensores ultra-sonicos, transdutores e componentes. Website institucional. Disponível em: <www.senscomp.com >. Acesso em: 15 jul. 2009.

SOUSA, R. V.; BRAZ, D. C.; TANGERINO, G. T. ; PORTO, A. J. V. (2005). Caracterização de sensor ultrassônico para sistema de guiagem e navegação de veículo agrícola autonômo. In: V Congresso Brasileiro de Agroinformática, 2005, Londrina. Anais do V Congresso Brasileiro de Agroinformática.

SOUSA, R.V. (2002).**CAN (Controller Area Network)**: Uma abordagem para automação e Controle na Área Agrícola. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

STONE, M.L.; SOLIE, J.B.; RAUN, W.R.; WHITNEY, R.W.; TAYLOR, S.L.; RINGER, J.D. (1996). Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.39, n.5, p.1623-1631.

SUDDUTH, K.A.; DUMMOND, S.T.; WANG, W.W.; KRUMPELMAN, M.J. (1998). Ultrasonic and GPS measurement of combine swath width. ASAE Paper No. 983096. St Joseph, MI.

SUI, R.; WILKERSON, J.B.; WILHELM, L.R.; TOMPKINS, F.D. (1989). A microcomputer-based morphometer for bush-type plants. **Computer and Electronics in Agriculture.** v. 4(1), p. 43-58.

SUI, R.; WILKERSON, J.B.; HART, W.E.; WILHELM, L.R.; HOWARD, D.D. (2005). Multi-spectral sensor for detection of nitrogen status in cotton. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.21, n.2, p.167-172.

SWINTON, S.M.; LOWENBERG-DEBOER, J. (1998). Evaluating the profitability of site-specific farming. **Journal of Production Agriculture,** v. 11, n. 4, p. 439-446, out. 1998.

TANGERINO, G.T.; INAMASU, R.Y.; SOUSA, R.V.; PEREIRA, R.R.D.; GODOY, E.P.; FREITAS, R.R. (2008). Uso de sensor ultra-sônico para medição da variabilidade espacial da altura de plantas em cultura de cana-de-açúcar. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2008, Piracicaba. Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. Piracicaba: ESALQ – USP, p. 393-404.

TERRENA (2009). Prestadora de serviços de agricultura de precisção. Website institucional. Disponível em: < http://www.terrenaagro.com.br/>. Acesso em: 15 jul. 2009.

THAI, C.N.; EVANS, M.D.; DENG, X.; THEISEN, A.F. (1998). **Visible and NIR imaging of bush beans grown under different nitrogen treatments**. St. Joseph: ASAE paper 98-3074.

TRIMBLE (2009). Fabricantes de acessório para o uso da tecnologia do GPS.. Website institucional. Disponível em: < http://www.trimble.com/>. Acesso em: 15 jul. 2009.

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. (2005). On the relationship of NDVI with leaf are índex in a deciduous gorest site. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, p. 244-255.

ZAMAN, Q.U.; SALYANI, M. (2004). Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 2, p. 173-178.

ZAMAN, Q.U.; SCHUMANN, A.W.; HOSTLER, H.K. (2005). Quantifying sources of error in ultrasonic measurements of citrus orchads. ASAE Paper No. 051123. Tampa, Florida, USA.

ZAMAN, Q.U.; SCHUMANN, A.W.; HOSTLER, H.K. (2006). Estimation of citrus fruit yield using ultrasonically-sensed tree size. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n. 1, p. 39-44.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. (2002). Precision agriculture – a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 36, ed. 2-3, p. 113-132, nov.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabelas

A.1. Dados dos sensores do experimento em cana-de-açúcar

Tabela A.1 – Médias dos resultados de NDVI e altura da planta para cada data de coleta de dados e para cada parcela.

	NDVI						ALTURA (m)					
parcela	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D1	D2	D3	D4	D5	D6
34	0,407	0,457	0,524	0,532	0,543	0,559	0,367	0,590	0,993	1,415	1,696	1,877
46	0,335	0,376	0,469	0,541	0,575	0,601	0,291	0,405	0,764	1,103	1,528	1,857
52	0,406	0,470	0,545	0,579	0,592	0,605	0,462	0,676	0,994	1,386	1,687	1,914
16	0,365	0,398	0,451	0,494	0,542	0,572	0,325	0,510	0,785	1,107	1,459	1,707
31	0,343	0,374	0,442	0,501	0,543	0,582	0,262	0,384	0,628	0,887	1,298	1,627
22	0,339	0,395	0,451	0,506	0,532	0,577	0,241	0,406	0,667	1,076	1,377	1,733
40	0,359	0,403	0,458	0,497	0,567	0,595	0,342	0,483	0,745	1,091	1,365	1,666
4	0,447	0,493	0,528	0,548	0,560	0,564	0,430	0,617	0,903	1,313	1,621	1,908
25	0,419	0,460	0,514	0,536	0,561	0,586	0,377	0,504	0,848	1,227	1,555	1,893
10	0,443	0,495	0,521	0,562	0,572	0,575	0,465	0,687	0,908	1,297	1,663	1,827
43	0,499	0,533	0,556	0,573	0,587	0,617	0,554	0,744	1,032	1,413	1,707	1,935
7	0,422	0,464	0,511	0,531	0,582	0,593	0,428	0,589	0,865	1,246	1,634	1,837
13	0,368	0,397	0,457	0,478	0,540	0,572	0,314	0,397	0,611	0,950	1,281	1,561
49	0,390	0,463	0,524	0,559	0,587	0,598	0,384	0,528	0,839	1,300	1,654	1,916
28	0,424	0,464	0,514	0,531	0,578	0,601	0,461	0,669	0,979	1,311	1,594	1,908
1	0,346	0,382	0,430	0,470	0,518	0,552	0,309	0,412	0,587	0,943	1,312	1,541
19	0,298	0,323	0,361	0,408	0,473	0,525	0,193	0,247	0,404	0,735	1,066	1,448
55	0,443	0,488	0,547	0,562	0,594	0,589	0,461	0,624	1,000	1,341	1,684	1,911
37	0,361	0,398	0,457	0,498	0,557	0,597	0,321	0,434	0,700	0,985	1,380	1,644
58	0,462	0,501	0,536	0,560	0,581	0,604	0,476	0,711	0,965	1,371	1,661	1,901
47	0,349	0,403	0,461	0,531	0,577	0,591	0,334	0,456	0,722	1,089	1,493	1,820
20	0,309	0,342	0,376	0,445	0,517	0,543	0,209	0,260	0,439	0,771	1,201	1,524
5	0,493	0,545	0,576	0,573	0,574	0,553	0,504	0,747	1,059	1,453	1,765	1,964
59	0,407	0,471	0,530	0,554	0,581	0,612	0,398	0,619	0,935	1,287	1,586	1,855
23	0,349	0,395	0,466	0,521	0,569	0,595	0,264	0,415	0,746	1,070	1,477	1,857
53	0,380	0,448	0,540	0,580	0,611	0,606	0,321	0,499	0,845	1,233	1,628	1,874
56	0,392	0,456	0,546	0,588	0,599	0,603	0,350	0,551	0,892	1,279	1,638	1,914
44	0,509	0,564	0,591	0,594	0,599	0,612	0,555	0,850	1,186	1,512	1,784	1,957
14	0,325	0,359	0,422	0,494	0,558	0,600	0,207	0,322	0,505	0,852	1,175	1,508
11	0,442	0,508	0,575	0,585	0,572	0,581	0,455	0,689	1,000	1,421	1,675	1,853
32	0,377	0,416	0,481	0,540	0,584	0,602	0,327	0,427	0,679	1,047	1,362	1,671
41	0,404	0,455	0,539	0,555	0,601	0,607	0,430	0,635	0,960	1,269	1,645	1,832
17	0,420	0,465	0,512	0,550	0,577	0,593	0,440	0,641	0,925	1,290	1,626	1,834
50	0,427	0,491	0,561	0,583	0,586	0,599	0,429	0,587	0,984	1,397	1,729	1,988

continua

	NDVI						ALTURA (m)					
parcela	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D1	D2	D3	D4	D5	D6
26	0,446	0,516	0,559	0,575	0,570	0,586	0,448	0,647	1,023	1,415	1,728	1,944
8	0,412	0,487	0,567	0,594	0,607	0,598	0,389	0,604	0,969	1,358	1,721	1,964
29	0,391	0,453	0,521	0,546	0,592	0,601	0,398	0,618	0,938	1,276	1,607	1,882
38	0,380	0,453	0,523	0,550	0,597	0,618	0,323	0,547	0,844	1,267	1,679	1,905
2	0,387	0,430	0,495	0,515	0,554	0,572	0,356	0,526	0,748	1,114	1,512	1,702
35	0,425	0,490	0,553	0,544	0,547	0,559	0,415	0,693	1,052	1,408	1,704	1,892
6	0,450	0,515	0,732	0,577	0,585	0,572	0,448	0,638	0,919	1,344	1,740	1,946
51	0,447	0,493	0,749	0,597	0,588	0,600	0,469	0,609	1,053	1,456	1,793	2,020
30	0,417	0,472	0,725	0,579	0,603	0,602	0,468	0,703	1,036	1,348	1,714	1,958
27	0,426	0,492	0,711	0,573	0,584	0,600	0,376	0,510	0,834	1,277	1,691	1,918
48	0,325	0,392	0,649	0,502	0,575	0,602	0,246	0,415	0,665	0,942	1,423	1,777
60	0,421	0,484	0,558	0,594	0,599	0,607	0,412	0,651	1,004	1,420	1,710	1,929
54	0,395	0,482	0,569	0,614	0,622	0,612	0,397	0,659	1,005	1,355	1,709	1,921
3	0,414	0,458	0,525	0,574	0,579	0,583	0,426	0,616	0,898	1,287	1,568	1,769
57	0,413	0,463	0,553	0,585	0,608	0,592	0,377	0,573	0,901	1,348	1,701	1,924
18	0,395	0,446	0,524	0,557	0,604	0,597	0,383	0,611	0,910	1,303	1,648	1,814
39	0,351	0,387	0,444	0,511	0,579	0,615	0,263	0,372	0,650	1,047	1,446	1,786
36	0,383	0,449	0,505	0,535	0,567	0,564	0,340	0,564	0,875	1,253	1,634	1,827
15	0,348	0,404	0,483	0,510	0,603	0,614	0,257	0,373	0,640	0,968	1,378	1,636
45	0,475	0,529	0,604	0,610	0,593	0,611	0,485	0,718	1,093	1,479	1,760	1,961
12	0,432	0,511	0,582	0,577	0,577	0,578	0,448	0,679	1,003	1,281	1,608	1,855
33	0,359	0,407	0,495	0,551	0,596	0,612	0,292	0,411	0,691	1,026	1,432	1,688
9	0,441	0,515	0,591	0,617	0,610	0,608	0,493	0,710	1,051	1,454	1,781	2,001
42	0,394	0,468	0,555	0,587	0,607	0,611	0,416	0,688	0,951	1,309	1,637	1,890
24	0,337	0,375	0,442	0,513	0,560	0,596	0,257	0,395	0,664	1,017	1,440	1,736
21	0,323	0,351	0,410	0,474	0,529	0,563	0,235	0,313	0,500	0,871	1,288	1,646

conclusão

A.2. Resultados de produtividade do experimento em cana-de-açúcar

Tabela A.2 – Resultados de produtividade da Usina São Martinho.

parcela	Brix	Pol	PBU	Fibra	PC	Pureza	AR Caldo	AR Cana	ATR	TCH	TPH
34	20,01	17,71	138	11,92	15,02	88,51	0,6	0,51	147,69	98,3	14,76
46	20,09	17,72	137,9	11,91	15,03	88,2	0,61	0,52	147,86	92,6	13,92
52	19,97	17,72	129,7	11,25	15,2	88,73	0,6	0,51	149,46	92,3	14,03
16	19,56	17,06	142,61	12,28	14,38	87,22	0,65	0,55	141,95	76,1	10,94
31	20,92	18,76	147,64	12,69	15,7	89,67	0,56	0,47	153,8	87,9	13,8
22	21,12	19,02	142,3	12,26	16,03	90,06	0,55	0,46	156,9	72,5	11,62
40	19,21	16,93	157,1	13,44	13,98	88,13	0,62	0,51	137,81	72,1	10,08
4	20,78	18,54	129,8	11,26	15,9	89,22	0,58	0,5	155,97	76,8	12,21
25	21,58	19,59	148,6	12,76	16,37	90,78	0,53	0,44	159,95	88,1	14,42
10	20,32	18,03	130,2	11,29	15,46	88,73	0,6	0,51	151,93	92,9	14,36
43	19,12	16,88	126	10,96	14,55	88,28	0,61	0,53	143,37	85,7	12,47
7	21,23	19,25	131	11,36	16,48	90,67	0,53	0,45	161,1	70,9	11,68
13	19,8	17,33	124,6	10,84	14,97	87,53	0,64	0,55	147,61	82,3	12,32
49	16,54	13,16	122,8	10,7	11,4	79,56	0,91	0,79	115,73	101,7	11,59
28	21,01	18,8	136,2	11,77	15,98	89,48	0,57	0,48	156,62	81,9	13,09
1	20,77	18,67	142,6	12,28	15,73	89,89	0,56	0,47	154,12	79,4	12,49
19	18,17	15,74	112,3	9,86	13,83	86,63	0,67	0,59	137,08	65,4	9,04
55	21,19	19,1	133,4	11,55	16,3	90,14	0,55	0,47	159,53	78,4	12,78
37	19,83	17,97	143,6	12,36	15,12	90,62	0,53	0,45	148,07	75,8	11,46
58	20,73	18,62	119,43	10,43	16,2	89,82	0,56	0,49	158,74	98,4	15,94
47	20,16	17,61	140,15	12,09	14,89	87,35	0,64	0,54	146,74	83,9	12,49
20	18,64	16,14	121,5	10,6	14	86,59	0,67	0,58	138,63	96,2	13,47
5	21,25	19,17	130,35	11,3	16,43	90,21	0,55	0,47	160,78	69,8	11,47
59	20,52	18,35	128,9	11,19	15,76	89,42	0,57	0,49	154,56	89,6	14,12
23	20,22	18,22	137,3	11,86	15,47	90,11	0,55	0,47	151,6	74,1	11,46
53	20,54	18,38	142,9	12,31	15,48	89,48	0,57	0,48	151,81	91,2	14,12
56	22,11	20,25	136,6	11,8	17,21	91,59	0,5	0,42	167,79	66,9	11,51
44	21,24	19,26	151,1	12,96	16,04	90,68	0,53	0,44	156,8	89,5	14,36
14	20,19	17,73	124,41	10,83	15,32	87,82	0,63	0,54	150,87	79,2	12,13
11	19,89	17,63	137,5	11,88	14,96	88,64	0,6	0,51	147,12	86,4	12,93
32	19,76	17,65	158,1	13,52	14,55	89,32	0,58	0,48	142,94	82,9	12,06
41	19,68	17,58	139,7	12,05	14,87	89,33	0,58	0,49	146,1	96,7	14,38
17	20,49	18,35	135,6	11,72	15,61	89,56	0,57	0,49	153,1	71,1	11,1
50	16,68	13,74	118,9	10,39	11,96	82,37	0,81	0,71	120,32	105,8	12,65
26	21,09	19,01	153,3	13,14	15,78	90,14	0,55	0,46	154,46	78,5	12,39
8	21,93	20,01	137,8	11,9	16,97	91,24	0,51	0,43	165,58	72	12,22
29	21,19	19,17	132,3	11,46	16,39	90,47	0,54	0,46	160,31	66,5	10,9
38	20,61	18,46	136,8	11,82	15,68	89,57	0,57	0,48	153,75	83,2	13,05
2	19,69	17,32	126,3	10,98	14,93	87,96	0,62	0,53	147,06	58,2	8,69
35	21,13	19,04	129,92	11,27	16,33	90,11	0,55	0,47	159,83	87,9	14,35
6	21,08	18,97	130,5	11,32	16,25	89,99	0,55	0,47	159,07	70,4	11,44

continua

parcela	Brix	Pol	PBU	Fibra	PC	Pureza	AR Caldo	AR Cana	ATR	TCH	TPH
51	16,69	13,57	128,95	11,19	11,65	81,31	0,85	0,73	117,59	104,1	12,13
30	20,73	18,54	137,15	11,85	15,74	89,44	0,57	0,48	154,32	79	12,43
27	20,04	17,64	143,4	12,35	14,85	88,02	0,62	0,52	146,19	73,7	10,94
48	21,45	19,05	140,7	12,13	16,1	88,81	0,59	0,5	157,88	74,4	11,98
60	21,92	19,95	134,8	11,66	16,99	91,01	0,52	0,44	165,86	91,4	15,53
54	19,93	17,75	134,9	11,67	15,12	89,06	0,59	0,5	148,59	95,2	14,39
3	22,07	20,13	157,7	13,49	16,61	91,21	0,51	0,42	162,04	79	13,12
57	19,29	17,41	149,9	12,87	14,52	90,25	0,54	0,45	142,4	58,8	8,54
18	21,41	19,06	146	12,56	15,98	89,02	0,59	0,49	156,71	76,4	12,21
39	20,89	18,75	138,1	11,92	15,9	89,76	0,56	0,47	155,77	81,9	13,02
36	19,87	17,63	136,6	11,8	14,98	88,73	0,6	0,51	147,32	81,9	12,27
15	20,18	17,88	123,7	10,77	15,47	88,6	0,6	0,52	152,07	78,3	12,11
45	21,63	19,64	156,1	13,36	16,24	90,8	0,53	0,44	158,67	78,5	12,75
12	20,92	18,87	145,1	12,48	15,85	90,2	0,55	0,46	155,17	65,6	10,4
33	21,33	19,27	159,3	13,62	15,86	90,34	0,54	0,44	155,11	76,5	12,13
9	20,98	18,93	131,3	11,38	16,2	90,23	0,55	0,47	158,59	81	13,12
42	20,12	17,94	141	12,16	15,15	89,17	0,58	0,49	148,76	97,1	14,71
24	19,22	17,03	140,5	12,12	14,39	88,61	0,6	0,51	141,67	76	10,94
21	18,48	16,2	136,9	11,83	13,76	87,66	0,63	0,54	135,92	101,7	13,99

conclusão

APÊNDICE B – Índices de produtividade em cana-de-açúcar

Abaixo é feita uma breve descrição do significado dos índices de produtividade em cana-de-açúcar citados no trabalho de dissertação (Brix, Pol, PBU, Fibra, PC, Pureza, AR Caldo, AR Cana, ATR, TCH, TPH) baseada no Manual de Instruções da CONSECANA – Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (CONSECANA, 2009).

Pol é a porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada de peso normal determinada pelo desvio provocado pela solução no plano de vibração da luz polarizada. Brix é a porcentagem em massa de sólidos solúveis contidos em uma solução de sacarose quimicamente pura. O pol e o brix medem a pureza do caldo extraído da moagem da cana-de-açúcar e ambos medem o PC (pol da cana, isto é o resultado da quantidade de pol encontrada na cana) e teor de sacarose da cana. O brix e a pol do caldo poderão ser determinados pela utilização da Espectrofotometria de Infravermelho Próximo (NIR), após definição das curvas de calibração, construídas com os resultados de brix e de pol dos métodos tradicionais.

A pureza aparente do caldo (Q) é definida como a porcentagem de pol em relação ao brix, calculada pela equação:

$$Q = 100 \times S \div B, \text{ onde:}$$

S = pol do caldo;

B = brix do caldo.

PBU é o peso do bagaço (bolo) úmido utilizado para o cálculo da fibra da cana (F), obtido da pesagem de 500 g da amostra final de cana, homogeneizada mecanicamente e feita em balança semi-analítica eletrônica.

A fibra da cana (F) será calculada pela equação:

$$F = 0{,}08 \times PBU + 0{,}876.$$

O coeficiente “C” é utilizado para a transformação da pol do caldo extraído pela prensa (S) em pol de cana (PC) e é calculado por uma das seguintes fórmulas:

$$C = 1{,}0313 - 0{,}00575 \times F, \text{ ou,}$$

$$C = 1{,}02626 - 0{,}00046 \times PBU.$$

A pol da cana (PC) será calculada pela equação:

$$PC = S \times (1 - 0{,}01 \times F) \times C.$$

O teor de açúcares redutores (AR) por cento, em peso, de caldo será calculado pela equação:

$$AR\ \%\ caldo = 3{,}641 - 0{,}0343 \times Q.$$

O cálculo dos açúcares redutores da cana (ARC) será realizado pela equação:

$$ARC = AR \times (1 - 0{,}01 \times F) \times C$$

ATR é o açúcar total recuperável. Conhecendo-se a pol da cana (PC) e os açúcares redutores da cana (ARC), o ATR é calculado pela equação:

$$ATR = 10 \times PC \times 1{,}05263 \times 0{,}905 + 10 \times ARC \times 0{,}905 \text{ ou,}$$

$$ATR = 9{,}5263 \times PC + 9{,}05 \times ARC, \text{ onde:}$$

10 x PC = pol por tonelada de cana;

1,05263 = coeficiente estequiométrico para a conversão da sacarose em açúcares redutores;

0,905 = coeficiente de recuperação, para uma perda industrial de 9,5% (nove e meio por cento);

10 x ARC = açúcares redutores por tonelada de cana.

Assim, conhecido o ATR é possível saber a produtividade de cana. As seguintes relações são possíveis:

1 kg de açúcar = 0,997 x 1,05263 = 1,0495 kg de ATR.

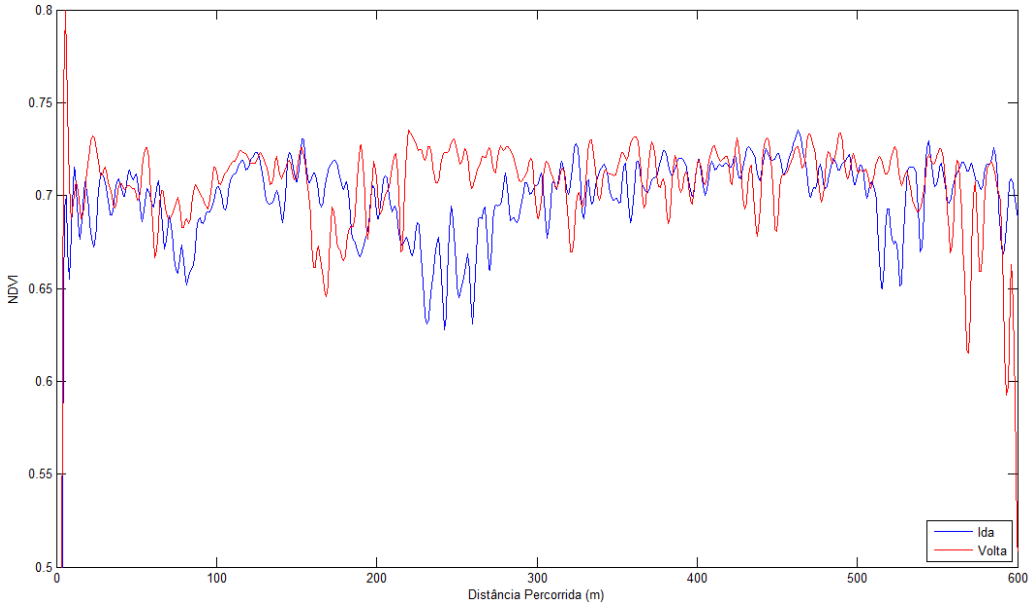
1 litro de álcool anidro corresponde a 1,7651 kg de ATR

1 litro de álcool hidratado corresponde a 1,6913 kg de ATR

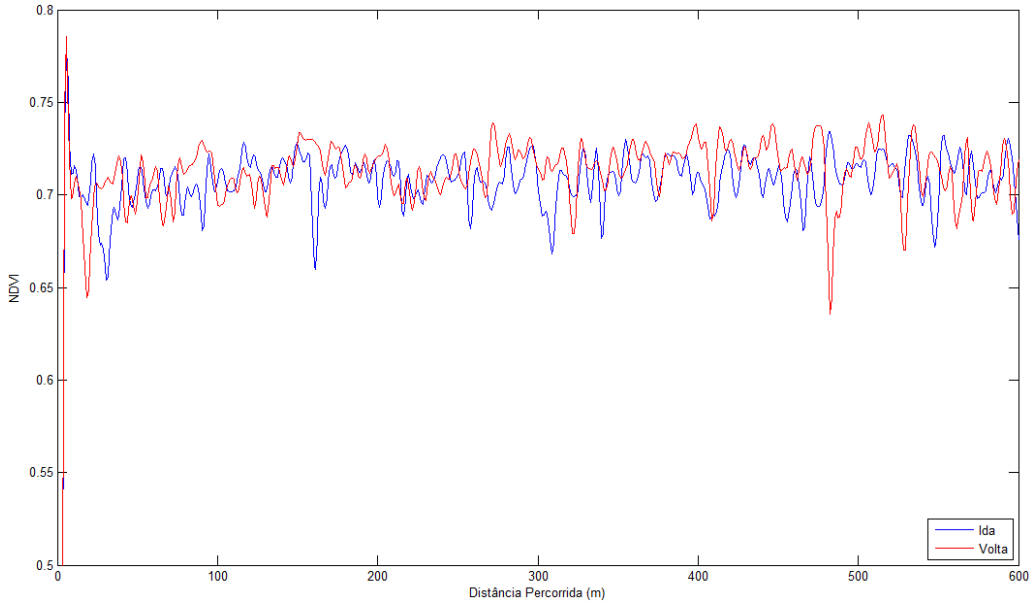
O índice TCH representa toneladas de colmos de cana-de-açúcar por hectare e TPH representa tonelada de pol por hectare.

APÊNDICE C – Gráficos

C.1. Gráficos de dados coletados no experimento em milho

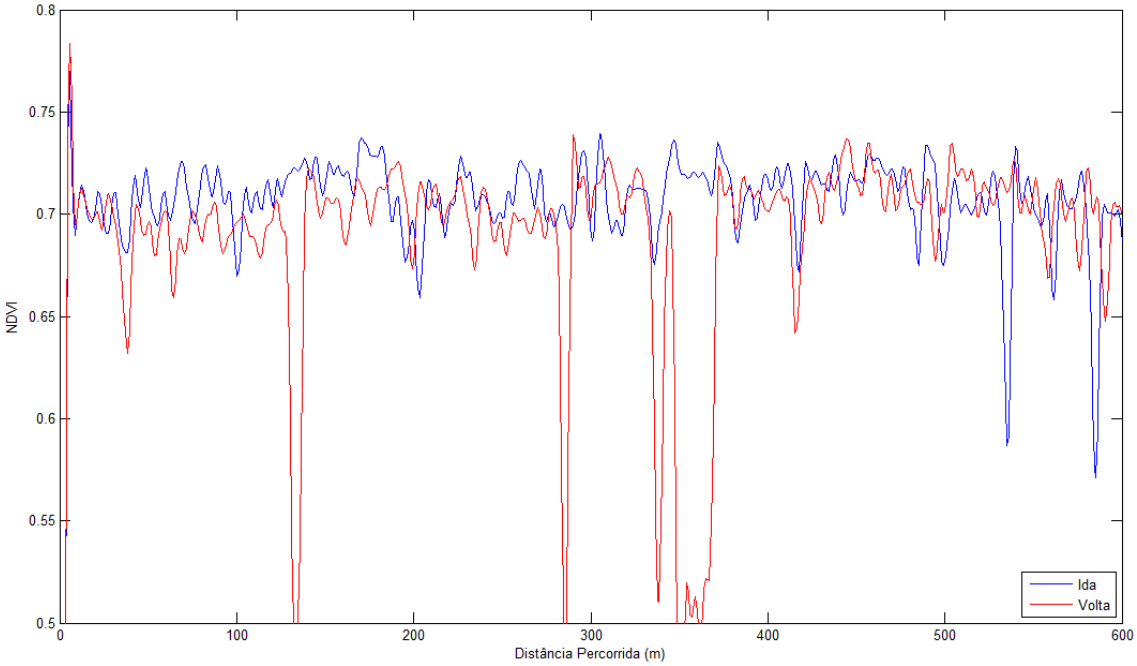


(a)

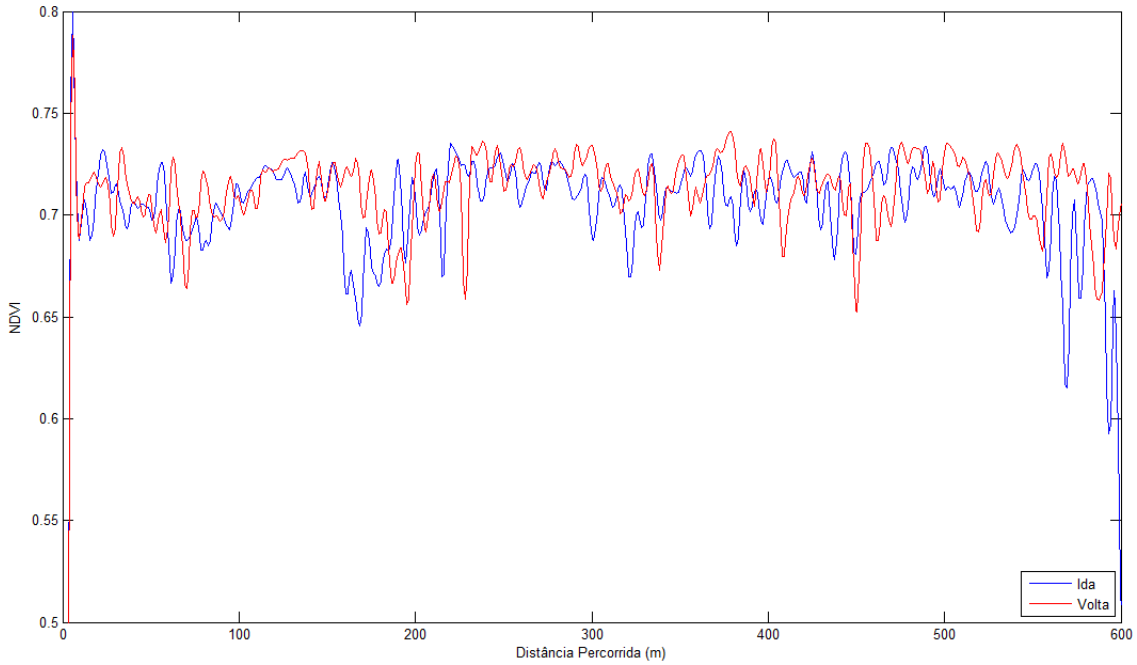


(b)

Figura A.1. (a) NDVI da faixa 1 linha 1; (b) NDVI da faixa 1 linha 2.



(a)



(b)

Figura A.2. (a) NDVI da faixa 2 linha 1; (b) NDVI da faixa 2 linha 2.

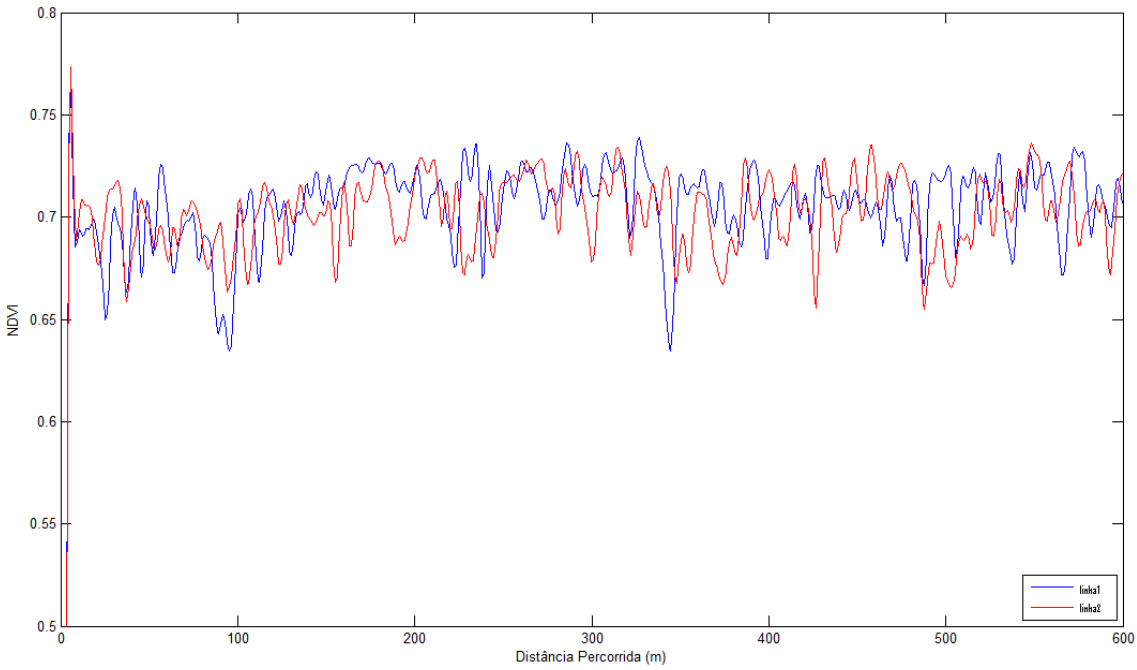
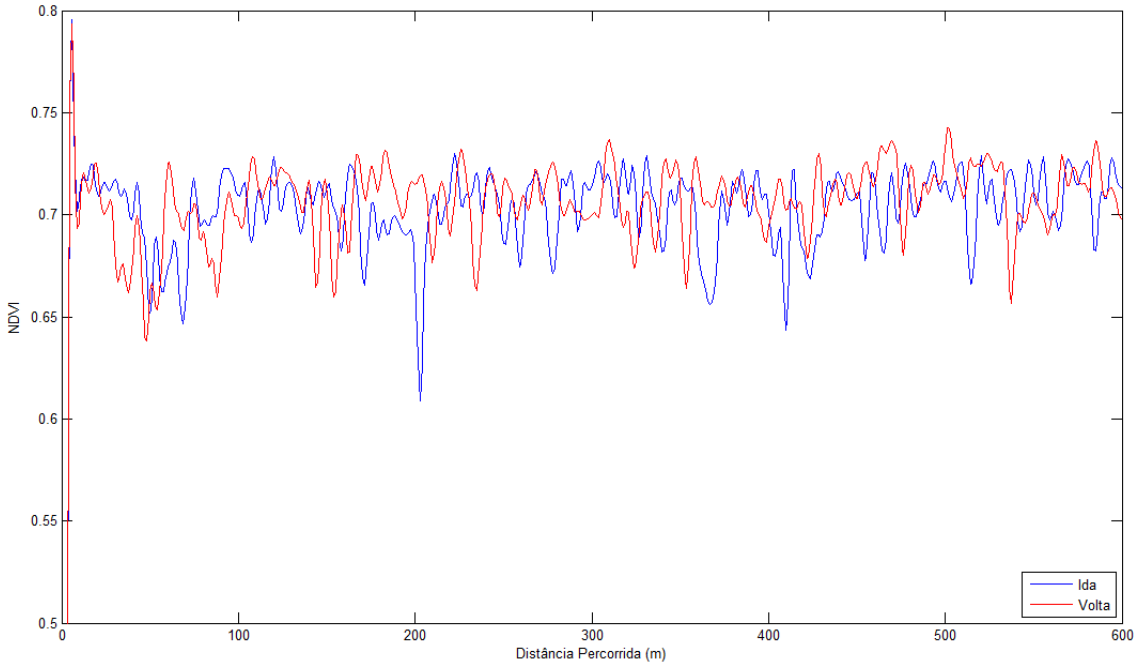
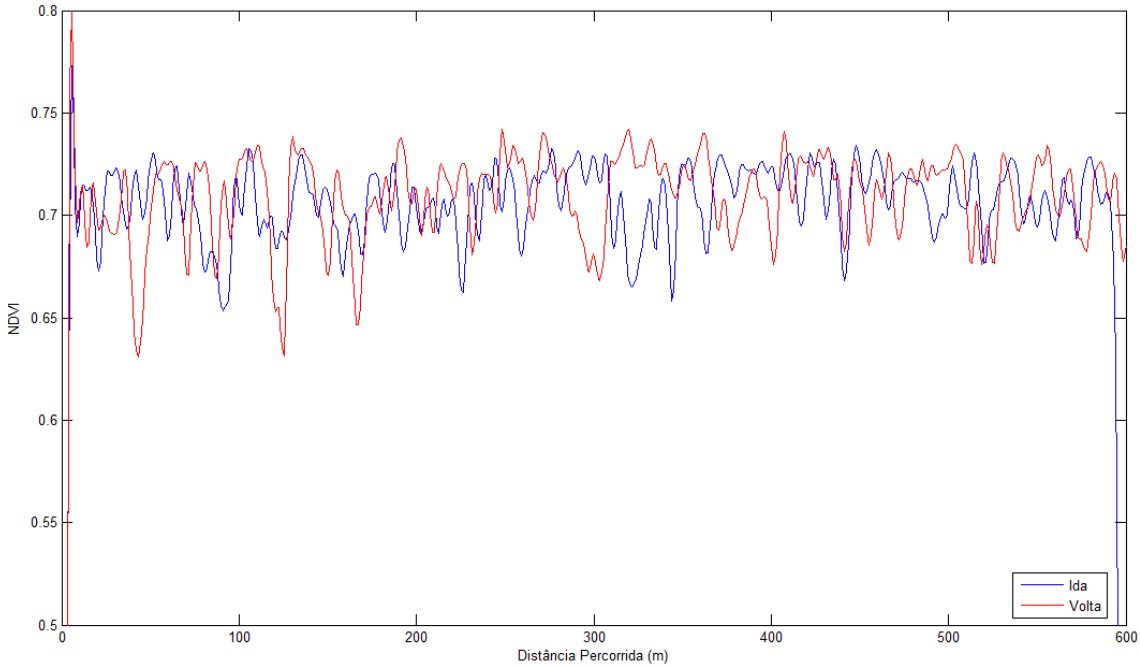


Figura A.3. NDVI da faixa 3 nas linha 1 e 2.



(a)



(b)

Figura A.4. (a) NDVI da faixa 4 linha 1; (b) NDVI da faixa 4 linha 2.

ANEXOS

ANEXO A – Manual do Crop Circle

Crop Circle

Crop Circle ACS-210 Plant Canopy Reflectance Sensor

The Crop Circle ACS-210 sensor provides classic vegetative index data as well as basic reflectance information from plant canopies.

Information produced by the sensor can be utilized to quantify the impact of nutrients, water, disease or other growing conditions on plants or crops.

Key Sensor Features

Easy-to-use

Make measurements day or night

Measurements not influenced by fluorescent or other AC light sources

Wide measurement range—1 to 8 ft.

Rugged—dust and water resistant

Low noise performance

Fast data output rate

Low power operation

Light weight—weighs less than 1lb.

Networkable

Unlike other radiometric light sensors, the Crop Circle ACS-210 is not limited by ambient lighting conditions—measurements can be made day or night due to its unique, patented (pending) light source technology.

For on-the-go applications, the Crop Circle ACS-210 sensor can be mounted to virtually any type of vehicle to remotely sense and/or map plant or crop canopy biomass while driving through a field. The compact size and low weight design allows Crop Circle to be easily adapted to pole-mounted and handheld applications.

Two sensor models are available providing yellow/NIR or red/NIR sensing capabilities.

Measurements Made Easy

Vegetative index data produced by the sensor can be easily captured using a laptop PC, PDA or other data acquisition device using a standard RS-232 interface.

To facilitate reading sensor data, a special serial data reader program has been included in the **Crop Circle Evaluation Package.** The S-Reader software is a custom application designed specifically to parse the output data stream produced by the Crop Circle ACS-210.

The software is menu driven and is extremely user friendly. S-Reader operates on an IBM PC compatible computer. Data is stored in a comma-delimited format for convenient access by third-party data analysis programs or spreadsheet software.

Potential Users

Federal, state and corporate researchers

Crop consultants

Producers

Golf course superintendents

Plant physiologists/ biologists

Research Applications

Crop response to nutrient and fertilizer studies

Herbicide effect/ performance studies

Noninvasive plant biomass quantification

Trend/detect plant health changes

Early disease detection

Leaf senescence studies

Turf and agricultural landscape mapping

Hybrid selection

Develop nutrient recommendations/models based on comparative local standards

Foragable biomass prediction

Holland SCIENTIFIC

Sensor Specifications

Optical Specifications

Sensor-to-Canopy Range: Typically 10in (25cm) to >84in (213cm)

Field-of-View: ~32 degrees by ~6 degrees

Lateral Measurement Variation: Typically +/- 5%

Light Source: Modulated polychromatic LED array

Emission Bands: ACS-210(Yellow/NIR) 590nm and 880nm; ACS-210(Red/NIR) 650nm and 880nm

Photodetection: Silicon photodiode array with spectral range of 320nm to 1100nm

Wavebands: Detector 1: 400nm to 680nm; Detector 2: 800nm to 1100nm

Ambient Light Rejection: up to 400 W m^{-2} (reflectance)

Electrical Specifications

Measurement Methodology: Synchronous modulation and demodulation

Sample Output Rate: Programmable for 1 sample per second to 20 samples per second; default is 6 samples per second

Operating Range: 0 to 50 °C

Temperature Drift: < 0.1%/°C

Communication Interface: RS-485 multidrop (bidirectional communication); RS-232 (autosend, output only)

Serial Communication: 38400, no parity, 8 data bits, 1 stop bit

Vegetative Calculations: Normalized Difference Vegetative Index (NDVI), Wide Dynamic Range Vegetative Index (WDRVI), Simple Ratio Index (SRI), infrared band reflectance R_{NIR}, visible band reflectance R_{VIS}

Power: 11.5 to 17V DC @ ~100mA

Mechanical Specifications

Enclosure: PVC plastic housing, o-ring sealed for dust and water resistance

Environmental: IP68 for dust resistance

Weight: 0.85 lb. (385gm)

Sensor Mount: (2) ¼ - 20 threaded holes in base of sensor spaced 1.25in (3.18cm)

Dimensions: Width 1.75in (3.8cm),
Length 7.0in (17.8cm),
Height 3.0in (7.6cm)

Connector: Four pin male Eurofast type, o-ring sealed

For more information contact:

Holland Scientific
5011 South 73rd Street
Lincoln, NE 68516-4236
Tel/Fax: 1 (402) 488-1226
www.hollandscientific.com

Sales
sales@hollandscientific.com

Technical Support
support@hollandscientific.com

All specifications subject to change without notification.

All brands/product names are trademarks of their respective owners.

Holland SCIENTIFIC

ANEXO B – Manual do Sonar

SensComp, Inc.
36704 Commerce Rd.
Livonia, MI 48150
Telephone: (734) 953-4783
Fax: (734) 953-4518
www.senscomp.com

6500 Series Ranging Modules

SensComp's Ranging Modules provide the drive electronics for SensComp Electrostatic Transducers

Features

Accurate Sonar Ranging from 6 inches to 35 feet
Drives a 50 kHz Electrostatic Transducer Without an Additional Interface
Operates from a Single Power Supply Source
Accurate Clock Output Provided for External Use
Selective Echo Exclusion
TTL Compatible
Multiple Measurement Capability
Integrated Transducer Cable
Variable Gain Control Potentiometer

Part No.

PID# 615078 -- 6500 Series Sonar Ranging Module
PID# 615079 -- 6500 Series Enhanced Sonar Ranging Module; Includes Pull-up Resistors and an Internal Oscillator for Repetitive Operation
PID# 615080 -- 6500 Series Sonar Ranging Module Without the Connector

Specifications

Description

The 6500 Series is an economical sonar ranging module that can drive all SensComp electrostatic transducers. This module, with a simple interface, is able to measure distances from 6 inches to 35 feet. The typical accuracy is +/- 1% of the reading over the entire range.

This module has an external blanking input that allows selective echo exclusion for operation on a multiple-echo mode. The module is able to differentiate echos from objects that are only three inches apart. The digitally controlled gain, variable bandwidth amplifier minimizes noise and side-lobe detection in sonar applications.

The module has an accurate ceramic resonator controlled 420 kHz time base generator. An output based on the 420 kHz time base is provided for external use. The sonar transmit output is 16 cycles at a frequency of 49.4 kHz.

The 6500 Series module operates over a DC power supply range from 4.5 volts to 6.8 volts (5 volts nominal) and is characterized for operation from 0° C to 40° C.

For more information, visit our website: www.senscomp.com

Copyright © 2004 SensComp. Inc. 9/13/04

Absolute Maximum Ratings over Operating Free-air temperature range

Voltage from any pin to ground (see Note 1) ..... 7 VDC
Voltage from any pin except XDCR to V_{CC} (see Note 1) ..... -7 VDC to 0.5 VDC
Operating free-air temperature range ..... 0° C to 40° C
Storage temperature range ..... -40° C to 85° C

NOTE 1: The XDCR pin may be driven from -1 volt to 400 volts typical with respect to ground.

Recommended Operating Conditions

		MIN	MAX	UNIT
Supply Voltage, Vcc		4.5	6.8	V
High-level Input Voltage, VIH	BLNK, BINH, INIT	2.1		V
Low-level Input Voltage, VIL	BLNK, BINH, INIT		0.6	V
ECHO and OSC Output Voltage			6.8	V
Delay Time, Power Up to INIT High		5		ms
Recycle Period		60		ms
Operating Free-air Temperature, T_A		0	40	°C

Electrical Characteristics over Recommended Ranges of Supply Voltage and Operating Free-Air Temperature

PARAMETER		TEST COND.	MIN	TYP	MAX	UNIT
Imput Current	BLNK, BINH, INIT	V_I = 2.1 V			1	mA
High-level Output Current, I_{OH}	ECHO, OSC	V_{OH} = 5.5V			100	µA
Low-level Output Voltage, V_{OL},	ECHO, OSC	I_{OL} = 1.6 mA			0.4	V
Transducer Bias Voltage		T_A = 25° C		200		V
Transducer Output Voltage (peak to peak)		T_A = 25° C		400		V
No. of Cycles for XDCR Output to Reach 400V		C = 500 pF			7	
Internal Blanking Interval				2.38†		ms
XMIT Drive Signal Duration				1.1†		ms
Frequency During 16-pulse	OSC output			49.4†		kHz
Transmit Period	XMIT output			49.4†		kHz
Frequency After 16-pulse	OSC output			93.3†		kHz
Transmit Period	XMIT output			0		kHz
Supply Current, Icc	During transmit period				2000	mA
	After transmit period				100	mA

† These typical values apply for a 420 kHz ceramic resonator

Operation With SensComp Electrostatic Transducers

There are two basic modes of operation for the 6500 Series Sonar Ranging Modules: Single-echo mode and multiple-echo mode. The application of power (V_{CC}), the application of the initiate (INIT) input, and the resulting transmit output, and the use of the Blanking Inhibit (BINH) input are basically the same for either mode of operation. After applying power (V_{CC}) a minimum of 5 milliseconds must elapse before the INIT signal can be taken high. During this time, all internal circuitry is reset and the internal oscillator stabilizes. When INIT is raised to a high level, drive to the transducer (XDCR) output occurs. Sixteen pulses at 49.4 kHz with an amplitude of 0 volts to 400 volts peak to peak will excite the transducer as transmission occurs. At the end of the 16 transmitted pulses, a 200 VDC bias remains on the transducer (as recommended) for optimum receiving operation.

In order to eliminate ringing of the transducer from being detected as a return signal, the Receive (REC) input of the ranging control IC is inhibited by internal blanking for 2.38 milliseconds after the initiate signal. If a reduced blanking time is desired, then the BINH input can be taken high to end the blanking of the Receive input any time prior to internal blanking. This may be desirable to detect objects closer than 1.33 feet (corresponding to 2.38 milliseconds) and may be done of transducer damping is sufficient so that ringing is not detected as a return signal.

For more information, visit our website: www.senscomp.com

Copyright © 2004 SensComp. Inc. 9/13/04

In the single-echo mode of operation (Figure 1), all that must be done next is to wait for the return of the transmitted signal, traveling at approximately 0.9 milliseconds per foot out and back. The returning signal is amplified and appears as a high logic level echo output. The time between INIT going high and the Echo (ECHO) output going high is proportional to the distance of the target from the transducer. If desired, the cycle can now be repeated by returning INIT to a low logic level and then taking it high when the next transmission is desired.

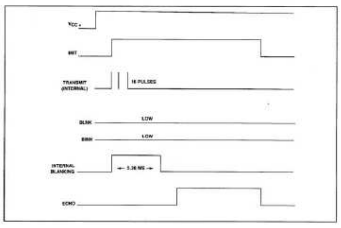


FIGURE 1: EXAMPLE OF A SINGLE-ECHO-MODE CYCLE WITHOUT BLANKING INPUT

If there is more than one target and a single transmission detects multiple echos, then the cycle is slightly different (Figure 2). After receiving the first return signal which causes the ECHO output to go high, the Blanking (BLNK) input must be taken high then back low to reset the ECHO output for the next return signal. The blanking signal must be at least 0.44 milliseconds in duration to account for all 16 returning pulses from the first target and allow for internal delay times. This corresponds to the two targets being 3 inches apart.

During a cycle starting with INIT going high, the receiver amplifier gain is increased at discrete times (Figure 3) since the transmitted signal is attenuated with distance. At approximately 38 milliseconds, the maximum gain is attained. Although gain can be increased by varying R1 (see Component Layout), there is a limit to which the gain can be increased for reliable module operation. This will vary from application to application. The modules are "kitted" prior to their final test during manufacture. This is necessary because the desired gain distribution is much narrower than the module gain distribution if all were kitted with one value resistor. As kitted, these modules will perform satisfactorily in most applications. As a rule of thumb, the gain can be increased up to a factor of 4, if required, by increasing R1 correspondingly. Gain is directly proportional to R1.

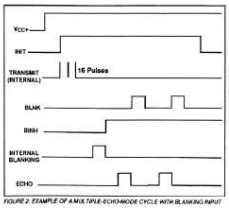


FIGURE 2: EXAMPLE OF A MULTIPLE-ECHO-MODE CYCLE WITH BLANKING INPUT

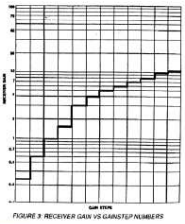


FIGURE 3: RECEIVER GAIN VS GAINSTEP NUMBERS

 Copyright © 2004 SensComp. Inc. 9/13/04

Input/Output Schematic Notes:

The ECHO and OSC outputs are open collector NPN transistor outputs (Figure 4) requiring 4.7 Kohm pull-up resistors between V_{CC} and the output.

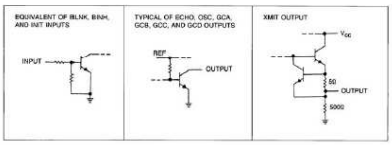
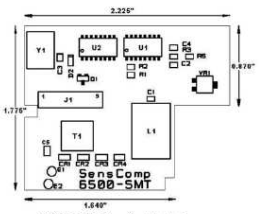
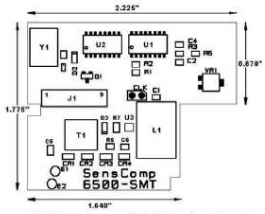


FIGURE 4: SCHEMATIC EQUIVALENT CIRCUITS OF BOARD INPUTS/OUTPUTS

Component Layouts



6500 SMT Ranging Module
PID#615078

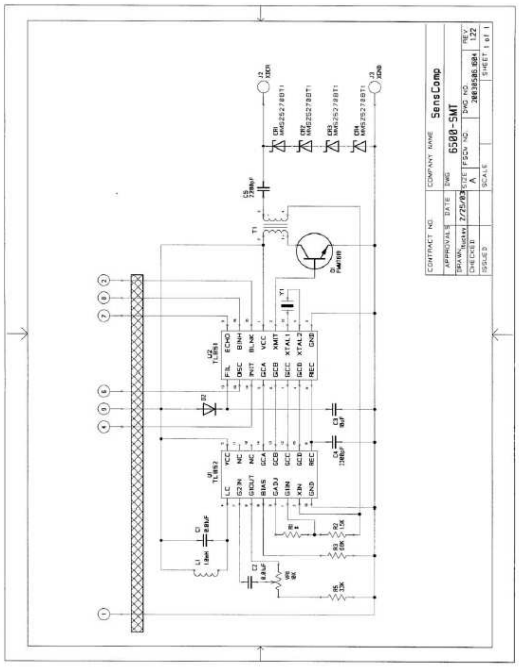


6500E Enhanced SMT Ranging Module
PID#615079

 Copyright © 2004 SensComp. Inc. 9/13/04

6500 Ranging Mod.-- page 5

Schematic – 6500 SMT Ranging Module--PID#615078

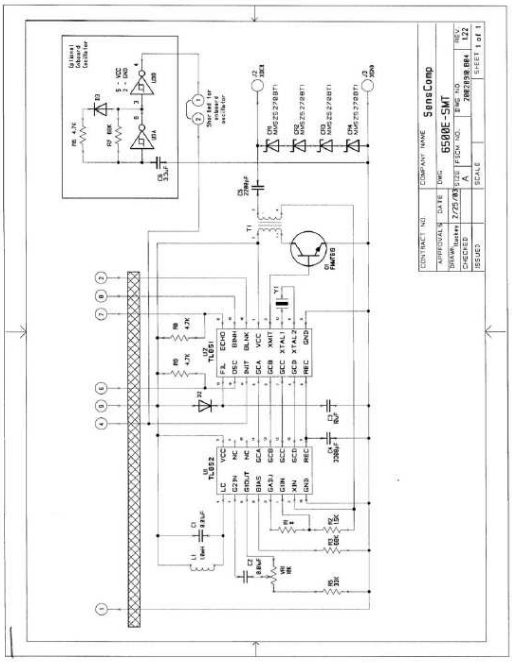


For more information, visit our website: www.senscomp.com

Copyright © 2004 SensComp, Inc. 9/13/04

6500 Ranging Mod.-- page 6

Schematic – 6500E Enhanced SMT Ranging Module --PID#615079



For more information, visit our website: www.senscomp.com

Copyright © 2004 SensComp, Inc. 9/13/04